

République Algérienne Démocratique et Populaire

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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Raffinage et pétrochimie

Spécialité : génie pétrochimique

Thème

Caractérisation et performance d'un bi carburant
hydrogène/essence : recherche bibliographie

Soutenu le : 04 /06 /2023

Devant le jury composé de :

Youcef Radjeb
M.Yazide Belghit
Bilal khaled

Président
Examineur
Encadreur

Présent Par :

Ali Aichouche
Raid Chabani
Abdessalam Dida
Laid Chouia
khaled Tedjini

2022-2023

Remerciements

❖ *Nous adressons nos sincères remerciements en premier lieu à notre superviseur **M. Khaled Bilal** pour toutes les informations qu'il nous a données, sa patience et son précieux suivi tout au long de la réalisation de ce travail.*

❖ *Nous remercions également chaque membre du jury d'avoir consacré une partie de son temps à la lecture de cette lettre et d'avoir accepté d'échanger avec nous sur ce travail.*

❖ *Nous adressons nos remerciements à tous nos professeurs et membres du département de pétrochimie de l'**Université El-oued** .*

❖ *Nous remercions tous les enseignants et professeurs qui ont réussi à nous instruire et même tous ceux qui nous ont appris une lettre de toutes personnes tout au long de notre parcours scolaire.*

Dédicace

Je dédie cet humble travail À :
ceux qui m'ont encouragé dans ma vie et m'ont
poussé à faire de mon mieux. La lumière de mes yeux,
mes chers parents :
ma mère et mon père, que Dieu les protège et les protège.
à tous mes amis.
Pour tous les membres de la famille, chacun en son nom.
Tout le monde a droit sur nous.

Ali Aichouche
Raid Chabani
Abdessalam Dida
Laid Chouia
khaled Tedjini

Résumé:

L'essence/hydrogène est désormais considéré comme un carburant mixte alternatif en raison de l'amélioration des performances du moteur et du contrôle de l'allumage tout en réduisant les émissions dangereuses (dioxyde de carbone, oxydes d'azote, hydrocarbures). Des études ont mené des tests analytiques et numériques pour déterminer les performances et les caractéristiques d'émission des bicarburants en tant que carburant alternatif pour les moteurs à combustion interne.

Mots-clés : bi-carburant, moteur à allumage commandé, performances, émissions .

Abstract:

Gasoline/Hydrogen is now considered an alternative dual fuel due to improved engine performance and ignition control while reducing hazardous emissions (Carbon Dioxide, Nitrogen Oxides, Hydrocarbons). Studies have conducted analytical and numerical tests to determine the performance and emission characteristics of dual fuels as an alternative fuel for internal combustion engines.

Keywords : Bi-fuel, Spark Ignition Engine, Performance, Emissions .

ملخص:

يعتبر البنزين\الهيدروجين الآن كثنائي وقود بديل بسبب تحسين أداء المحرك التحكم في الاشتعال مع تقليل الانبعاثات الخطرة (ثاني أكسيد الكربون ، أكاسيد النيتروجين ، الهيدروكربونات). دراسات أجريت الاختبارات التحليلية والرقمية لتحديد الأداء و خصائص انبعاث الوقود الثنائي كوقود بديل للمحركات الاحتراق الداخلي.

الكلمات المفتاحية: وقود ثنائي ، محرك اشتعال شراري ، أداء ، انبعاثات.

SOMMAIRE

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des abréviations	III
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : hydrogène

I.1. Introduction.....	4
I.2. Propriétés de l'hydrogène.....	4
I.2.1. Caractéristiques de l'hydrogène.....	4
I.2.2. L'hydrogène : vecteur d'énergie.....	6
I.3. Utilisations industrielles de l'hydrogène Avantages et inconvénients de l'hydrogène.....	7
I.3.1. Industrie électronique.....	8
I.3.2. Hydrogène carburant.....	8
I.3.3. Industries chimiques.....	9
I.4 . Procède de production d'hydrogène.....	9
I.4.1. Les avantages.....	9
I.4.2. Les inconvénients.....	9
I.5. Modes de production d'hydrogène.....	10
I.5.1. Procède de production d'hydrogène.....	10
I.5.1.1. Productions de l'hydrogène à partir des énergies fossiles.....	12
I.5.1.2. Production d'hydrogène par vaporéformage de gaz naturel.....	12
I.5.1.3. L'oxydation partielle.....	13
I.5.1.4. Le reformage autotherme.....	14
I.5.1.5 . Production Par électrolyse de l'eau.....	15

I.5.1.6. Procédés photo-électrochimiques.....	17
I.5.1.7. Production d'hydrogène par nucléaire.....	18
I.5.1.8. Production d'hydrogène par biomasse.....	20
I.6. Transport de l'hydrogène.....	21
I.6.1. Pipeline.....	21
I.6.2. Rail.....	22
I.6.3. Navire.....	22
I.6.4. Camion.....	23
I.7 Stockage de l'hydrogène.....	23
I.7.1 .Stockage gazeux.....	23
I.7.2. Stockage liquid.....	24
I.7.3. Stockage solide.....	24
I.7.4. hydrogène en termes de sécurité.....	25
I.8. Véhicule à hydrogène.....	26
I.9.1.Principe de fonctionnement	26
I.9.1.1 Moteur à hydrogène.....	27
I.9.1.2. La pile à combustible.....	27
I.9.1.2.1 Différents types de piles à combustible.....	27
I.9.1.2.2 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible	27
I.9.1.2.3 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible.....	29
I.7. Conclusion	30

Chapitre II : L'essence

II.1.Introduction.....	32
II .2.Les procédés qui donnent l'essence à partir des pétroles bruts.....	32
II .2.1.Distillation.....	32

II.2.1.1. Distillation atmosphérique.....	33
II.2.1.1.1 Méthodes de distillation du pétrole.....	34
a- distillation atmosphérique dans une seule colonne.....	34
b- distillation atmosphérique du pétrole avec prédistillation	35
c- distillation atmosphérique avec un ballon de flash.....	35
II.2.1.3 Distillation sous vide.....	36
II.2.2.Procédés de conversion par altération	37
II.2.2.1 Reformage catalytique	37
II.2.2.2.Isomérisation.....	39
II.2.3. Procédés de conversion par décomposition.....	40
II.2.3.1. Craquage thermique.....	40
II.2.3.2. Craquage catalytique.....	41
II.2.3.3. Hydrocraquage.....	41
II.2.3.4.Viscoréduction.....	42
II.2..3.5.Vapocraquage.....	42
II.2.3.6.Cokéfaction.....	43
II.2.4. Procédés de conversion par combinaison.....	43
II.2.4.1. Polymérisation.....	43
II.2.4.2 Alkylation.....	44
II.3.Les propriétés des essences.....	45
II.3.1.La masse volumique (densité).....	45
II.3.2. La volatilité.....	46
II.3.3. La distillation ASTM.....	46
II.3.4. La Tension de vapeur REID.....	47
II.3.5. Le rapport V/L.....	47

II.3.6. L'indice d'octane.....	48
II.4. Additifs pour essences.....	49
II.4.1. alkyles de plomb.....	50
II.4.2. Les composes oxygénés.....	50
II.4.3. Ethers.....	50
II.4.4. Alcools.....	51
II.5. Spécifications des essences.....	52
II.6. Conclusion.....	55

Chapitre III : Moteur à allumage commandé par étincelle

III.1. Introduction.....	57
III.2. Définition du moteur thermique.....	57
III.2.1 . Moteurs à combustion externe et à combustion interne.....	57
III.3. Composants de base du moteur.....	58
III.3.1 . Éléments de construction.....	59
a- Organes fixes.....	59
b- Organes mobiles.....	59
c- Organes annexes.....	60
III.3.2 Composants du moteur.....	60
III.3.3 Les fonctions du moteur thermique.....	64
III.4. Le principe de fonctionnement des moteur.....	64
III.4.1 . Moteur à quatre temps à allumage commandé.....	66
III.4.2 . Moteur à quatre temps à allumage par compression.....	68
III.4.3 Moteur 2 temps Moteur essence 2 temps.....	71
III.4. 4 .Comparaison des moteurs à quatre temps et à deux temps.....	73
III.5 .Application des moteurs IC.....	74
III.6 .Emission de polluants.....	75

III.6.1	la formation des principaux/.....	76
III.6.2	Réduction des émissions polluantes.....	78
III.6.2.1	Techniques de réduction des émissions polluantes.....	78
III.6.2.2	Réduction des émissions à la source.....	78
III.6.2.3	Traitement catalytique des gaz d'échappement.....	79
III.6.2.4	Modification effectuées au niveau de la conception du moteur.....	79
III.7	Conclusion.....	80

Chapitre IV : Étude théorique

IV.1.	Introduction.....	82
IV.2.	Variation d'indice d'octane.....	89
IV.3.	ÉMISSIONS DE GAZ.....	90
IV. 3.1.	Émissions de NO _x	90
IV. 3.2.	Émissions de CO.....	94
IV.3.3.	Émissions de HC.....	97
IV. 3.2	Le rendement.....	102
Conclusion générale		110

Références bibliographique

Liste des figures

Figure I.1 La production d'hydrogène issue de plusieurs sources d'énergie	11
Figure I.2 : Production d'hydrogène par vapo-reformage	13
Figure I.3 : Procédé de reformage auto thermique	15
Figure I.4 : Principe d'électrolyse de l'eau	17
Figure I.5 : Procédés photo-électrochimiques	18
Figure I.6: Réacteurs nucléaire pour la production de l'hydrogène	20
Figure I.7 Principales voies des procédés thermochimiques pour la production de H ₂ à partir de la biomasse	21
Figure I.8 : Réservoir adapté l'hydrogène gaz, 5%, masse H ₂ / système 32 L / 350 bar (2005)	24
Figure I.9: Réservoir adapté l'hydrogène gaz, 5%, masse H ₂ / système 32 L / 700 bar (2012).....	24
Figure I.10: Schéma de fonctionnement de la pile à combustible	29
Figure. II.1: Schéma simple d'une colonne de distillation atmosphérique	34
Figure.II.2: schéma de distillation atmosphérique dans une seule colonne.....	35
Figure.II.3: schéma de distillation atmosphérique avec une colonne de prédistillation	35
Figure.II.4: Schéma de distillation atmosphérique avec(ballon de flash)	36
Figure. II .5 : Schéma simplifié de la distillation sous vide	37
Figure Il. 6 : Schéma du procédé de reformage catalytique	38
Figure Il. 7: Schéma du procédé d'isomérisation du butane	40
Figure II.8 : Schéma du procédé de craquage catalytique	41
Figure Il. 9 : Schéma du procédé hydrocraquage	42
Figure III.1 : Moteurs à combustion externe	58

Figure III.2 : Coupe transversale d'un moteur à allumage commandé	59
Figure III.3 : En ligne : les cylindres sont disposés en ligne dans un seul banc	61
Figure III.4 : Les cylindres sont disposés en deux bancs	61
Figure III.5 : Les cylindres sont disposés en deux bancs sur les côtés opposés du moteur	61
Figure III.6: Principe de fonctionnement d'un moteur SI à quatre temps	66
Figure III.7: Diagramme p -V idéal d'un moteur SI à quatre temps	67
Figure III.8: Cycle de fonctionnement d'un moteur CI.....	69
Figure III.9: Diagramme p-V idéal d'un moteur CI à quatre temps.....	70
Figure III.10: Moteur SI à deux temps à balayage de carter	72
Figure III.11: Diagramme p-V idéal d'un moteur SI à deux temps	73
Figure IV.1. Le banc d'essai expérimental.....	83
Figure IV.2. Diagramme schématique de l'installation expérimentale	84
Figure IV.3. Composants du système expérimental	87
Figure IV.4. Disposition du système expérimental	88
Figure. IV.5 : NO _x versus α_{H2} pour différents taux d'EGR à $\lambda = 1,0$	91
Figure. IV.6: NO _x versus α_{H2} pour différents taux d'EGR à $\lambda = 1.2$	91
Figure. IV.7: NO _x versus α_{H2} pour différents taux d'EGR à $\lambda = 1.4$	92
Figure. IV.8: Effet du taux d'EGR sur l'émission de NO _x pour différents.....	93
Figure. IV.9. Effet du débit d'hydrogène sur la concentration de CO dans les gaz d'échappement à différentes pressions	94
Figure. IV.10 : Émissions de CO en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda = 1,2$ et $1,4$	95
Figure. IV. 11: Effet du taux d'EGR sur les émissions de CO à différents horaires d'allumage	97
Figure IV.12. Effet du débit d'hydrogène sur l'hydrocarbure non brûlé à différents	

Pouvoir.....	98
Figure IV. 13: Émissions de HC en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda=1,0$	99
Figure IV. 14 : Émissions de HC en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda=1,2$	99
Figure IV. 15 : Émissions de HC en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda= 1,4$	100
Figure IV.16 : Effet du taux d'EGR sur les émissions de HC pour différents horaires d'allumage.....	102
figure IV. 17: Effet du débit d'hydrogène sur le rendement thermique de rupture à différentes puissances	103
Figure IV.18 : Effet du taux EGR sur le couple pour différents allumages horaires	105
Figure IV.19: BMEP en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda=1.2$ et 1.4	106
Figure IV.20: CA0-10 versus α_{H2} pour différents taux d'EGR à $\lambda= 1,2$ et $1,4$	107
Figure IV.21: COVIMEP versus taux EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda= 1,2$.et $1,4$	108

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Propriétés physiques de l'hydrogène.....	6
Tableau I.2 le pouvoir calorifique inférieur (PCI), Supérieur (PCS) de certains combustibles...	8
Tableau II.1 : Caractéristiques des additifs	52
Tableau II. 2: Spécifications des essences éthyle	54
Tableau II. 3: Spécifications des essences sans plomb	55
Tableau III.1 : Comparaison des moteurs à quatre temps et à deux temps	74
Tableau III.2 : Application des moteurs	75

Liste des abréviations

ASTM: Société américaine pour les essais de matériaux . (American Society for Testing Materials)

HC : Hydrocarbure.

NO_x : Oxyde de nitrogène

CO : Monoxyde de carbone

BTDC : Avant le point mort haut (Bifore top Dead center)

CA : angle de vilebrequin (Crack angle)

EGR : Recirculation des gaz d'échappement

MBT : Avance minimale pour le meilleur

couple **COV :** Coefficient de variation

BMEP : Pression effective moyenne de freinage (Break mean effective pressure)

PFI : Injection de carburant dans l'orifice (Port Fuel Injection)

HDI : Injection directe d'hydrogène

GDI : Injection Directe Essence (Gasoline Direct Injection)

B.P. : puissance de freinage watt (brake power watt)

BSFC : Consommation spécifique de carburant des freins kg/k h (brake specific fuel consumption)

η : efficacité

λ : Coefficient d'excès d'air

α_{H2} : fraction d'énergie de l'hydrogène

V : volt

I : courant A

C.V : pouvoir calorifique, kJ/kg

m : débit massique, kg/s

moteurs SI: moteur à allumage par étincelle

moteurs CI : moteur à allumage par compression

moteurs IC : moteurs à combustion interne

moteurs EC : moteurs à combustion externe

PMB : point mort bas

PMH : point mort haut (TDC)

Introduction générale

De nos jours, la question de la durabilité énergétique et de l'impact environnemental des carburants traditionnels a suscité un intérêt croissant au niveau mondial (Salimifard et Raeesi 2014). La dépendance continue à l'égard des combustibles fossiles, tels que l'essence et le diesel, a conduit à des problèmes environnementaux et sanitaires majeurs (Wu et al. 2011), notamment les émissions de gaz à effet de serre et la pollution atmosphérique (Verhelst et al. 2009). Pour les moteurs à allumage commandé par étincelle, un problème persistant concerne les émissions de HC (hydrocarbures), de CO (monoxyde de carbone) et de NOx (oxydes d'azote) surtout lors du démarrage à froid (Tabar, Hamidi, et Ghadamian 2017), étant donné que la majorité de la pollution est générée pendant cette phase (Wu et al. 2011). En raison de l'intensification des réglementations environnementales strictes concernant les émissions de gaz d'échappement et des prévisions d'épuisement futur des réserves mondiales de pétrole, la recherche de carburants alternatifs est fortement encouragée. Face à ces défis, il est impératif de rechercher et de développer des alternatives plus propres et durables pour répondre aux besoins en carburant de notre société. Les bi carburants sont une catégorie de carburants spécialement conçus pour améliorer l'efficacité et la propreté des véhicules (Pipitone et Beccari 2009). Ils sont composés d'un mélange de deux types de carburants distincts. Cette technologie a été développée pour la première fois au début des années 2000 et est désormais largement utilisée dans l'industrie automobile (Duy, Duc, et Van 2021). Les biocarburants contribuent à réduire la pollution en offrant une combustion plus propre par rapport à l'essence et gas-oil traditionnelle. De plus, ils améliorent l'économie de carburant des véhicules, ce qui signifie qu'ils sont économes en énergie. En conséquence, parmi ces alternatives, l'hydrogène a émergé comme une option prometteuse pour les moteurs à combustion interne (MCI) en raison de ses excellentes propriétés de combustion (Duc et Duy 2018). L'hydrogène présente un avenir brillant et peut offrir des performances supérieures à celles des moteurs conventionnels dans de nombreux aspects. Il s'agit d'un carburant renouvelable à longue durée de vie qui améliore à la fois les performances de combustion et les émissions (Yao et al. 2014). Outre l'hydrogène, d'autres carburants alternatifs tels que le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le gaz naturel comprimé (GNC), les huiles végétales, le biogaz et le gaz de synthèse ont également été considérés comme des options pour réduire les émissions de gaz d'échappement. Cependant, l'hydrogène se distingue par ses caractéristiques de combustion exceptionnelles et son potentiel à long terme en tant que carburant durable (Wu et al. 2011). Dans cette optique, le bi-carburant essence hydrogéné se présente comme une solution prometteuse.

Le bi carburant essence hydrogéné est un mélange d'essence traditionnelle et d'hydrogène, qui offre plusieurs avantages intéressants. En premier lieu, l'hydrogène est un combustible propre qui ne produit pas d'émissions de CO₂ lors de sa combustion, ce qui en fait une option attractive pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (Tabar, Hamidi, et Ghadamian 2017). De plus, l'utilisation de l'hydrogène comme carburant peut contribuer à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et à la diversification de nos sources d'énergie (Wu et al. 2011).

Le principal défi dans l'utilisation du bi-carburant essence hydrogéné réside dans son efficacité énergétique et sa viabilité économique. Il est essentiel de trouver des méthodes efficaces pour produire, stocker et distribuer l'hydrogène de manière rentable, tout en garantissant une combustion optimale dans les moteurs à combustion interne. L'objectif de cette thèse est donc d'explorer en profondeur le bi-carburant essence hydrogéné en se concentrant sur divers aspects, tels que sa production, ses caractéristiques de combustion, son impact environnemental et son potentiel économique. Nous examinerons également les défis techniques et les opportunités associés à cette technologie, ainsi que les perspectives d'application dans le secteur automobile.

En conclusion, cette recherche vise à fournir une analyse approfondie du bi-carburant essence hydrogéné et à évaluer son potentiel en tant que solution viable et durable pour l'avenir de l'industrie automobile. Nous espérons que cette étude théorique contribuera à l'avancement des connaissances dans le domaine des carburants alternatifs et aidera à accélérer la transition vers une société plus respectueuse de l'environnement.

Ce mémoire est organisé en quatre (4) chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les propriétés de l'hydrogène, ses utilisations industrielles, ses méthodes de production, ainsi que les moyens dans lesquels il est utilisé. Dans le cadre du deuxième chapitre, nous abordons les opérations qui ont lieu sur l'essence pour l'extraire du pétrole brut, ses propriétés, comment l'améliorer et ses spécifications. Dans le chapitre 3, nous examinons les composants de base et le principe des moteurs à allumage commandé SI (deux temps et quatre temps), ainsi que leurs utilisations et les risques d'émissions dans l'environnement. Enfin, nous avons analysé un ensemble d'expériences examinant les performances, l'efficacité et les émissions des moteurs bi carburant.

Chapitre I :Le hydrogène

I.1.Introduction :

Notre infrastructure énergétique actuelle est dominée par l'utilisation de combustibles fossiles, ce qui entraîne des émissions de gaz à effet de serre. L'hydrogène est potentiellement un vecteur énergétique idéal, car il est non polluant et cède ses électrons lors de l'oxydation pour ne former que de l'eau. Bien qu'il soit l'élément le plus abondant dans l'univers, l'élément hydrogène ne se trouve pas en quantité significative sur Terre. (Lubitz et Tumas 2007) .L'hydrogène est souvent proposé comme le carburant du futur, mais la transformation de l'économie actuelle des combustibles fossiles en une économie de l'hydrogène nécessitera la solution de nombreux problèmes scientifiques et technologiques complexes, qui nécessiteront plusieurs décennies pour être accomplis. (Armaroli et Balzani 2011)

L'hydrogène est neutre en carbone au point d'utilisation finale, mais ce la dépend de la propreté du chemin de production et de l'énergie utilisée pour le produire. Ainsi, s'assurer de l'origine de l'hydrogène est essentiel pour que l'hydrogène soit considéré comme une énergie propre. (Dawood, Anda, et Shafiullah 2020)

Nous commençons ce chapitre par décrire des généralités sur l'hydrogène Nous commençons ce chapitre par décrire des généralités sur l'hydrogène comme étant le vecteur d'énergie pour l'avenir, puis nous rappelons les méthodes de production d'hydrogène comme l'élément le plus abondant, qui est lié à d'autres composant chimique, nous allons également traiter des moyens de transport et de stockage. En fin, nous présentant leurs utilisations spécialement les véhicules à hydrogène et aussi nous citons certaines expériences qui ont commencés à exploiter l'hydrogène .

I.2.Propriétés de l'hydrogène :

I.2.1.Caractéristiques de l'hydrogène :

L'hydrogène est unique parmi les éléments. Il est caractérisé par un seul électron de valence, Il existe trois isotopes de l'hydrogène, avec des masses atomiques de 1,0079, 2,0142 et 3,0144 ; ce sont respectivement l'hydrogène (protium), le deutérium et le tritium. Seuls l'hydrogène et le deutérium se trouvent en quantités mesurables dans la nature. La plupart des propriétés rapportées pour l'hydrogène naturel sont celles duprotium. Ledeutérium, en raison de sa faible concentration, contribue de manière négligeable aux propriétés globales de l'hydrogène naturel. (Williams 2013)

Rappelons que l'hydrogène est incolore, inodore et insipide, inflammable et non toxique sauf en grande quantité, ne pesant que 1/14 du poids de l'eau, rendant l'hydrogène liquide à son contact friable (Rouai et Zouzou 2017)

Parmi les caractéristiques qui font de l'hydrogène un important vecteur énergétique pour la future sont :

- ✓ Métal solide uniquement à basse température (14K) .
- ✓ C'est le plus petit par sa taille parmi les minéraux les plus abondants, se classant au neuvième rang sur Terre et au deuxième dans les océans .
- ✓ Élément chimique simple, léger (plus que l'air), stable, peu réactif à température ambiante .
- ✓ Facile à transporter grâce à sa faible densité .
- ✓ Peut être produit en quantités presque illimitées. Hydrogène est un gaz très volatil , il présentera moins de risques d'accumulation qu'un gaz « lourd » comme le gaz naturel (rappelons que la limite d'inflammabilité est de 4% en volume dans l'air) . (Boudebouze 2022)

Le tableau suivant représente quelques propriétés physiques de l'hydrogène :

Tableau I.1 : Propriétés physiques de l'hydrogène .(Rouai et Zouzou 2017)

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119 930 kJ/kg 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	141 860 kJ/kg 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 273K	0.0898 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Chaleur spécifique (C_p) et (C_v) à 293K	14 266 J/kg. K / 10 300 J/kg. K
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/ (m. K)
Température de solidification	14.01K
Température critique	33.30K
Température d'autoinflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2 318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol%)	4-75 (gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol%)	13-65 (gaz naturel 6.3-13.5)

Energie minimale d'inflammation (uJ)	20 (gaz naturel 290)
Suppression de détonation(mélange stochiométrique)	14.7 bars (gaz naturel 16.8 bars)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ³ /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stochiométrique dans l'air(vol%)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

I.2.2.L'hydrogène : vecteur d'énergie :

L'hydrogène est connu comme un vecteur énergétique bénin, et étant donné le manque d'hydrogène pur naturellement, les industries traditionnellement approuvées telles que le raffinage du pétrole et les engrais obtiennent grâce à la gazéification à forte intensité d'émissions et à la reformulation des combustibles fossiles, bien que la vulgarisation et la diffusion de l'idée que l'hydrogène est un vecteur d'énergie alternative, Il a été longtemps discuté mais n'a pas été réalisé en raison du manque de technologies de génération et de conversion d'hydrogène, et de son coût élevé. L'hydrogène est un carburant à haute énergie, car il a le pouvoir calorifique le plus élevé par rapport aux autres carburants, Comme indiqué dans le tableau suivant: (Safidine et Alliche 2012)

I.3.Utilisations industrielles de l'hydrogène :

L'hydrogène est une molécule très importante avec une étendue et une étendue énormes d'application et d'utilisation. Il est actuellement utilisé dans de nombreuses industries, de la chimie et du raffinage à la métallurgie, au verre et à l'électronique. L'hydrogène est principalement utilisé comme réactif. Mais il est également utilisé comme carburant dans les applications spatiales, comme « piègeur d'O₂ » dans le traitement thermique des métaux et pour sa faible viscosité et densité. (Ramachandran et Menon 1998)

Des statistiques ont été réalisées en France sur les taux d'utilisation de l'hydrogène produit dans les domaines industriels, où on le trouve inactif dans le domaine de la chimie (10%), alors que dans la production d'engrais le pourcentage augmente, atteignant (25%), alors qu'il est relativement élevée dans le domaine du raffinage du pétrole (60%).

L'utilisation de l'hydrogène comme moyen de stockage /déstockage pour gérer l'intermittence des sources d'énergie renouvelables électrogènes (solaire PV et éolien) n'est envisagé qu'après 2035, hormis auparavant le financement de quelques démonstrateurs. (Bonhomme s. d.) Nous donnons plus de détails concernant l'utilisation de l'hydrogène dans divers domaines industriels :

Tableau I.2 le pouvoir calorifique inférieur (PCI), Supérieur (PCS) de certains combustibles. (Safidine et Alliche 2012)

Fuel	HHV MJ/kg	HHV BTU/lb	HHV kJ/mol	LHV MJ/kg
Hydrogen	141.80	61,000	286	121.00
Methane	55.50	23,900	889	50.00
Ethane	51.90	22,400	1,560	47.80
Propane	50.35	21.700	2,220	46.35
Butane	49.50	20,900	2,877	45.75
Pentane				45.35
Gasoline	47.30	20,400		44.4
Paraffin	46.00	19,900		41.50
Kerosene	46.20	19,862		43.00
Diesel	44 80	19,300		43.4
Coal (Anthracite)	27.00	14,000		
Coal (Lignite)	15.00	8,000		
Wood (MAF)	21.7	9,400		
Peat (damp)	6.00	2,500		
Peat (dry)	15.00	6,500		

I.3.1. Industrie électronique :

L'hydrogène est également utilisé dans l'industrie électronique. L'hydrogène joue un rôle technologique important et scientifiquement intéressant dans les semi-conducteurs. Premièrement, l'industrie électronique a besoin d'hydrogène de haute pureté pour la production et le traitement du silicium. Pour éviter la formation de couches d'oxyde lors de la production de structures semi-conductrices intégrées, la teneur en oxygène du gaz

protecteur doit être réduite à un niveau très bas par réaction catalytique avec l'hydrogène. (Eliezer et al. 2000)

I.3.2.Hydrogène carburant :

Les véhicules à hydrogène et à pile à combustible sont souvent considérés comme des éléments cruciaux dans la décarbonation des systèmes de transport. Cependant, malgré le fait que les véhicules à hydrogène et à pile à combustible ont une longue histoire, ils ne sont encore considérés que comme une option de mobilité à long terme. (Staffell et al. 2019)

le véhicule électrique à pile à combustible à hydrogène monté sur véhicule utilise une pile à combustible comme véhicule source d'alimentation de génération d'énergie, et utilise un bloc-batterie au lithium comme véhicule . (Shusheng et al. 2020)

La température de flamme très élevée « 2700°C » atteinte avec l'oxygène la fait choisir sous forme liquide comme propulseur des fusées et engins spatiaux. (Benyahia 2014)

I.3.3.Industries chimiques:

L'hydrogène a de nombreuses utilisations dans ce domaine, dont les plus importantes sont :

- ✓ Synthèse de l'ammoniac par réaction avec l'azote pour fabriquer essentiellement des engrais, mais aussi des explosifs, des matières colorantes ou des résines .
- ✓ Raffinage : hydrosulfuration des fuels pour éliminer le soufre et hydroraffinage pour produire des essences spéciales .
- ✓ Synthèse du méthanol par réaction du gaz à l'eau pour la fabrication de caoutchoucs, de résines et de produits de base pour la synthèse chimique comme l'acide acétique, le chlorure de méthyle, les esters.. .
- ✓ Chimie organique: hydrogénation d'une part d'un certain nombre de matières. pour la production de colorants et d'autre part de précurseurs des sulfamides ou des vitamines .
- ✓ Chimie minérale: production d'eau oxygénée . (Benyahia 2014)

I.4. Avantages et inconvénients de l'hydrogène :

I.4.1. Les avantages :

- ✓ L'avantage le plus important de l'hydrogène est qu'il produit environ 2,8 fois plus d'énergie pour la même unité de masse que l'essence .
- ✓ Lorsque l'hydrogène est brûlé, la seule émission est de la vapeur d'eau et aucun dioxyde de carbone (CO₂) n'est produit .
- ✓ L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers, représentant les 3/4 de toute la matière .
- ✓ Il réduit la dépendance au pétrole, a une très bonne efficacité et est non polluant .

I.4.2. Les inconvénients:

- ✓ Il a besoin de quatre fois le volume pour donner une quantité donnée d'énergie. Par exemple, un réservoir de 15 gallons d'essence contient 90 livres de l'essence un réservoir de 60 gallons d'hydrogène gazeux pèserait seulement 34 livres. L'hydrogène a le potentiel de réduire la quantité de carburant consommée par les plates-formes, mais la taille du réservoir de stockage augmenterait .
- ✓ Contrairement aux combustibles fossiles qui peuvent être minées ou extraites, l'hydrogène doit être produit .
- ✓ L'hydrogène est incolore et inodore et brûle avec une flamme presque invisible. Large intervalle d'explosivité de l'hydrogène, couplé avec son énergie d'allumage très faible, lui donnent un inconvénient potentiel car une accumulation d'hydrogène à l'intérieur d'un véhicule mal ventilé peut exploser facilement .
- ✓ L'ajustement dans les parties et composant manufacturés sera nécessaire pour l'hydrogène liquide cryogénique. La plage de température cryogénique est de -150 degrés Celsius (-238°F) à -273 degrés Celsius (-460°F). (Benzerrouk et Alliche 2013)

I.5. Modes de production d'hydrogène:

Comme nous l'avons mentionné, l'hydrogène n'est pas directement disponible dans la nature. Il a cependant L'hydrogène peut être produit à partir de trois sources d'énergies différentes : les énergies fossiles, la biomasse ou l'électricité issue des énergies renouvelables et du nucléaire. Chaque source d'énergie, associée à un procédé chimique, permet la production d'hydrogène .

Mais pour être économiquement et écologiquement viable, la production d'hydrogène doit répondre à trois critères

- ✓ Compétitivité : les coûts de production ne doivent pas être trop élevés .
- ✓ Rendement énergétique : la production d'hydrogène ne doit pas nécessiter trop d'énergie .
- ✓ Propreté : le processus de fabrication doit être non polluant sous peine d'annuler l'un des principaux atouts de l'hydrogène .

La Figure I.1 décrit les différentes méthodes disponibles pour produire de l'hydrogène. (Azin 2022)

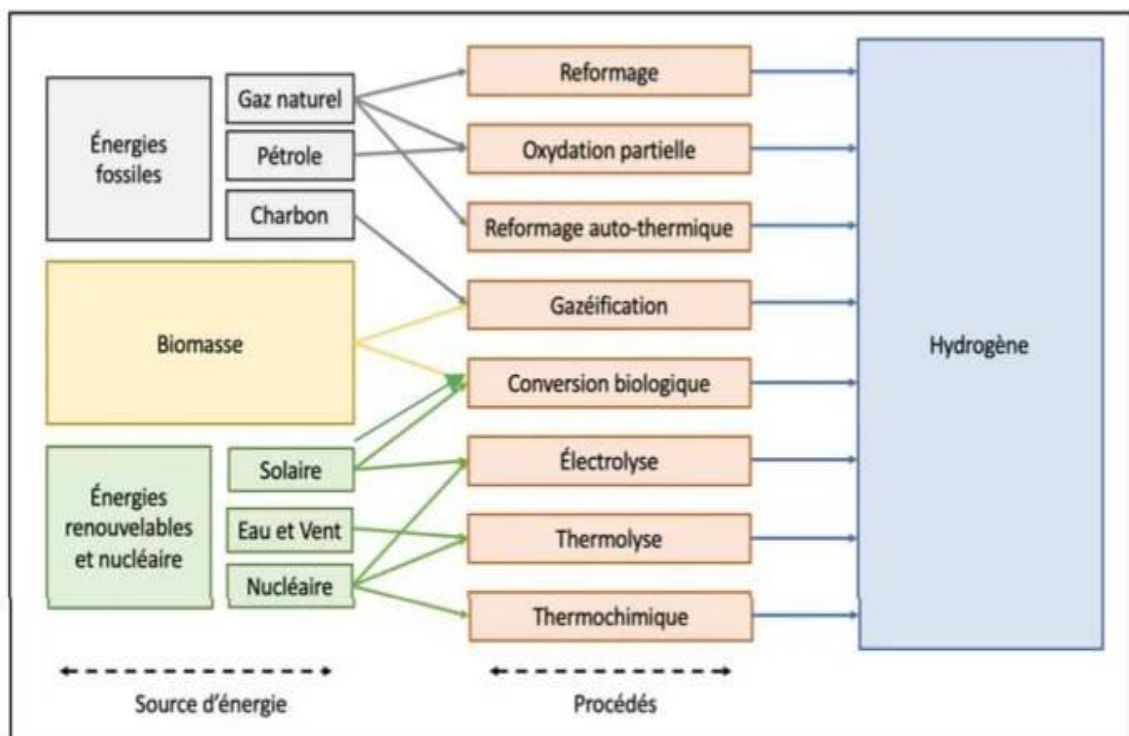


Figure I.1 La production d'hydrogène issue de plusieurs sources d'énergie. (Azin 2022)

la production d'hydrogène par les procédés maîtrisés est réalisée à 95% en utilisant des ressources fossiles, en particulier par vaporeformage du gaz naturel (48%). Le vaporeformage du gaz naturel consiste à faire réagir l'hydrocarbure avec de la vapeur d'eau dans une gamme de température comprise entre 973 K et 1373 K. Cette réaction a lieu en deux étapes qui produisent finalement de l'hydrogène et du dioxyde de carbone.

La moyenne des seules émissions de dioxyde de carbone liées à la consommation de méthane par ce procédé est de 9 kg/kg d'hydrogène .

La production d'hydrogène à partir d'autres ressources fossiles (hydrocarbures 30% et charbon 18%) est réalisée principalement par le procédé d'oxydation partielle. Le composé carboné réagit avec de l'oxygène et de la vapeur d'eau pour réaliser une combustion incomplète, produisant du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et de l'hydrogène. Les émissions de CO₂ de ce type de procédés contribuent fortement à l'augmentation de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère. Un dernier procédé mature est l'électrolyse de l'eau qui permet de répondre à 4% de la demande mondiale. (N et Khaled 2017).

Si, comme mentionné précédemment, il existe plusieurs méthodes de production d'hydrogène, qu'elles soient au stade de la recherche ou déjà l'industrie, ces différentes méthodes peuvent être regroupées comme suit : (Kpoumié 2013)

I.5.1. Productions de l'hydrogène à partir des énergies fossiles:

restent les combustibles dominants dans l'approvisionnement mondial en hydrogène car Les coûts de production sont étroitement liés aux prix du carburant Toujours à des niveaux acceptable Actuellement , plusieurs les technologies matures produisent de l'hydrogène à partir d'énergies fossiles, Ces techniques permettent presque une production réelle La demande en hydrogène 24 plus précisément, en 2015, était de l'hydrogène Elle produit 48% de gaz naturel, 30 % de pétrole et 18% de de charbon . (Megía et al. 2021)

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus se présente dans l'apparition de CO₂ comme sous produit ce qui peut présenter des avantages économiques mais pas très écologiques. (Bekhtaoui et al.2022)

I.5.2.Production d'hydrogène par vaporéformage de gaz naturel:

Le procédé de reformage à la vapeur repose sur la conversion d'hydrocarbures en gaz de synthèse par réaction avec de la vapeur, en présence d'un catalyseur à base de nickel, à très haute température (840 à 950 degrés Celsius) et à pression modérée (20 à 30 bar).En raison des réactions impliquées dans ce processus, du dioxyde de carbone se forme

en plus de l'eau et du méthane, ($H_2 + CO + CO_2 + CH_4 + H_2O$) ainsi que des hydrocarbures résiduels.

Le reformage à la vapeur se fait généralement à partir de gaz naturel, et il peut être à partir de méthane ou de naphta, selon la nature des hydrocarbures utilisés, qui sont appelés charge de vapeur, et la pureté de l'hydrogène nécessaire, il existe différents procédés.

Le gaz naturel se compose principalement de méthane, mais il transporte une proportion de CO_2 et de soufre. Au cours de ce processus, les éléments soufre et CO_2 doivent être éliminés. Le processus de reformage à la vapeur est divisé en deux réactions. La première est l'interaction du méthane avec l'eau qui produit du dioxyde de carbone et de l'hydrogène, et le second est une réaction entre l'eau et le dioxyde de carbone. (OUAGUENI 2021)

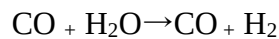
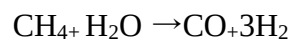


Figure suivant montre plus du processus:

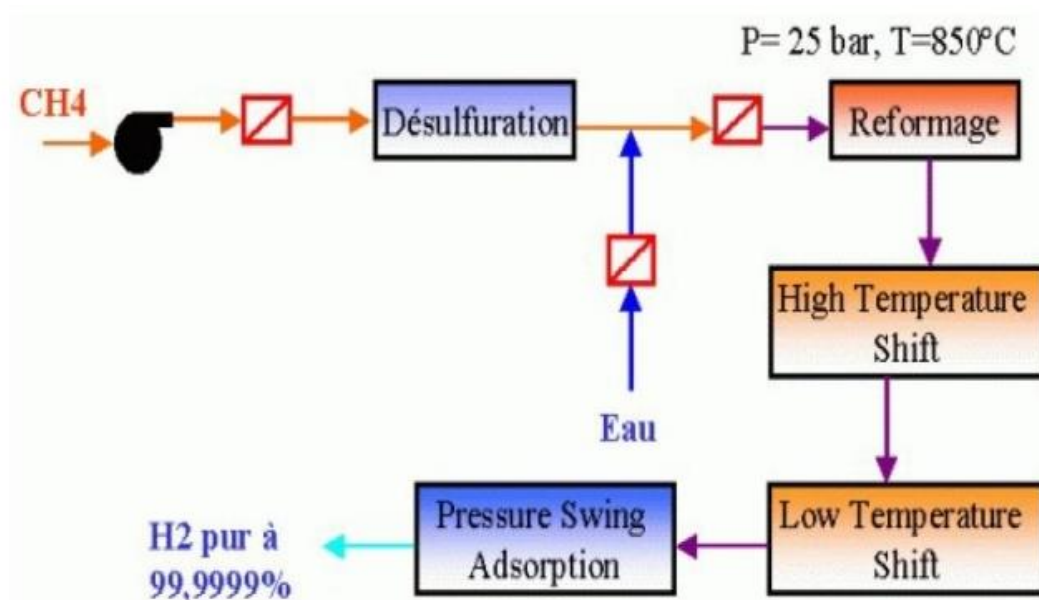
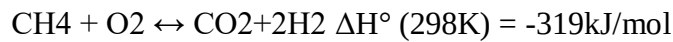
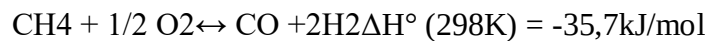


Figure I.2 : Production d'hydrogène par vapo-reformage (Mehdaoui et Kabouch 2017)

I.5.3. L'oxydation partielle:

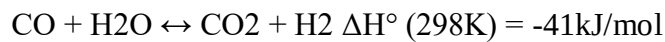
On peut synthétiser l'hydrogène par l'oxydation des hydrocarbures en présence d'air ou d'oxygène pur, cette procédure appelée l'oxydation partielle qui est également un processus de production maîtrisé.

Dans le cas du méthane l'oxydation partielle de ce dernier peut être décrite par les Equations suivantes :

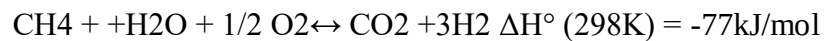


Ces types des réactions sont exothermiques et se déroulent (en général) sans catalyseur.

Mais l'oxydation partielle du gaz naturel qui est composé essentiellement de méthane subit aux deux réactions suivantes:



Le bilan des deux réactions est :



La première réaction est exothermique et se caractérise par un rapport H₂/CO de l'ordre de 2 et la deuxième réaction est également exothermique et presque complète.

Pour le bilan des deux réactions, le rendement massique maximal en hydrogène par rapport au méthane est de : $6/16 = 0,375$ ou 37,5% . (N et Khaled 2017)

I.5.4. Le reformage autotherme:

L'idée de base du reformage autothermique du méthane (ATR) consiste à utiliser l'énergie libérée par la réaction exothermique d'oxydation du méthane pour favoriser la réaction de reformage, fortement endothermique .

La Figure I.5 présente le schéma d'un réacteur ATR. Le gaz naturel et le dioxygène sont préchauffés et mélangés à de la vapeur d'eau. Les deux flux gazeux résultants (CH₄+H₂O et O₂+H₂O) sont injectés de manière séparée par le haut de la chambre et par-

viennent dans la zone supérieure du réacteur où le méthane réagit majoritairement avec O_2 , via des réactions d'oxydation partielle. Lorsque tout le dioxygène a été consommé les réactions de reformage du méthane en présence d'eau deviennent majoritaires. La réaction de water-gas shift (WGS) a lieu également, ainsi que des réactions de pyrolyse mettant en jeu des hydrocarbonés plus lourds. Dans la partie inférieure du réacteur, ces réactions sont favorisées par la présence d'un lit catalytique au nickel, afin d'obtenir en sortie de réacteur des propriétés proches de l'équilibre thermodynamique. La partie supérieure du lit catalytique étant soumise à des températures de gaz très élevées, comprises entre 1400 K et 1700 K, le choix du catalyseur requiert la plus grande attention et fait l'objet d'intenses travaux de recherche. Comme cela va être présenté par la suite, l'objectif de cette thèse est justement de permettre une meilleure caractérisation des propriétés des gaz avant leur entrée dans le lit catalytique. (Caudal 2013)

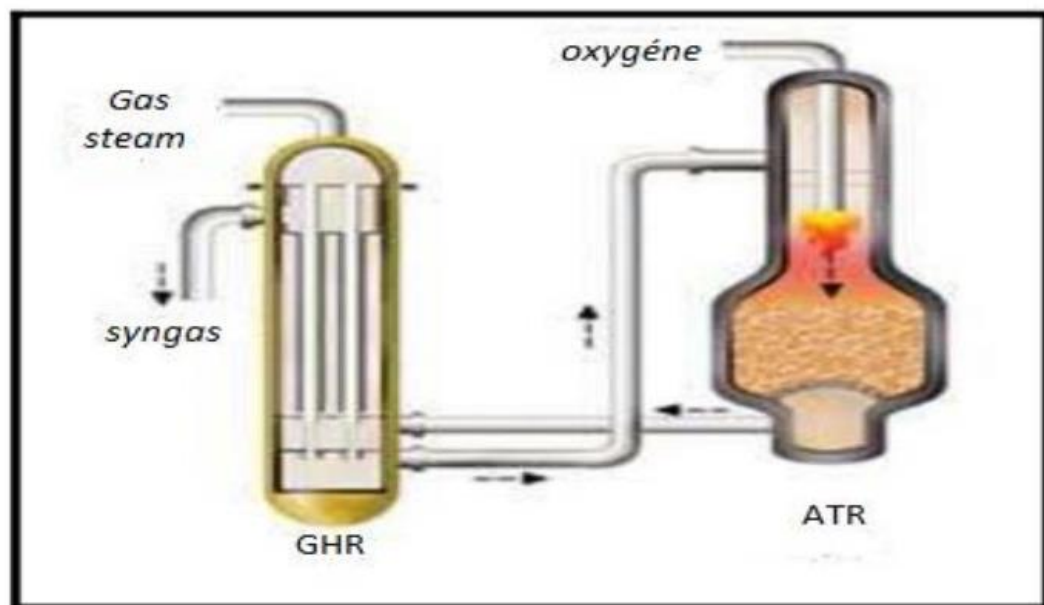


Figure I.3 : Procédé de reformage auto thermique (Caudal 2013)

1.5.5 Production Par électrolyse de l'eau:

La production d'hydrogène par la technique d'électrolyse est actuellement très intéressante, car elle utilise une source d'énergie non productrice de gaz à effet de serre << énergie renouvelable ». De plus, elle reste la technique de base pour fournir aux

applications qui exigent de petits volumes d'hydrogène de grande pureté, notamment l'industrie des semi-conducteurs et de l'alimentaire.

Ce processus repose sur la dissociation de la molécule d'eau en ses deux éléments Constitutifs. " H₂ et O₂ " par l'effet de l'énergie électrique . (2018 دودي و مومن بكوش)

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions superoxydes O₂. Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont en fonction du type d'électrolyte :

Electrolyte à conduction d'ions superoxydes:

À l'anode: $2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

À la cathode: $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-} + 2\text{H}_2$

Electrolyte à conduction protonique:

À l'anode: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

À la cathode: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$

La chaleur requise pour chauffer l'eau augmente, il faut donc coupler le cycle de'eau avec une source de chaleur. C'est ici que le nucléaire dit de 4eme génération pourrait intervenir, puisqu'il permettrait de fournir à la fois l'électricité et la chaleur requise. Néanmoins on peut utiliser de l'électricité venant d'autres sources; dans ce cas l'eau est amenée dans l'électrolyseur à une température inférieure à celle requise mais y est réchauffée par l'énergie dissipée par effet Joule, ce fonctionnement est dit auto thermique. L'électrolyse à haute température s'effectue dans une gamme de températures comprises entre 700 et 1000°C. La tension d'une cellule varie entre 0.8 et 0.9 V à courant nul. Au niveau du cœur de l'électrolyseur; le rendement énergétique est de l'ordre de 80 à 90% . (Hassiba et Abba 2017).

Le schéma suivant montre le principe de fonctionnement :

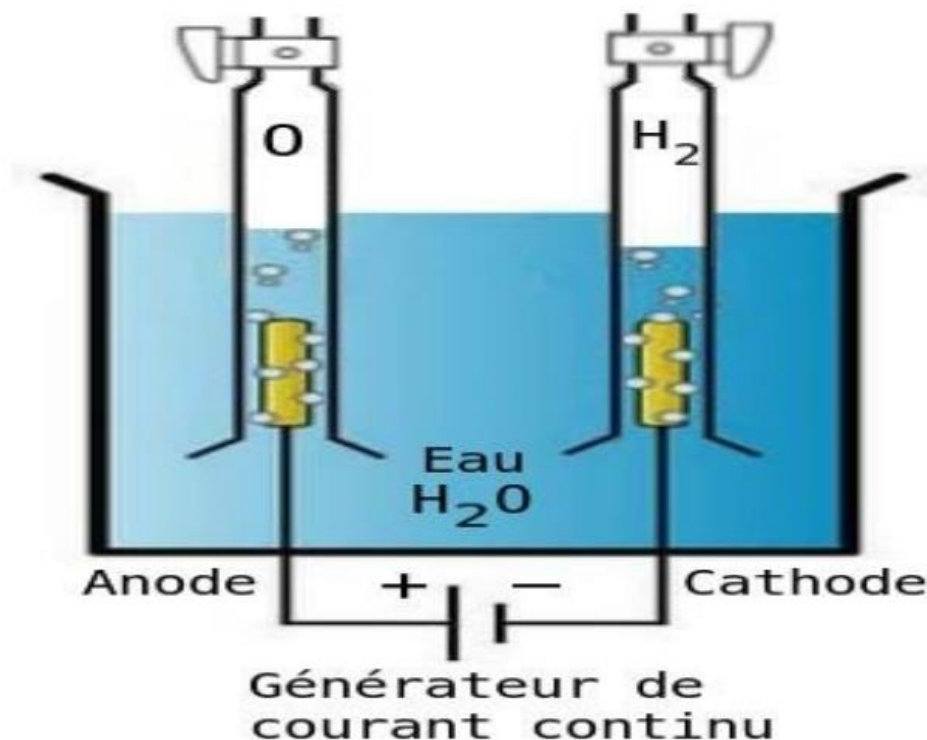


Figure I.4 : Principe d'électrolyse de l'eau (2018 دودي و مومن بكوش)

I.5.6.Procédés photo-électrochimiques:

L'hydrogène gazeux peut-être synthétisé par électrolyse couplé à un module photovoltaïque. De recherches récentes tentent de jumeler ces deux techniques (collecte du courant issu du solaire et l'utiliser en électrolyse) et d'utiliser l'énergie photonique de la radiation solaire pour la décomposition directe de l'eau sans passer par l'étape intermédiaire de production d'électricité. En présence d'un catalyseur, la dissociation de l'eau se fait spontanément grâce à l'énergie solaire. C'est le cas notamment avec des photocatalyseurs bien connus comme le dioxyde de titane TiO_2 . (Mehdaoui et Kabouch 2017)

Les recherches menées actuellement portent sur l'optimisation de ces photocatalyseurs. En effet, le rendement de la réaction est conditionné par l'absorption de la lumière, or seule une partie du spectre est absorbé par le dioxyde de titane. Le rendement de procédé photo-électrochimique est d'environ 12.4 % par rapport au

rayonnement solaire incident. Des recherches sont en cours afin de développer des semi-conducteurs plus performants. Comme il existe d'autres méthodes qui reposent sur les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'hydraulique, la géothermie, l'énergie des vagues etc. (Asseli 2018)

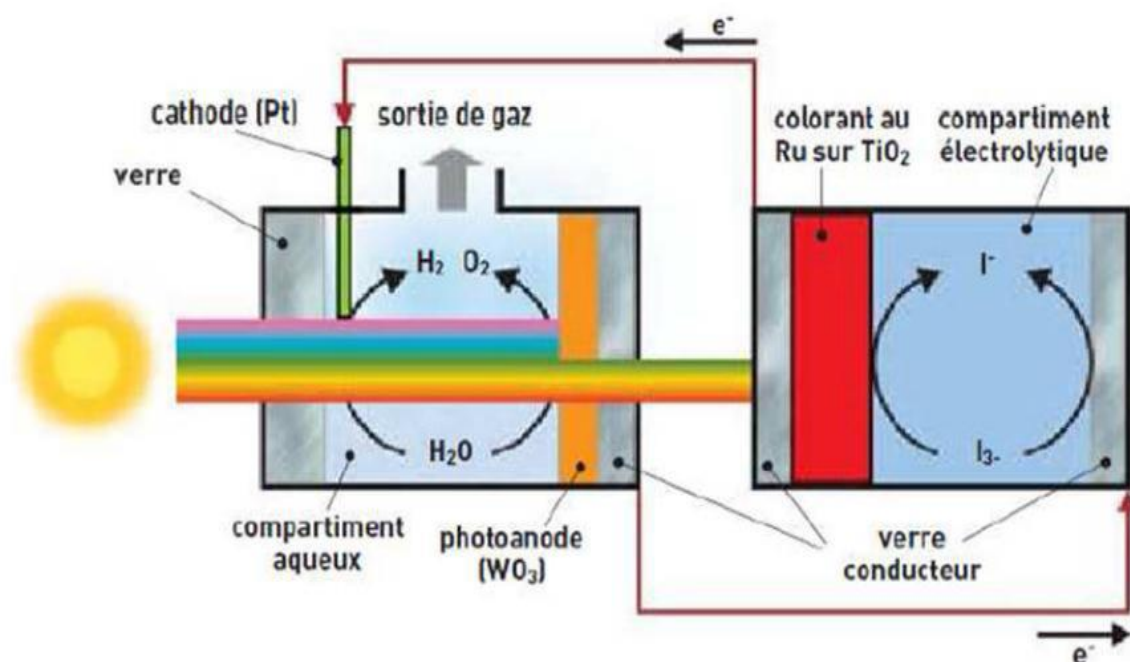


Figure I.5: Procédés photo-électrochimiques (Mehdaoui et Kabouch 2017)

I.5.7. Production d'hydrogène par nucléaire:

Des recherches intensives sur l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'hydrogène ont commencé en 1960-s'en Académie des sciences de l'Union soviétique .

Institut de l'énergie atomique na. LV. Kurchatov (NRC "Kurchatov Institute") était en charge de la politique scientifique et technique concernant cette recherche et finalement il a été proposé d'utiliser la technologie des réacteurs refroidis au gaz à haute température (HTGR) pour la production d'hydrogène à grande échelle. L'académicien chef de projet A.P. Alexandrov a écrit en 1978: «Développement de l'énergie nucléaire à grande échelle (pour la production d'électricité et de chaleur pour l'industrie et le chauffage municipal, l'approvisionnement en chaleur et en électricité du métal et sa production de réducteurs, l'approvisionnement en chaleur et en électricité de nombreux types de production chimique ...) contribuera à remplacer le charbon qui est plus cher et à économiser le pétrole et le gaz. Peut-être qu'un pourcentage considérable de véhicules autonomes

consommara de l'hydrogène d'origine centrale comme carburant sans danger pour l'environnement. La production d'hydrogène bon marché est l'une des perspectives majeures de l'énergie nucléaire » .

Cette tâche reste également pertinente aujourd'hui. Par conséquent, la mission de HTGR consiste en ce qui suit :

- ✓ Élargissement de l'application de l'énergie nucléaire à des usages non électriques .
- ✓ Production à grande échelle d'hydrogène comme source d'énergie pour les transports, sources d'énergie autonomes et portables et agent chimique pour l'industrie .
- ✓ Économie d'énergies fossiles pour la fabrication de produits à haute valeur ajoutée avec l'utilisation de l'hydrogène .
- ✓ Mise en place de cycles thermodynamiques de production d'électricité à haut rendement avec la utilisation du chauffage à haute température. (Petrinin, Marov, et Kodochigov 2020)

En outre, au total, six nouvelles technologies de réacteur sont à l'étude : un réacteur refroidi avec de l'eau supercritique, un réacteur à neutrons rapides à refroidissement avec au choix sodium liquide ou alliage de plomb liquide (Figure 1.8(a)), un réacteur à gaz à très haute température et un réacteur à sels fondus (Inel, 2010). Le CEA a choisi de retenir en particulier le réacteur à gaz à haute température (1100°C), noté VHTR (Figure 1.8(b)) . Le haut niveau de température permet la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. S'agissant du Japon et des USA, ils se tournent plutôt vers le réacteur à refroidissement a sodium liquide. Néanmoins, cette technologie ne serait commercialement disponible que vers 2030-2040. Quant au projet ITER de fusion nucléaire également productrice d'hydrogène, ses retombées ne sont attendues que pour la fin du siècle

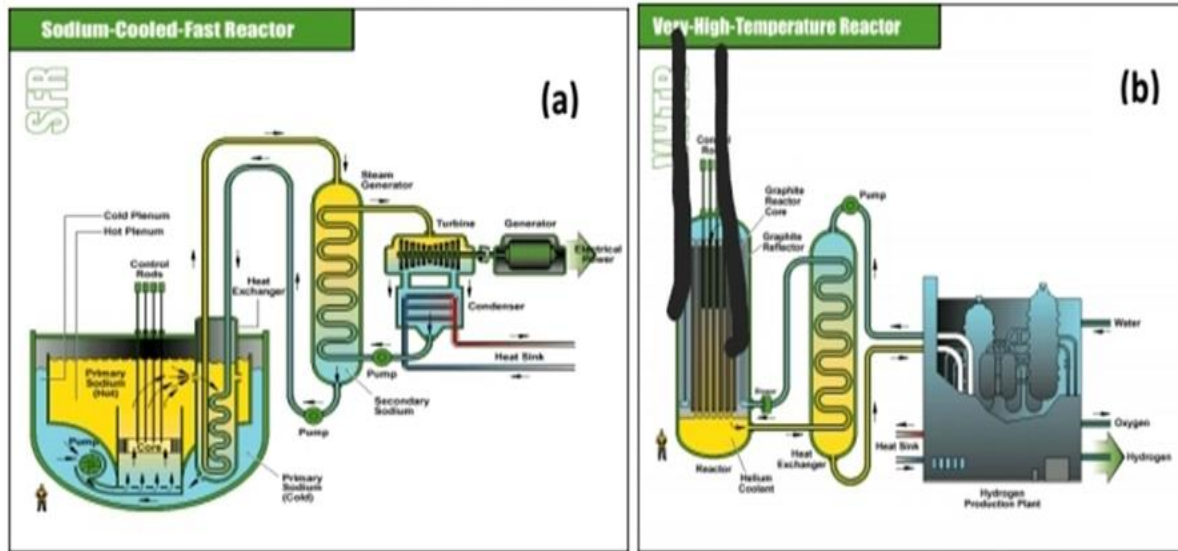


Figure I.6: Réacteurs nucléaire pour la production de l'hydrogène

(a) Réacteur à refroidissement au sodium liquide (Inel, 2010) .

(b) Réacteur à gaz à haute température (Hajjaji 2011) .

I.5.8. Production d'hydrogène par biomasse :

La biomasse est une variété d'organismes biologiques dérivés de matériaux naturels et non fossiles synthétisés par photosynthèse. Il comprend les plantes, les animaux et les micro-organismes ainsi que leurs déchets associés. La biomasse fait également référence aux déchets générés par les activités agricoles et forestières, tels que les résidus agricoles, les résidus forestiers, les cultures énergétiques, les déchets agro-industriels et les déchets municipaux .

La biomasse est une ressource renouvelable à base de carbone avec de larges distributions et espèces, qui ne nécessite pas de conditions strictes et croît régulièrement dans l'environnement. La biomasse apparaît comme une source importante d'énergie renouvelable à la place de l'énergie fossile pour Le principal moyen de produire de l'hydrogène à partir de la biomasse est les voies thermochimiques (**Figure I.9**) qui incluent la gazéification à la vapeur, la gazéification de l'eau supercritique et la pyrolyse rapide Par rapport à la pyrolyse, la gazéification est reconnue comme plus prometteuse dans la production industrielle en raison de leur efficacité et rendement en H_2 . (Cao et al. 2020)

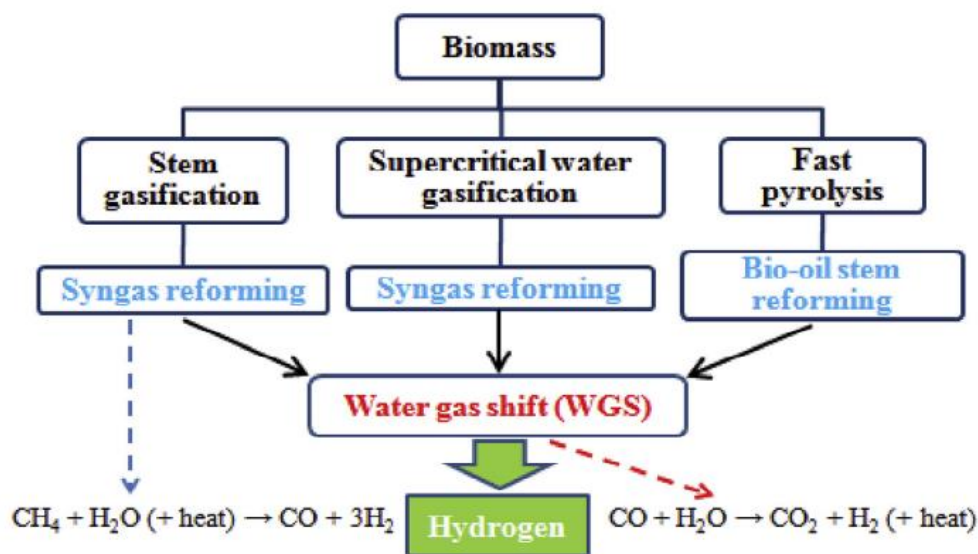


Figure I.7 Principales voies des procédés thermochimiques pour la production de H₂ à partir de la biomasse. (Cao et al. 2020)

I.6. Transport de l'hydrogène:

L'émergence de systèmes de transport de l'énergie de l'hydrogène est une partie primordiale de la réussite économique de l'hydrogène. La partie de transport jouera le rôle entraîné dans la construction d'un marché de l'hydrogène dans des territoires différents. Il facilitera le transport de l'hydrogène en base territoriale et entre les différents territoires. ont indiqué que le choix du mode le plus bas coût de livraison (camions à gaz comprimé, camions liquides cryogéniques ou gazoducs) dépend des caractéristiques géographiques et des marchés spécifiques (par exemple, la population de la ville et de rayon, densité de population, la taille et le nombre des stations de ravitaillement et la pénétration du marché des véhicules à pile à combustible). Selon de nombreux auteurs, les principaux facteurs qui influent sur le choix du mode de transport de l'hydrogène sont l'application, la quantité à transporter, la densité de la demande, et la distance entre le site de production les points de livraison (Tasaltin 2008). Méthodes de distribution possible sont les suivantes :

I.6.1. Pipeline:

dans de nombreux cas, l'hydrogène doit être transporté sur de longues distances depuis le site de stockage. Au cours des dernières années, le transport de l'hydrogène par pipeline a été considéré principalement comme un élément intégral et significatif du système des énergies renouvelables. D'autre part, l'utilisation industrielle de l'hydrogène

est très répandue, où la production d'hydrogène est étroitement associée à des procédés technologiques spécifiques. L'hydrogène est transporté par des canalisations de diamètres et de longueurs variés, selon la manière dont l'hydrogène sera utilisé. Le transport par pipeline est l'une des méthodes les moins chères pour transporter de grandes quantités d'hydrogène. Des pipelines pour le transport d'hydrogène sur de longues distances existent dans quelques endroits du monde, avec une longueur totale de 4500 km .

L'hydrogène est généralement considéré comme un gaz similaire au méthane (c'est-à-dire le principal composant du gaz naturel). Par conséquent, la plupart des exigences technologiques pour les conduites de transport d'hydrogène sont identiques à celles des conduites de gaz naturel, avec certaines modifications concernant la sécurité, l'infrastructure et les matériaux. Ces conditions doivent être remplies avant que le transport de l'hydrogène ne soit initié à travers un réseau de canalisations. L'hydrogène a son ensemble spécifique de propriétés physiques et chimiques qui rendent le transport par pipeline de ce gaz très différent de celui du gaz naturel. En raison des propriétés physico-chimiques, le transport par pipeline d'hydrogène est beaucoup plus difficile que le gaz naturel. Même l'hydrogène comprimé ne peut fournir qu'environ un tiers de l'énergie par rapport au méthane par unité de volume. Les réseaux de transport et de distribution de gaz naturel sont très bien développés ; par conséquent, le système de canalisation d'hydrogène est directement comparé au système de transport de gaz naturel. (Kuczyński et al. 2019)

I.6.2.Rail:

L'hydrogène est transporté par rail, sous forme liquide, dans des réservoirs cylindriques comme ceux utilisés dans le transport par camion. Ce processus est à moyenne et grande échelle, et est encore en cours de développement. Typiquement, un chariot a une charge utile allant jusqu'à 8000 kg. Cette méthode est assez économique. Pour les fortes sollicitations et les distances moyennes, bien qu'elle perde une partie de l'énergie transférée (évaporation de l'hydrogène), ce n'est probablement pas le choix idéal pour le transport de l'hydrogène. (Hren et al. 2023)

I.6.3. Navire:

Le transport intercontinental d'hydrogène s'effectuera sous forme liquide en utilisant des navires. À cette fin, des navires spécialisés dotés de citernes et d'installations portuaires appropriées sont en cours de conception. Le transport d'hydrogène gazeux par bateau n'est économiquement pas réalisable car la quantité transportée est faible par

rapport à la zone de couverture du navire. Cependant, certains futurs navires-citernes d'hydrogène à grande échelle ont été étudiés en détail dans le cadre du Programme de recherche du World Energy Network. (Nadjia 2020)

I.6.4.Camion:

L'une des méthodes les plus couramment utilisées actuellement pour transporter l'hydrogène est le camion. Il peut être transporté dans des bouteilles à haute pression ou des remorques tubulaires et sous forme liquide dans des réservoirs de réfrigération. Ce mode de transport est le plus économique. Les camions-citernes peuvent transporter des quantités d'hydrogène, pour atteindre ces Quantités vers des marchés situés dans de vastes zones géographiques Des camions de 40 tonnes transportent 3500 kg d'hydrogène liquide Le problème avec le transport d'hydrogène liquide via ces camions est le coût des exigences d'isolation spécialisées et le coût de pompage et de refroidissement de l'hydrogène hydrogène liquide en cours de route. (Djilali 2021)

I.7.Stockage de l'hydrogène:

Le but du stockage de l'énergie hydrogène Pour être sûr et efficace, et pour être utilisé n'importe où et n'importe quand. dans ce Forme pure, le type de stockage d'hydrogène change en fonction La quantité d'hydrogène à stocker et la durée de stockage (Tarhan et Çil 2021) Nous mentionnons qu'il existe trois types de stockage d'hydrogène, qui sont les suivants :

I.7.1 .Stockage gazeux:

La manière la plus courante de stocker l'hydrogène dans le monde aujourd'hui est de le stocker sous forme de gaz, en utilisant deux types de pression, basse et moyenne, pas plus de 200 bar, ou très haute pression de 350 à 700 bar, qui consiste à utiliser des microsphères en verre ou des petites bouteilles de 10 l et jusqu'à de grands réservoirs de 10000 l . La technique de stockage la plus développée à ce jour est la compression de l'hydrogène à haute pression (allant jusqu'à 700 bar). Les bonbonnes utilisées comme réservoirs sont principalement composées de matériaux composites à base de fibre de carbone. Le principal défaut du stockage de l'hydrogène gazeux réside dans sa faible densité volumique énergétique . Ce désavantage vient contre balancer la forte densité massique énergétique que présente l'hydrogène. Les dépenses énergétiques nécessaires

pour la compression sont également très importantes, utilisant de 10 à 25 % du contenu énergétique du gaz. (Djaballah et Denaguir 2019)

Les deux figures suivantes montrent deux réservoirs, d'hydrogène sous deux pressions différentes :



Figure I.8 : Réservoir adapté l'hydrogène gaz, 5%, masse H₂/ système 32 L/350 bar. (2005)



Figure I.9: Réservoir adapté l'hydrogène gaz, 5%, masse H₂/ système 32 L/700 bar. (2012)
(Daoui et Bouzid 2017)

I.7.2. Stockage liquide:

La méthode de stockage de l'hydrogène sous sa forme liquide est l'une des solutions importantes dans ce domaine, nécessitant une grande énergie de refroidissement fournie par des réservoirs cryogéniques performants (Fig.I.12) pour atteindre une température de liquéfaction très basse de -253 degrés Celsius (20 Kelvin). Cette technologie est maîtrisée notamment pour des applications spatiales ou de stockage stationnaire comme les stations de service. Le volume de stockage est faible et nécessite une grande dépense d'énergie pour faire la liquéfaction, Le principal inconvénient de cette technique est la température.

L'hydrogène stocké dans des réservoirs avec deux parois séparées par des vides et des espaces d'isolations pour éviter les pertes thermiques par convection et pour bien

limiter les échanges de chaleur. Ce mode de stockage a une capacité volumique deux à trois fois supérieure à celle de stockage gazeux. (Bouchear et Bellet 2021)

I.7.3.Stockage solide:

le stockage de l'hydrogène sous forme solide a récemment suscité un intérêt considérable. L'identification et le développement de systèmes de stockage d'hydrogène à l'état solide, légers et peu coûteux, à haute capacité et à cinétique rapide, permettent de contourner les difficultés des applications embarquées. Dans les recherches en cours sur le stockage à l'état solide, les matériaux nano poreux tels que les nanomatériaux à base de carbone, les nanomatériaux à base de carbone dopés au métal, les MOFS, les cadres organiques covalents, les hydrures chimiques complexes, les clathrates, les amides, les zéolithes et les matériaux métalliques ou intermétalliques les hydrures sont considérés comme des matériaux prometteurs pour le stockage futur de l'hydrogène. Ces nouveaux nanomatériaux pourraient faciliter le stockage de l'hydrogène sous forme solide par chimisorption (lorsque la formation d'hydrures avec des énergies de liaison de 50 à 100 kJ/mol) ou physisorption (adsorption sur des matériaux poreux avec une énergie de liaison de 10 kJ/mol) dans diverses conditions. une cinétique lente et une mauvaise réversibilité accompagnent Ces procédés présentent plusieurs avantages par rapport au stockage d'hydrogène conventionnel en termes de sécurité et de rentabilité. Cependant, ils possèdent également leurs propres inconvénients : une chimisorption à haute énergie, alors que des températures basses (cryogéniques) sont nécessaires pour une absorption raisonnable par physisorption. La physisorption joue un rôle essentiel dans les nanomatériaux à base de carbone et les MOFS pour le stockage de l'hydrogène, tandis que la chimisorption est principalement impliquée avec les hydrures métalliques et les hydrures complexes. (Boateng et Chen 2020)

I.8.hydrogène en termes de sécurité:

Une fois l'hydrogène produit et stocké, il est transporté jusqu'à l'utilisateur final, des sites de production aux sites de stockage jusqu'à la destination de la demande. Le processus de livraison et de réception s'accompagne de nouveaux risques, dus aux propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène, et il ne sera accepté par les consommateurs que s'ils sont sûrs de sa sécurité, en plus de cela Qu'en cas du moindre accident dû à l'hydrogène, il affectera

la perception et la croyance du public (consommateurs), et donc il est possible qu'après cela la transmission de cette énergie sera stoppée .

L'hydrogène se caractérise par un taux de fuite plus important par rapport à d'autres gaz inflammables à la même pression et à la même température. En raison de sa très faible viscosité, il existe d'autres aspects qui posent des questions plus sérieuses et importantes telles que l'inflammabilité et la faible énergie d'inflammation..., il contient une large gamme d'inflammabilité(4-75%) et de potentiel explosif (13-65%), de plus l'inflammabilité de l'hydrogène rayonne très peu et est presque invisible à la lumière du jour. (Djilali 2021)

Sa température d'auto-inflammation est relativement basse, atteignant 585 degrés Celsius, sa vitesse de combustion est environ 7 fois plus rapide que le méthane et son coefficient de diffusion dans l'air est élevé .

Les propriétés de l'hydrogène rendent les mesures de sécurité très importantes, telles que les technologies de détection de l'hydrogène et de mesure de sa concentration, en particulier en cas de fuite accidentelle, car l'hydrogène gazeux n'a pas de couleur, d'odeur et de goût qui ne peuvent être remarqués par les sens humains. (Abohamzeh et al. 2021)

I.9.Véhicule à hydrogène:

Le développement d'un aspect important du véhicule à pile à combustible, le moteur électrique, remonte au début du 19e siècle. le ravitaillement en carburant et l'exigence réduite d'une capacité d'autonomie élevée entre les pleins. Des essais d'autobus à moteur FC ont eu lieu à Vancouver et à Chicago, ainsi que dans d'autres villes d'Europe et d'Amérique du Nord. En juillet 2005, le premier véhicule FC a été loué à une famille en Californie comme une étape importante dans l'augmentation du nombre de véhicules à pile à combustible sur la route. Cependant, de nombreux obstacles restent à surmonter avant que le véhicule FC puisse devenir un moyen de transport courant. Un problème évident est le besoin d'une infrastructure hydrogène pour permettre le ravitaillement des véhicules. Des stations-service à hydrogène existent actuellement dans de nombreux pays du monde, tels que le Canada, les États- Unis, l'Islande, le Japon, Singapour et l'Allemagne. Bien que ces stations ne soient actuellement pas suffisamment répandues pour permettre à un grand nombre de personnes de commencer à conduire des FCV, on s'attend à ce que davantage d'infrastructures d'hydrogène soient construites à mesure que de plus en plus de FCV deviennent disponibles dans le commerce. Les FCV hydrogène ont beaucoup évolué;

actuellement, ils peuvent parcourir entre 311 et 597 miles avec un réservoir plein. Le développement de ces véhicules s'accélère, mais ils nécessitent encore des améliorations importantes . (Manoharan et al. 2019)

I.9.1.Principe de fonctionnement

I.9.1.1 Moteur à hydrogène :

Moteurs thermiques ou moteurs à combustion interne ou à explosion, alimentés par la combustion (pétrole léger, alcool, gazole, gaz de houille ou gaz naturel, distillats lourds de pétrole, fermentation de matières organiques) sans grande modification, tous ces moteurs à combustion peuvent fonctionner à l'hydrogène carburant produire de l'énergie mécanique en ne dégageant que de la vapeur d'eau et quelques oxydes d'azote .

La capacité du moteur à hydrogène à combustion interne à fonctionner avec de très faibles émissions résulte de deux caractéristiques :

- ✓ Les oxydes d'azotes (NO_x) sont les seules émissions indésirables produites par ce moteur, elles proviennent de l'oxydation de l'azote atmosphérique de l'air lors de la combustion .
- ✓ La faible limite d'inflammabilité de l'hydrogène permet une combustion stable, même en conditions diluées . (Belhouchette et Merzoug 2019)

I.9.1.2. La pile à combustible :

I.9.1.2.1 Différents types de piles à combustible :

- ✓ La pile alcaline, pile AFC (Alkaline Fuel Cell) .
- ✓ La pile à combustible à membrane échangeuse de protons, pile PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) .
- ✓ La pile à méthanol, pile DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell) .
- ✓ La pile à acide phosphorique, pile PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) .
- ✓ La pile à carbonate fondu, pile MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) .
- ✓ La pile à oxyde solide, pile SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). (Benyahia 2014)

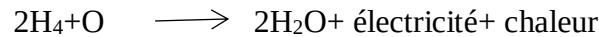
I.9.1.2.2 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible:

La pile à combustible fonctionne en utilisant plusieurs types de combustibles et d'oxydants. L'hydrogène a été découvert comme le plus efficace des combustibles, car il contient une réaction électrochimique plus élevée que d'autres combustibles, tels que les

hydrocarbures et les alcools, où l'oxygène joue le rôle d'un oxydant, en raison de sa grande réactivité et de son abondance dans l'air.

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est une relation entre deux produits chimiques et une réaction chimique appelée oxydation photoélectrique.

L'hydrogène et l'oxygène interagissent pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Nous exprimons cela dans la réaction chimique générale suivante :

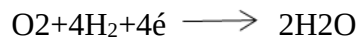


Cette réaction a lieu à l'intérieur d'une structure composée principalement de deux électrodes (l'anode et la cathode), qui sont des conducteurs électroniques séparés par un électrolyte solide qui sera le conducteur protéique. Nous exprimons les interactions qui se produisent aux électrodes comme suit : (Benzerrouk et Alliche 2013)

A l'anode : couple H^+/H_2 (électrolyte acide)



A la cathode: couple $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$



Les réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) ont lieu au niveau de l'interface électrolyte/électrode, en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés points triples.

La pile à combustible produit une tension d'environ 0,7 à 0,8 volts par cellule, selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur, sa température de fonctionnement est de 60 à 200 degrés Celsius et selon le modèle, et l'eau est évacuée dans la forme de vapeur avec un excès d'oxygène.

Pour fonctionner correctement, une pile à combustible a besoin de circuits auxiliaires comme un circuit de refroidissement, d'hydratation des gaz, de contrôle de pression (absolue et différentielle) des gaz et autres circuits de sécurité. (Babaali, Benchidi, et Sofi 2022)

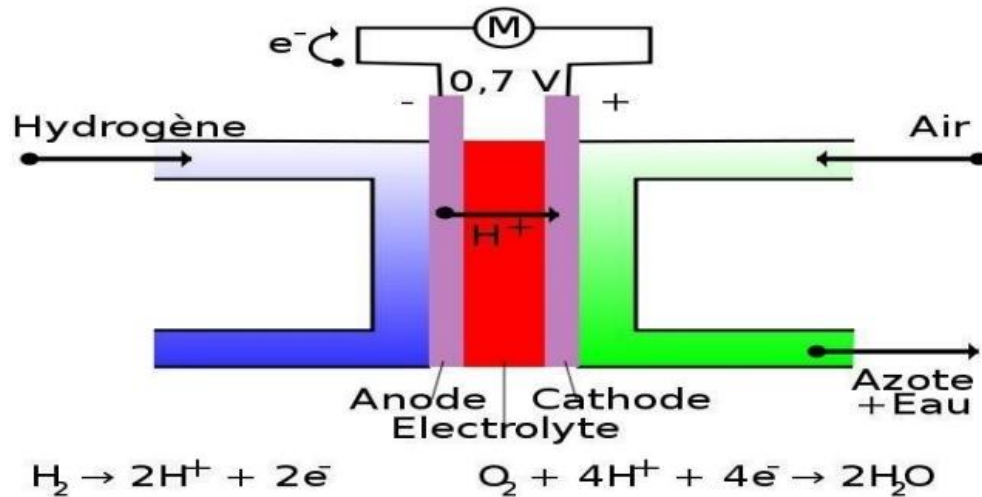


Figure I.10 Schéma de fonctionnement de la pile à combustible (Manoharan et al. 2019)

I.9.1.2.3 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible:

Les piles à la production d'énergie bonne solution pour Électrique en raison de ses nombreux avantages :

- ✓ Les voitures qui utilisent une pile à hydrogène sont plus silencieuses que l'essence, le diesel, etc .
- ✓ Faible pollution de l'environnement Les émissions émises par un véhicule équipé d'une pile à combustible sont quasiment nulles .En effet, le système lui-même n'émet pas de dioxyde de carbone mais est en cours de fabrication. Toute la pollution émise sera inférieure à 97% inférieur à celui des voitures à essence conventionnelles .
- ✓ Bon rendement et puissance électrique considérable .
- ✓ Fiabilité et durée de vie Aujourd'hui, nous n'avons pas encore assez de recul sur la fiabilité des systèmes à PAC, mais une enquête d'experts, parue sur le site "European Commission Mobility & Transport " , souligne que 400 véhicules roulent actuellement dans le monde, qu'ils ont parcouru 15 millions de km et ont effectué sans problème 80000 pleins Cependant, les piles à combustible présentent des inconvénients :
- ✓ La pile à combustible utilise le platine comme catalyseur, qui est un métal très rare et cher, il faut donc essayer de le remplacer par un métal moins cher .

- ✓ Gestion thermique du module : Le module pile à combustible doit encore être intégré au reste du système. Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile. Donc cela impose de la coupler à un système de refroidissement efficace. Pour les applications stationnaires, il s'agit de valoriser au maximum la chaleur sans pour autant devoir mettre de nombreux échangeurs de chaleur .
- ✓ Il existe des idées préconçues sur l'hydrogène danger d'explosion, inflammabilité. En fait, l'hydrogène n'est pas plus dangereux que n'importe quel autre carburant, tant qu'il est Des précautions sont prises. (Babaali et al. 2022)

I.10 Conclusion:

Dans cette étude, nous avons analysé et décrit l'hydrogène, nous nous sommes familiarisés avec ses propriétés et les différentes technologies liées à ses procédés de production, de distribution et de stockage. Nous avons également vu ses utilisations industrielles. Il a un bel avenir prometteur en tant que carburant alternatif et en tant que un vecteur énergétique dans l'ère post-pétrole, mais n'oubliez pas que comme il a des avantages, il a aussi des inconvénients, qui peuvent être surmontés davantage par la recherche et le développement .

Chapitre II :

L'essence

II.1.Introduction :

L'essence est une fraction d'hydrocarbure légèrement inflammable et un mélange de plusieurs composés dérivés du pétrole par distillation fractionnée atmosphérique. L'essence se compose des fractions C5 à C12 et est couramment utilisée dans divers modes de transport. De plus, l'essence est destinée à être utilisée dans les moteurs à combustion interne à piston (ICE). Cinquante pour cent de l'essence moteur est obtenue à partir du pétrole brut utilisé dans le moteur, principalement pour les moteurs à combustion interne. Il est classé en deux types : l'aviation et l'automobile, selon l'usage . (Abdellatif et al. 2021)

Il est traité par reformage, craquage catalytique... et divers procédés et mélange avec une fraction aromatique, afin d'atteindre un indice d'octane élevé, généralement compris entre les indices d'octane 80 et 100 souhaités. Il existe trois types de gemmes:

L'essence ordinaire se contente d'un mélange de HC de différentes structures (paraffinique, oléfinique, naphténique, aromatique), un agent antidétonant à base de plomb est ajouté. L'efficacité de la combustion se caractérise par un indice d'octane compris entre 89 et 92. **Super est comme l'essence ordinaire** Sa composition diffère de l'essence selon :La teneur enbenzène est comprise entre 4 et 6 % en raison de la faible teneur en plomb ; Teneur en soufre plus élevé (0,5 %). **Le super sans plomb** est remplacé par du plomb. Les additifs utilisés sontle MTBE (methyl tertio butylether), l'additif le plus utilisé, et le benzène, l'additifpour améliorer l'indiced'octane . (Lalaoui et Boukerroui 2015)

$P = 0,72 \text{ à } 0,78 \text{ Kg/dm}^3 \text{ à } 15^\circ\text{C}$; Très volatile (hydrocarbures légers) : $T^\circ \text{ d'ébullition} - 30 \text{ à } 190 \text{ C}^\circ$.

II.2.Les procédés qui donnent l'essence à partir des pétroles bruts :

erétape du raffinage est séparé le pétrole dans des colonnes de distillation atmosphérique et sous vide. Ce fractionnement permet d'obtenir les différentes coupes pétrolières à savoir le gaz, les essences, le gasoil, les huiles...etc .

II.2.1.Distillation :

La distillation est l'une des méthodes de séparation les plus importantes disponibles pour dissoudre un mélange en ses différents composants. Elle est basée sur le fait que la phase vapeur au-dessus et en équilibre avec un liquide bouillant n'a pas la même composition. En combinant séparément, d'une part, le liquide, et d'autre part, la vapeur qui s'est refroidie et condensée, on obtient deux liquides différents que l'on appelle respectivement résidu et

distillat. Ainsi, on réalise une première étape de séparation dont la répétition peut conduire à la possibilité d'obtenir les composants du mélange initial, et il faut rappeler que la distillation est le processus de base du raffinage du pétrole brut. Il en existe plusieurs types, dont la distillation atmosphérique et la distillation sous vide... etc. (Anon s. d.)

La distillation est la séparation par voie physique des divers constituants d'un mélange liquide. La phase vapeur est produite par évaporation en fournissant de la chaleur au système. Elle consiste en l'ébullition d'un mélange liquide suivie d'une condensation de vapeur afin de sortir un liquide pur en tête du procédé de distillation « distillat », ou des fractions liquides plus ou moins riches en constituant du mélange vaporisé au fond du procédé de distillation « résidu » .

Il y aura donc une augmentation en concentration du composé le plus volatil dans le mélange condensé. (SLATNIA Dhiya-eddine 2020)

II.2.1.1. Distillation atmosphérique

Dans la distillation atmosphérique, le brut adouci est chauffé dans une colonne de distillation à échangeur de chaleur sous pression. Si bien que sa température monte à 340-350°C. (2016 بده و دريد). Le minerai est évaporé et séparé en différentes parties par condensation sur 30 à 50 plateaux de fractionnement correspondant chacun à une température de condensation différente. Les fractures plus légères se condensent et s'agrègent vers le haut du puits. Les fractions plus lourdes, qui ne peuvent pas s'évaporer dans la colonne, sont soumises à une séparation supplémentaire dans la deuxième colonne par distillation sous vide. Dans chaque colonne de distillation atmosphérique, il y a quatre courants latéraux ou plus de composants à bas point d'ébullition tirés de la tour à partir de différents plateaux. Les mélanges à bas point d'ébullition sont en équilibre avec les fractions lourdes qui doivent être éliminées. Chaque flux latéral est envoyé dans une petite colonne d'extraction différente. La petite tour de stripage comporte 4 à 10 plateaux avec injection de vapeur sous le plateau inférieur. La vapeur est utilisée pour extraire les ingrédients légers des ingrédients lourds, et la vapeur et les ingrédients extraits sont renvoyés dans la colonne de distillation atmosphérique au-dessus du plateau d'admission latéral correspondant. Les fractions obtenues à partir de la colonne atmosphérique comprennent le naphta, le benzène, le kérosène, le diesel léger, le carburant diesel, le gazole, les distillats lubrifiants et les résidus lourds. La plupart d'entre eux peuvent être vendus sous forme de produits finis ou mélangés avec des produits issus des

processus finaux. (Figure. II.1) Schéma simple d'une colonne de distillation atmosphérique. (Nicholas P. Cheremisinoff 2008)

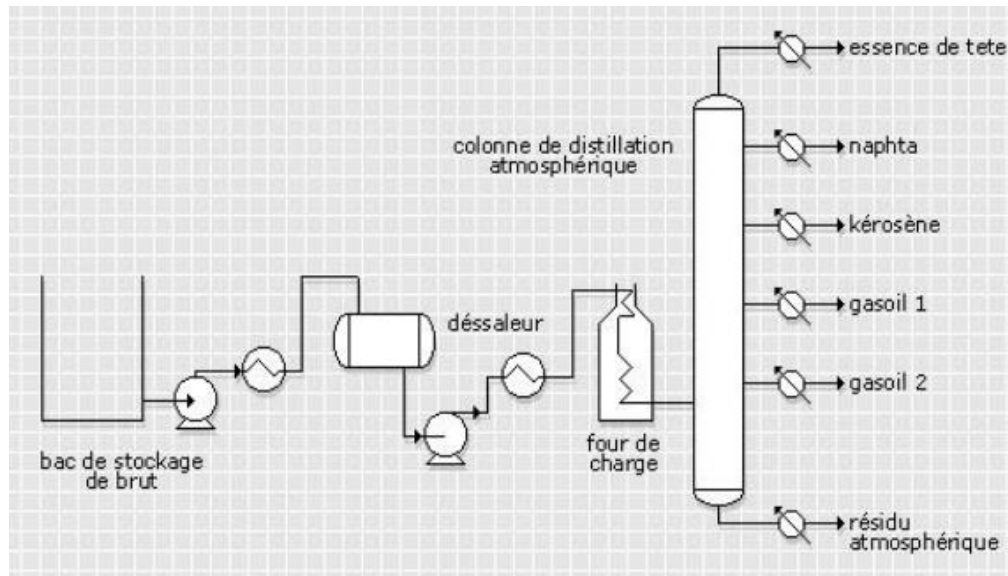


Figure. II.1: Schéma simple d'une colonne de distillation atmosphérique .
(Chellali s. d.)

II.2.1.1.1 Méthodes de distillation du pétrole :

Il existe trois méthodes de distillation atmosphérique. Le choix de ces méthodes est lié à deux types :

- La nature du pétrole brut à traiter.
- Produits à obtenir .

a- distillation atmosphérique dans une seule colonne :

Ce type de schéma est utilisé pour traiter un pétrole brut à faible teneur en fractions légères et peu sulfureuses, afin d'éviter la corrosion de la colonne principale, qui est très coûteuse Figure.II.2 .

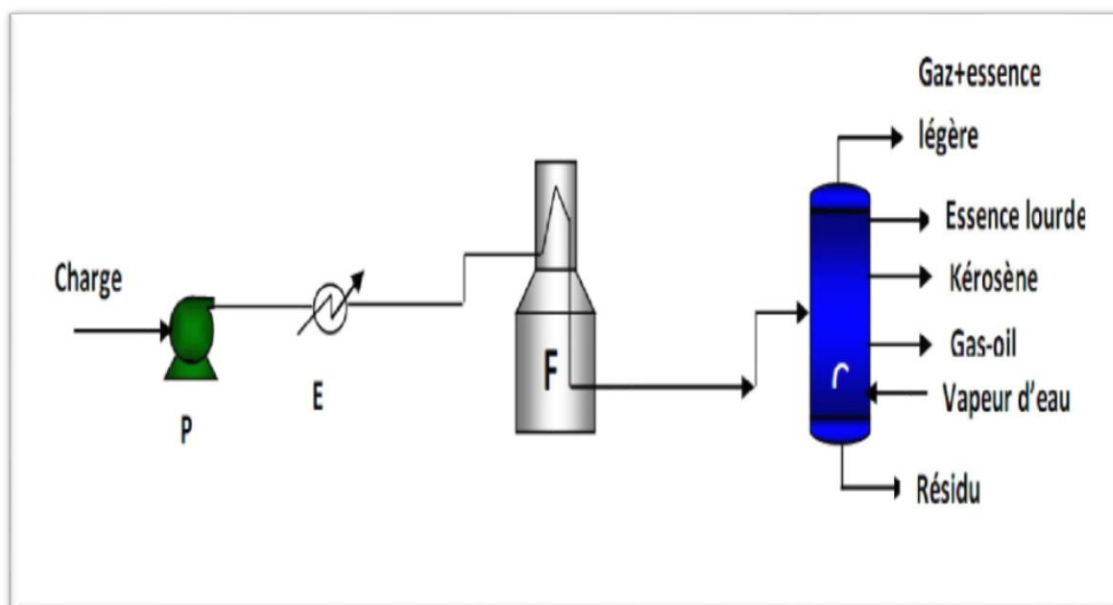


Figure.II.2: schéma de distillation atmosphérique dans une seule colonne. (Dou, Dou, et Retteb 2017)

b-distillation atmosphérique du pétrole avec prédistillation : Ce type de schéma permet de traiter un pétrole brut non stabilisé et sulfureux. (Figure.II.3).

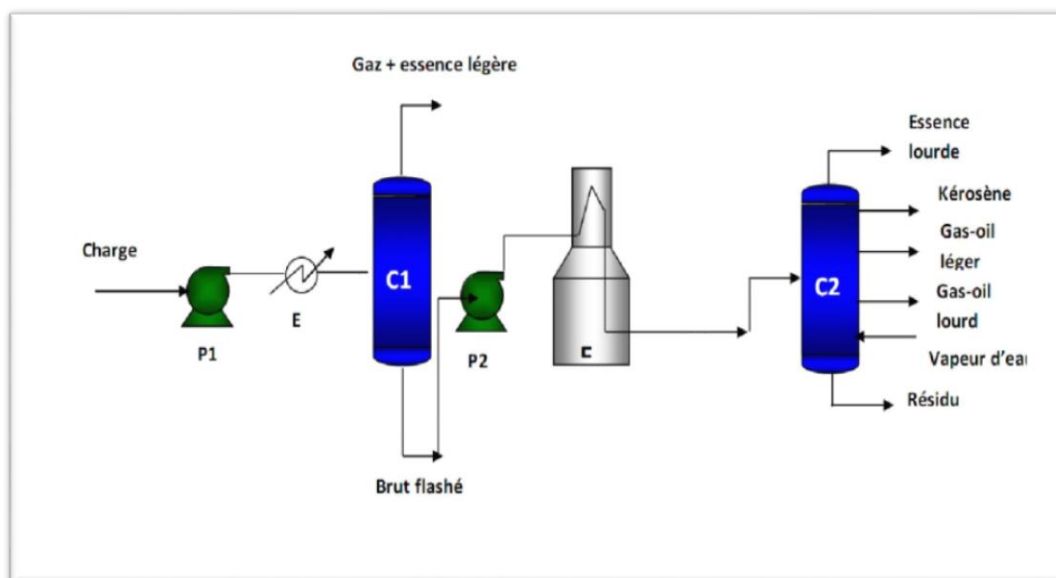


Figure.II.3: schéma de distillation atmosphérique avec une colonne de prédistillation . (Dou, Dou, et Retteb 2017)

c-distillation atmosphérique avec un ballon de flash:

Cette installation consiste à traiter une charge contenant une quantité importante en fractions légères. (Figure.II.4) montre l'installation :

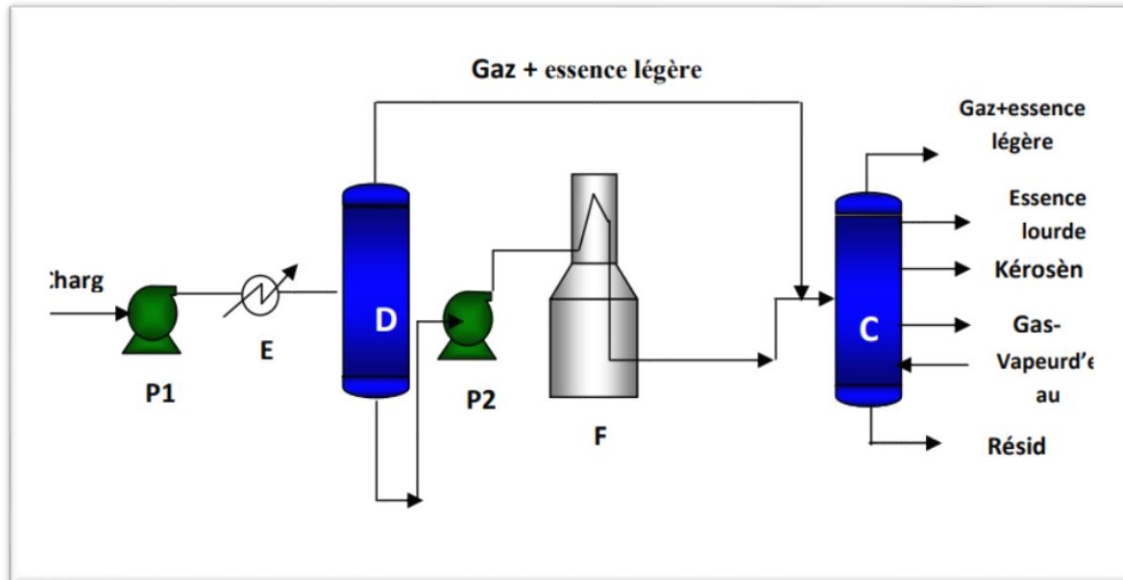


Figure.II.4: Schéma de distillation atmosphérique avec (ballon de flash) . (Dou, Dou, et Retteb 2017)

II.2.1.3 Distillation sous vide:

L'installation de distillation sous vide (DSV) a pour but de séparer le résidu atmosphérique en plusieurs coupes pétrolières. Le découpage réalisé dépend de la composition du résidu atmosphérique et des utilisations ultérieures des différentes coupes obtenues. L'opération sous vide permet d'abaisser les températures de distillation et d'éviter ainsi la dégradation thermique des hydrocarbures à haute température d'ébullition. Elle permet de ne pas dépasser 400-430 °C qui est, dans ce type d'unité, l'ordre de grandeur de la température limite de stabilité des hydrocarbures. Le vide est assuré par un dispositif d'aspiration des gaz résiduels en tête de colonne. Le gasole et les distillats sous vide « spindle ou huile légère (SPO), huile mi-visqueuse (MVO) et huile visqueuse (VO) », sont soutirés latéralement et le résidu sous vide est obtenu en fond de colonne. Le contrôle de la qualité des produits soutirés fait appel aux essais normalisés suivants :

- Gasole sous vide - point de trouble
- Distillats huile - viscosité, point d'éclair
- Résidu sous vide - Viscosité, pénétrabilité (Charmat et Hadj Othmane 2022)

Le schéma présenté par la figure II.5 ci-après, montre les équipements principaux constituant l'opération de distillation sous vide :

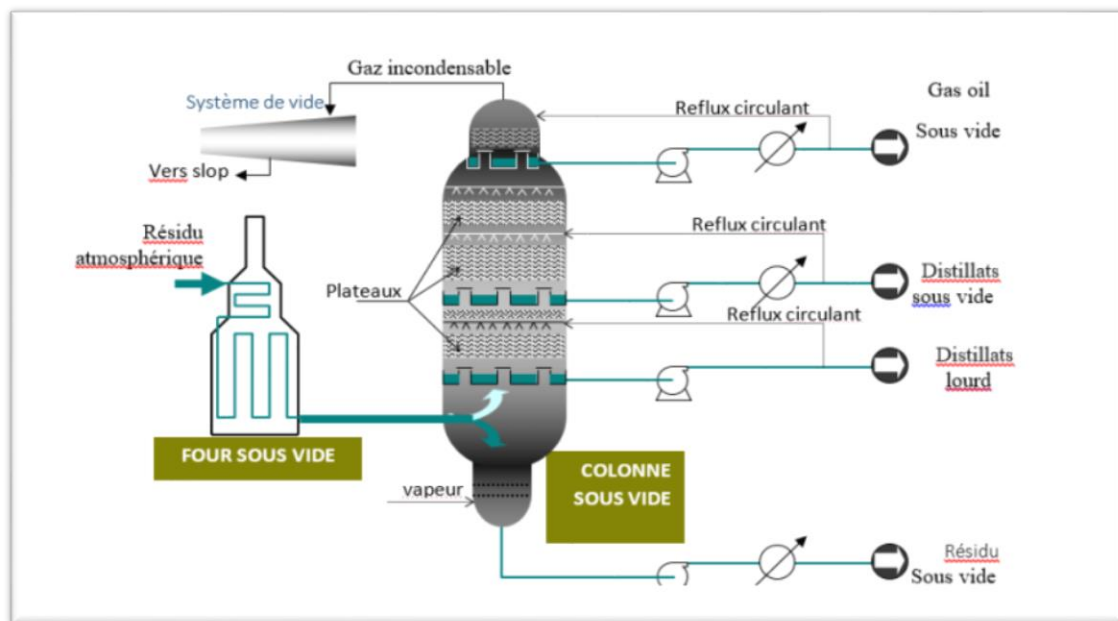


Figure. II .5 : Schéma simplifié de la distillation sous vide (Dou, Dou, et Retteb 2017)

II.2.2.Procédés de conversion par altération :

Le reformage catalytique et l'isomérisation sont des méthodes qui permettent de changer les structures d'hydrocarbures et d'obtenir des produits à différentes caractéristiques . Les essences produites par la distillation atmosphérique ou bien par le craquage doivent être subies à un autre traitement, pour améliorer leurs performances, à savoir l'indice d'octane . (اسامة و آخرين , 2021)

II.2.2.1 Reformage catalytique :

Le procédé de reformage catalytique consiste, en première approximation, en la production. Les substances aromatiques contiennent de 6 à 10 atomes de carbone, avec un maximum de seulement 7,8 Soit 9. Pour cela, on part d'une charge contenant des paraffines ou des naphthènes contenant le nombre équivalent d'atomes de carbone En bref. (Boucha, Ousfia, et Khelifi 2019)

ce procédé transforme des paraffines et des naphthènes ordinaires en benzène lourd (naphthène) à partir de substances aromatiques (Figure) illustrant le procédé :

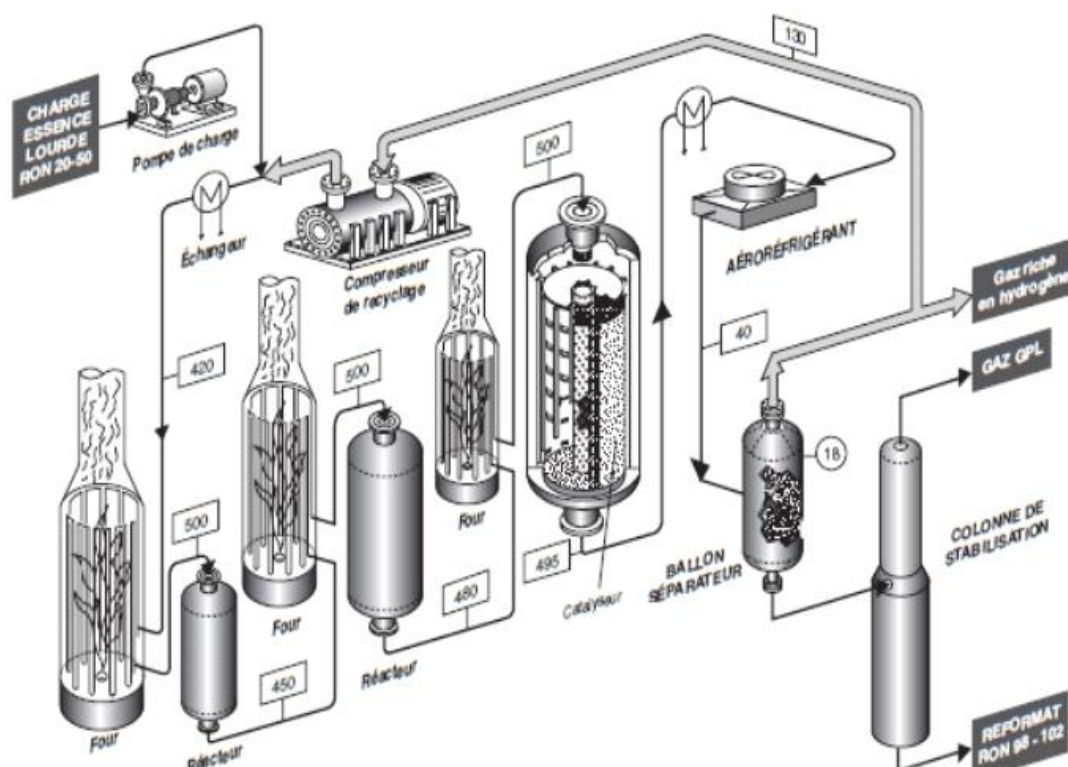
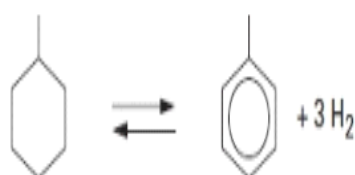


Figure II.6 : Schéma du procédé de reformage catalytique (Boucha, Ousfia, et Khelifi 2019)

Les principales réactions mises en œuvre ce procédé sont :

- ❖ La réaction de déshydrogénation des naphtènes en aromatiques:



Procédé à lit fixe : $T = 470$ à 530°C , $P = 10$ à 25 bars, Catalyseur : Pt/Re sur $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cl}$, RON : 98-100, Durée du cycle : 6 à 15 mois

- ❖ La réaction de déshydrocyclisation des paraffines en aromatiques;

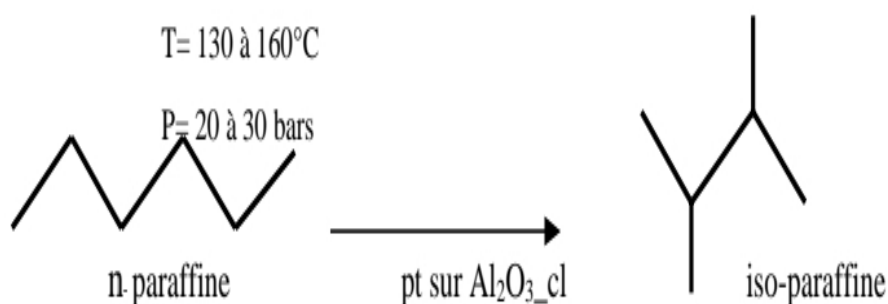


Procédé à lit fixe : $T = 470$ à 530°C , $P = 10$ à 25 bars, Catalyseur : Pt/Re sur $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cl}$, RON : 98-100, Durée du cycle : 6 à 15 mois

II.2.2.2. Isomérisation :

L'isomérisation est un processus légèrement exothermique ($\Delta H = -10$ à -20 kJ/mol), très rapide dans les conditions normales de fonctionnement. Ainsi, ils ne sont pas sensibles au changement de température et ne sont pas affectés par la pression mais sont inhibés par des composés formés à partir de substances aromatiques dans la réaction de reconstitution globale. (Boucha, Ousfia, et Khelifi 2019).

Un exemple de cette interaction est illustré ci-dessous :



Avec une définition simplifiée, le procédé d'isomérisation est basé sur la conversion des n-paraffines en benzène léger (essence) à faible IO et produisant de l'isoparaffine caractérisée par des indices d'octane élevés. (اسامة و آخرين 2021).

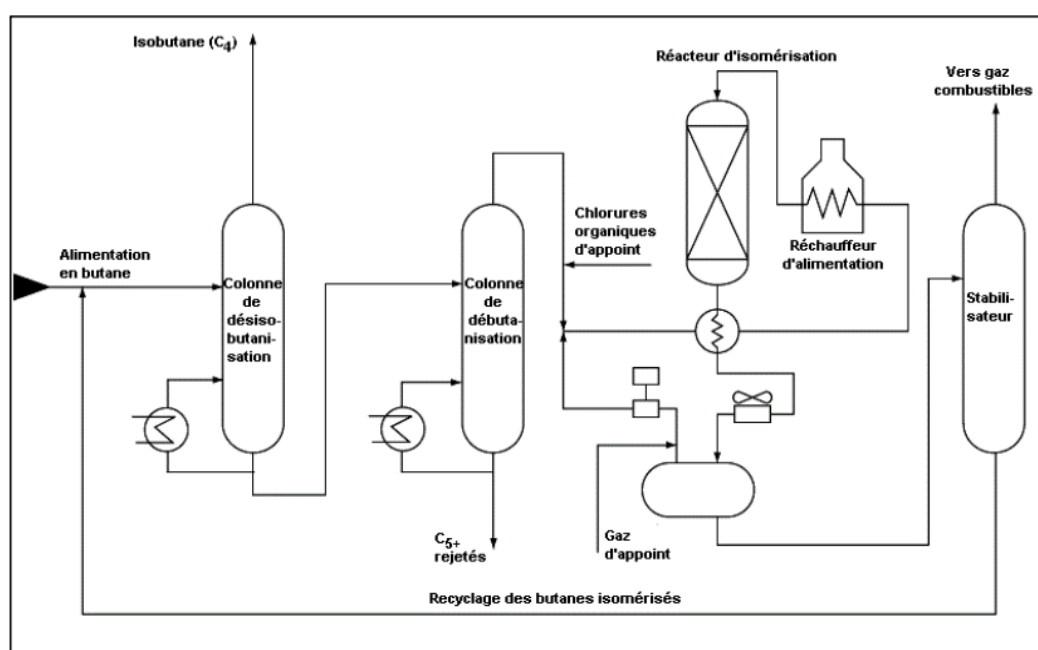


Figure II. 7: Schéma du procédé d'isomérisation du butane (Mehenni et Kabbeche 2021)

II.2.3.Procédés de conversion par décomposition :

Avant la fin de la phase de distillation, nous déclenchons d'autres processus pour modifier la structure des fractions en production de produits plus recherchés, comme le craquage (thermique , catalytique), Hydrocraquage et Viscoréduction et Vapocraquage et Cokéfaction .

II.2.3.1.Craquage thermique :

La principale source d'énergie est la température, étant donné que certains réactifs sont endothermiques, ce qui entraîne une augmentation du nombre de molécules. Le craquage thermique est principalement appliqué aux distillats intermédiaires à une température comprise entre 450 et 500 C° degrés Celsius sous pression et fournit des alcènes qui forment la majeure partie de l'essence. Cette réaction est considérée comme un produit de coke . (Mehenni et Kabbeche 2021)

Exemples :

- Paraffine (craquage)→paraffine + oléfine

Comme : $C_8H_{18} \rightarrow C_4H_{10} + C_4H_8$

- Oléfine (craquage)→oléfine + oléfine

Comme : $C_8H_{16} \rightarrow C_5H_{10} + C_3H_6$

- Naphtène (craquage)→ oléfine +aromate

- Aromatique (craquage)→aromatique + oléfine (2021 اسامة و آخرين)

II.2.3.2.Craquage catalytique :

Le craquage catalytique est un craquage dans lequel un grand nombre de Molécules d'alcanes à une température de 500 °C, qui dépend de la conversion Distillation sous vide en morceaux plus légers à haute température et basse pression, il se solidifie par le mécanisme acide. Le catalyseur utilisé est donc un catalyseur acide constitué d'un Matrice zéolite, silice et alumina. (Mehenni et Kabbeche 2021)

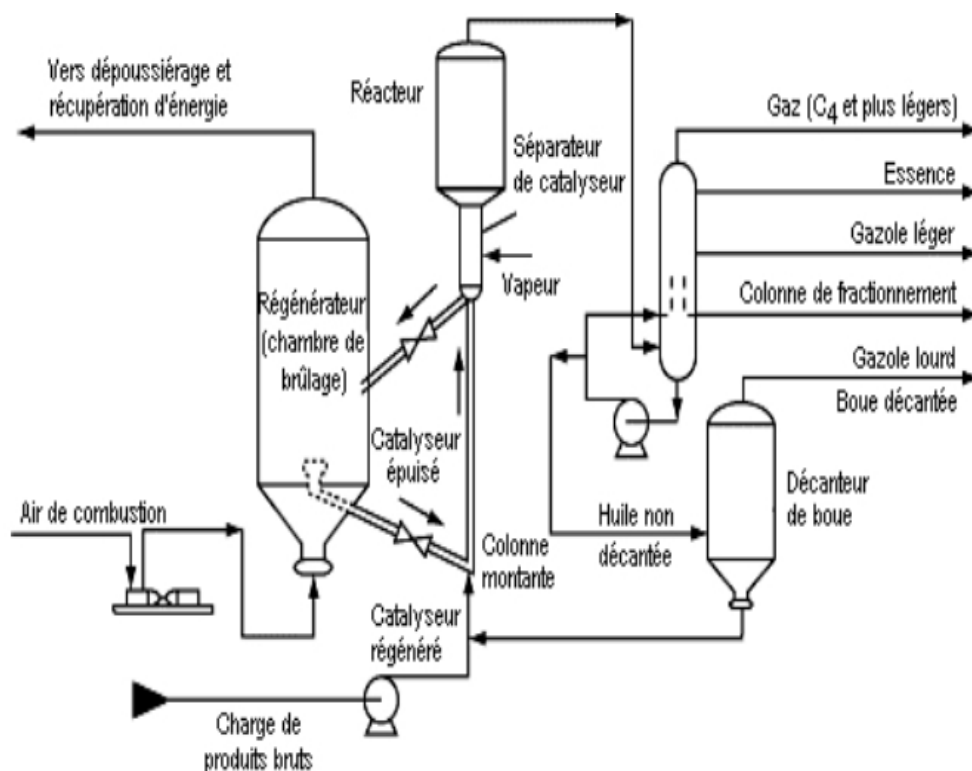


Figure II.8 : Schéma du procédé de craquage catalytique (اسامة و آخرين, 2021)

II.2.3.3. Hydrocraquage:

L'hydrocraquage est le processus de décomposition des fractions pétrolières lourdes en Pièces légères à haute valeur marchande. Ce procédé est réalisé, sous haute pression d'hydrogène (entre 50 et 150 bar), à température du système de 250 à 450 degrés Celsius.

A cette température, il y a rupture de particules longues et émergence de particules oléfiniques. Mais en présence d'hydrogène sous haute pression, il se produit une hydrogénation partielle de ces oléfines et aromatiques ont également formé des intermédiaires lourds qui sont à l'origine formation de coke.

A noter également qu'avec ce procédé, la consommation d'hydrogène est calme de 200 à 700 m³ de H₂/m³ de charge. (Kouacem 2021)

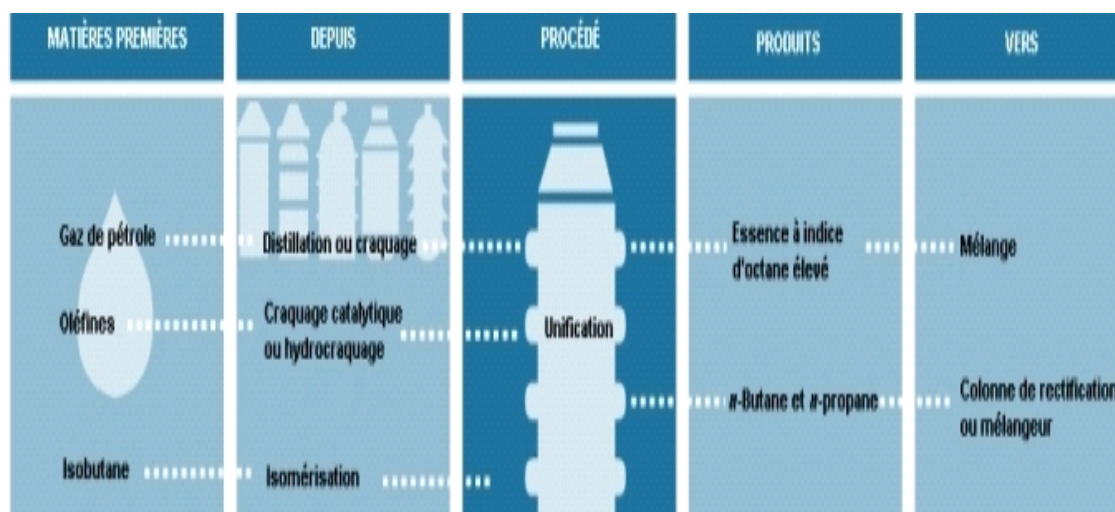


Figure II. 9: Schéma du procédé hydrocraquage (اسامة و آخرين, 2021)

II.2.3.4. Viscoréduction:

Le procédé de viscoréduction est un procédé de craquage de particules lourdes en particules plus légères. La charge se compose principalement du résidu de distillat sous vide. Contrairement au craquage catalytique et à l'hydrocraquage, il s'agit d'un procédé thermique. Cela fonctionne donc sans catalyseur. Son but est de réduire la viscosité du résidu lourd. Ce procédé se déroule entre 430°C et 490°C, à des pressions comprises entre 5 et 12 bars. Des produits de faible qualité sont obtenus après craquage par viscosité. Ils sont en particulier chargés en soufre et nécessitent des traitements d'hydrosulfuration sévères pour pouvoir être mélangés au pool des produits. L'essence est par ailleurs envoyée au reformage catalytique pour améliorer son indice d'octane. (Gabbour et Bousbia Salah 2013)

II.2.3.5. Vapocraquage :

Le vapocraquage est un procédé pétrochimique par lequel des hydrocarbures saturés sont cassés en molécules plus petites, et souvent insaturées. C'est donc la source principale de production d'alcènes (éthylène, propylène, etc.), monomères à l'origine de nombreuses matières plastiques. Les produits de départ sont généralement du naphta, mais peuvent également être de l'éthane ou du GPL. Mélangés avec de la vapeur d'eau, ils sont amenés à environ 800 °C par passage dans des tuyaux chauffés par des fours, pendant un temps très bref, inférieur à la seconde. Les produits de la réaction sont refroidis brutalement afin d'interrompre celle-ci, et d'obtenir le mélange d'alcènes recherché.

La composition exacte de celui-ci dépend des produits de départ, de la température des fours et du temps de passage dans ceux-ci. Des produits de départ légers (éthane, GPL)

fourniront une plus grande quantité d'alcènes légers, alors que du naphta fournira également des composés aromatiques. Une température de craquage plus élevée ("sévérité") favorise la formation d'éthylène et de benzène, alors qu'une température plus basse fournit plus de propylène, d'hydrocarbures en C4, et de produits liquides. Le procédé conduit généralement à un dépôt de coke progressif à l'intérieur des tuyaux de craquage, ce qui dégrade peu à peu la performance du procédé. Ils sont donc périodiquement décokés par passage d'un mélange air-vapeur à une température proche de 1 000 °C. (Baba Ahmed 2021)

II.2.3.6.Cokéfaction :

Le but principale de procédé est la conversion des résidus lourds en produits blancs, le coke est alors utilisé comme combustible. Les unités de cokéfaction sont généralement alimentées par des résidus lourds, tel que :

- Résidu de craquage catalytique .
- Résidu de viscoréduction .
- Résidu sous vide .
- Asphalte ou extraits d'huiles lubrifiantes . (Kouacem 2021)

II.2.4.Procédés de conversion par combinaison :

Les deux procédés combinent deux composés, à savoir la polymérisation et l'alkylation .

II.2.4.1.Polymérisation :

La polymérisation est le processus d'assemblage de deux ou plusieurs molécules organiques insaturées (oléfines) en une seule molécule plus lourde dans laquelle les éléments de la molécule mère sont présents dans les mêmes proportions. Il transforme les oléfines gazeuses, telles que l'éthylène (C_2H_4), le propylène (C_3H_6) et le butène (C_4H_8) obtenus dans les unités de craquage thermique et de craquage catalytique fluide, en molécules plus complexes, plus lourdes et à indice d'octane plus élevé, telles que le naphta et les charges pétrochimiques.

La charge d'alimentation oléfinique est prétraitée pour éliminer les composés soufrés et autres composés indésirables, puis passée à travers un catalyseur au phosphore, généralement un catalyseur solide ou de l'acide phosphorique liquide ; puis une réaction de polymérisation exothermique se produit .

Le processus de polymérisation combine au moins deux molécules organiques insaturées (oléfines) en une seule molécule plus lourde. On peut distinguer trois types d'agrégation :

- La polymérisation par étape : un grand nombre de molécules, possèdent au moins deux groupes fonctionnels, se soudent les unes aux autres par des réactions chimiques. Ces réactions se font avec l'élimination des petites molécules (H_2O , HCl , $NH_3...$) et sont appelées polycondensations ou polyadditions .
- La polymérisation en chaîne : polymérisation dans laquelle la croissance d'une chaîne polymère résulte exclusivement de réaction entre monomère et site réactif de la chaîne polymère, avec régénération du site réactif à la fin de chaque étape de croissance .
- La polymérisation par des complexes de métaux de transition, de type Ziegler-Natta, jouant en jeu des métallocènes .

Il existe des polymères synthétiques, comme le polyéthylène, par opposition à des polymères d'origine naturelle, par exemple la cellulose .

En industrie de textile, la polymérisation est le processus chimique par lequel des résines ou des plastiques sont fixés à des matières textiles au moyen de la chaleur. (اسامة و آخرين , 2021)

I.2.4.1 Alkylation:

L'alkylation est un procédé qui permet la production d'oléfines légères (C_3 , C_4 , C_5) par addition d'iso paraffines (essentiellement l'isobutane) des paraffines ramifiées qui sont d'excellents composants des carburants du fait de leurs indices d'octane élevé. La réaction la plus typique est l'addition de l'isobutane sur les butènes pour l'obtention de l'iso octane . L'alkylation utilise comme charges les paraffines possédant un carbone tertiaire dont la plus utilisée industriellement est l'isobutane issu généralement des coupes C_4 de distillation directe du pétrole brut et de reformage catalytique et des oléfines qui proviennent le plus souvent du craquage catalytique. L'alkylation est une réaction exothermique, elle se déroule en phase liquide, à basse température et à haute pression en présence des catalyseurs acides forts. Industriellement les catalyseurs utilisés sont l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide fluorhydrique (HF) selon un mécanisme cationique . (Kouacem 2021)

II.3. Les propriétés des essences :

L'obtention d'excellentes performances du véhicule dépend de facteurs techniques et des normes de qualité du carburant : d'une part, elle distingue caractéristiques physiques qui déterminent le bon ravitaillement du véhicule et, d'autre part, elle distingue les caractéristiques qui peuvent obtenir la meilleure performance du moteur. Obtenue sans risque de combustion anormale :

II.3.1. La masse volumique (densité):

Densité : C'est une mesure de la masse d'un liquide par unité de volume à une température donnée. La masse volumique d'un objet à une température donnée est le rapport de sa masse à Son volume, exprimé en (kg/l ou g/cm³) est mesuré à l'aide d'un hydromètre. Varie avec la température selon la relation :

$$\rho_t = \rho_{15} - k(t - 15)$$

Avec : t : température en °C

ρ_t et ρ_{15} : masse volumique respectivement à t°C et 15°C.

k : Coefficient qui dépend de la température

La masse volumique des essences est comprise entre 0.735 et 0.765 kg /l.

Elle est inversement proportionnelle à la température et elle augmente avec la teneur en aromatique

La densité d'un produit est le rapport de la masse d'un certain volume d'échantillon à la masse du même volume d'échantillon à une température standard (4 °C) et une température de référence donnée (généralement de l'eau). Par conséquent, la densité est une dimension égale à la densité à 15 ° C .

La spécifique Gravity (Sp. Gr_{60/60 °F}) est une densité avec la même température pour le produit et le corps de référence (eau). Cette température est de 60°F soit 15°C. Un autre concept est utilisé pour mesurer la densité des fractions pétrolières : la qualité API (définie par l'American Petroleum Institute comme une fonction hyperbolique de la gravité spécifique) . (اسامة و آخرين , 2021).

$$API = [141.5 / Sp. Gr_{60 / 60}] - 131.5$$

II.3.2. La volatilité :

Une autre importante caractéristique du rendement de l'essence est sa volatilité, C'est la capacité d'un produit liquide à passer sous forme de vapeur. Un suivi strict de la volatilité de l'essence est essentiel pour garantir un bon fonctionnement du moteur dans toutes les conditions. La volatilité est trop faible, le moteur démarre difficilement par temps froid. Si elle est trop élevée, le moteur peut caler ou présenter des difficultés de redémarrage par temps chaud. La volatilité de l'essence est importante parce que l'essence liquide doit se mélanger à l'air et être pulvérisée afin de pouvoir brûler dans le moteur. Les caractéristiques de volatilité de l'essence sont de première importance pour les conditions de conduite, la facilité de démarrage et la performance. Une essence très volatile se pulvérise plus facilement. (Le bloub 2020)

II.3.3. La distillation ASTM :

La procédure de distillation ASTM a lieu dans un laboratoire. température à laquelle Une certaine grandeur de l'essentiel, la mesure nous permet d'avoir les points qui se rejoignent dans Soit une courbe de distillation ASTM. La courbe de distillation ASTM donne une idée Suffisant pour les proportions relatives d'hydrocarbures légers, moyens et lourds contenus dans un produit (GRAIDIA et KOUR s. d.) faites plus attention à:

- Point initiale (PI) : température repérée au moment où apparaît la première goutte de distillat.
 - Fractions évaporées en pourcentage (volume) à 70°C, 100°C, 180°C, de signées respectivement par E70, E100, E180 .
 - Point final (PF) : température pour laquelle on recueille la dernière goutte de distillat .
- (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

II.3.4. La Tension de vapeur REID (TVR):

Les températures Tension de vapeur :C'est une propriété très importante dans le domaine pétrolier pour le Stockage et transport .

La pression de vapeur Reed est le point d'équilibre entre les deux phases vapeur/liquide en utilisant déséquilibre de température (Tamma et Kaib 2021) . Elle correspond à la pression relative produite par la vapeur d'un échantillon de Placer le

carburant dans une enceinte fermée à une température de 37,8°C. elle Généralement entre 0,35 et 1 bar.

En effet, la fluctuation du carburant devrait être suffisante pour assurer un démarrage rapide et performances satisfaisantes du véhicule par temps froid. Au contraire, lorsqu'on travaille dans élevées et les fluctuations doivent être limitées pour éviter une évaporation violente et réduire le rejet d'hydrocarbures légers dans l'atmosphère. (اسامة و آخرين 2021)

II.3.5. Le rapport V/L :

Le rapport V/L est la norme de volatilité. A température et pression fixes, le rapport V/L représente le volume de vapeur formé par unité de volume de liquide initialement à 0°C. La volatilité du carburant est alors exprimée par le niveau de température où le rapport V/L est égal à une valeur spécifique, par exemple:

$$V/L = 12, V/L = 20, V/L = 36 .$$

Il existe une corrélation entre la température correspondant à ces vitesses d'évaporation et les paramètres classiques de volatilisation (TVR, distillation ASTM).

$$1) T(V/L)_{12} = 88.5 - 0.19 E70 - 42.5 PVR .$$

$$2) T(V/L)_{20} = 90.6 - 0.25 E70 - 39.2 PVR .$$

$$3) T(V/L)_{36} = 94.7 - 0.36 E70 - 32.3 PVR .$$

Avec :

1- $T(V/L)_x$: la température (°C) pour laquelle $V/L = x$.

2- E70 : pourcentage Evaporé à 70°C . (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

II.3.6. L'indice d'octane :

L'indice d'octane est une mesure de la capacité à résister aux chocs lorsque l'essence est brûlée. Le processus normal de combustion d'un moteur à allumage commandé comprend la combustion rapide mais progressive du mélange air-carburant, grâce à la propagation du front de flamme de l'étincelle entre les électrodes de la bougie .

Le phénomène parasite est le cliquetis, qui est une sorte de combustion spontanée instantanée, une grande quantité d'imbrûlés et se déplaçant à travers le piston et libérant de

l'énergie du front de flamme. Cela conduit à une augmentation locale de la pression, puis la vibration de la masse de gaz est progressivement affaiblie jusqu'à ce que la pression en tout point de la chambre de combustion soit équilibrée, et le bruit caractéristique qui provoque la cloche métallique est généré, d'où l'origine de la terme « clic » .

Afin de caractériser le comportement du carburant ou de ses composants en termes de résistance au cliquetis, les méthodes traditionnelles et courantes utilisées depuis les années 1920 incluent l'introduction de la notion classique d'indice d'octane. Comparer le comportement de l'essence avec le comportement de deux hydrocarbures purs choisis comme référence. Il s'agit du 2,2,4-triméthylpentane ou isooctane, très résistant à la combustion spontanée, auquel on attribue arbitrairement un indice de 100, et du n-heptane faible, qui a un indice de 0. (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017) . Si le carburant dans des conditions expérimentales bien définies se comporte comme un mélange de x% en volume d'isooctane et (100-x)% de n-heptane, alors le carburant a un indice d'octane x.

L'indice d'octane est mesuré à l'aide d'un moteur de référence appelé CFR (Cooperative Fuel Research) . Il a une structure très robuste et peut résister aux chocs à long terme sans accident. Le principe de cette méthode est d'augmenter progressivement le taux de compression du moteur CFR jusqu'à l'obtention d'une intensité de clic « standard », qui est détectée par un capteur de pression installé dans la chambre de combustion. Comparer le taux de compression critique ainsi enregistré avec les deux valeurs enregistrées avec deux mélanges binaires heptane-iso-octane de composition similaire .

Il existe deux procédures standard pour déterminer l'indice d'octane : la méthode "recherche" et la méthode "moteur". L'indice correspondant spécifié par les symboles RON (Etude de l'indice d'octane) et MON (indice d'octane du moteur) .

La différence entre ces deux programmes est principalement liée au régime de fonctionnement du moteur CFR. Par conséquent, lorsque le RON est déterminé, le moteur tourne à 600 tr/min sans chauffer le mélange carburé, tandis que MON tourne à 900 tr/min et à une température du mélange carburé de 149 °VS .

Le MON de l'essence est toujours inférieur au RON, la différence est appelée sensibilité, elle constitue en fait une indication de la "sensibilité" du carburant à la modification des conditions expérimentales, et plus précisément de la "sensibilité" à l'échauffement. Exécuter dans le programme MON.

Le RON de la plupart des essences et supercarburants conventionnels se situe entre 90 et 100, tandis que le MON se situe entre 80 et 90. Dans la plupart des cas, une attention particulière sera portée aux chocs à grande vitesse (plus de 400 tr/min), et les conséquences mécaniques sont terribles, à savoir le MON peut mieux refléter la tendance au cliquetis à haute vitesse, au contraire, le RON est un meilleur indicateur du risque de cliquetis à basse vitesse (1500 à 2500 tr/min).

Les deux indices ont leurs propres usages, ce qui explique pourquoi l'un d'eux est pris en compte lors de la formulation des spécifications des essences. (اسامة و آخرين). (2021).

II.4. Additifs pour essences :

Les additifs ne représentent qu'un très faible pourcentage de la composition de l'essence de quelques dizaines à quelques centaines de parties par million (ppm). Qui sont spécialement : Des colorants (4 mg/l) permettant de distinguer les produits entre eux et d'éviter des mélanges frauduleux.

Des anti-oxydants, assurant la bonne conservation des essences au stockage, même si celui-ci est toujours de quelques semaines au maximum. Des produits détergents ou surfactants empêchant la formation de dépôts dans le circuit d'admission (injecteurs, tubulure, soupapes) et les chambres de combustion du moteur. (Les phénomènes d'encrassement doivent en effet être évités en raison de leurs inconvénients potentiels (perte d'agrément de conduite, augmentation de consommation de carburant et d'émission de polluants, accroissement de la tendance au cliquetis) .

Des additives anti-récessions des sièges de soupapes dont le plus important est le tétra-éthyle de plomb (le tétra-éthyle de plomb est ajouté à l'essence, pour deux raisons. Il sert à lubrifier les soupapes des moteurs et surtout a un rôle d'antidétonant, en évitant que le mélange air-essence n'explose trop tôt. Cette caractéristique est symbolisée par «l'indice d'octane» . (Kouacem 2021) . Il existe plusieurs additifs qui sont ajoutés à l'essence dans le but d'améliorer l'indice d'octane et de maintenir la sécurité des moteurs contre le phénomène de cliquetis . (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

II.4.1. Alkyles de plomb:

Le plomb tétra éthyle (PTE) $[Pb (C_2H_5)_4]$ est utilisé comme additif dans les essences depuis les années 1920 pour deux raisons, il assure une meilleure lubrification à température

élevée et surtout a un rôle d'antidétonant, évitant que le mélange air- essence n'explose trop tôt.

Quelques années plus tard, apparaît le tétra méthyle de plomb [PTM][Pb (CH₃)₄] mais ce produit était plus coûteux et à peine plus efficace que le PTE. La demande en indice d'octane ayant augmenté, et l'additif de plomb était devenu de plus en plus nécessaire, cependant il présente l'inconvénient d'être un poison pour les pots catalytiques d'échappement utilisés pour réduire les émissions de polluants gazeux. La toxicité des alkyles de plomb constitue un argument majeur pour réduire, ou supprimer leur adjonction dans les essences . (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

II.4.2. Les composés oxygénés :

Parmi ces composés oxygénés utilisés dans la formulation des carburants, les éthers apparaissent actuellement comme étant les composés privilégiés permettant de répondre aux besoins croissants induits par la politique de suppression du plomb dans les carburants ainsi que par l'évolution de leur qualité (haut indice d'octane) . (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

II.4.3. Ethers :

Les éthers (tertio alkyls éthers) sont principalement obtenus par réaction d'une iso oléfine tertiaire sur un mono alcool aliphatique.

Le MTBE (Méthyltertiobutyléther ou 2-méthoxy , 2-méthyl propane) est un éther utilisé comme base pour la formulation de supercarburants. A la température ambiante, le MTBE est un liquide volatil, inflammable, sans couleur qui se dissout facilement dans l'eau. Il est produit par synthèse à partir d'isobutylène et de méthanol, en présence d'une résine échangeur d'ions comme catalyseur. Il possède un indice d'octane élevé (118) et une faible volatilité. Sa teneur dans l'essence peut atteindre 15% au maximum .

Le MTBE a été employé dans l'essence des ETATS-UNIS depuis 1979 pour remplacer le fil comme renforceur d'octane. Depuis 1992, il a été employé à des concentrations plus élevées dans l'essence principalement pour remplir les conditions d'oxygénation et pour des raisons économiques .

Le méthyltertiobutyléther (MTBE) est actuellement le plus utilisé des éthers que l'on peut employer comme additifs de l'essence. L'éthyltertiobutyléther (ETBE), le tertioamylméthy-

léther (TAME), le tertioamyléthyléther (TAEE) et le diisopropyléther (DIPE). (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

II.4.4.Alcools :

L'éthanol a indice d'octane élevé, il est utilisé comme additif à l'essence. Il est mélangé à l'essence conventionnelle à titre de substitut renouvelable à d'autres produits chimiques nocifs qui augmentent l'indice d'octane. L'éthanol introduisant de l'oxygène directement dans l'essence, il en résulte une combustion plus complète et une réduction d'émissions au tuyau d'échappement . (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

TableauII.1 : Caractéristiques des additifs . (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

Caractéristiques	MTBE	ETBE	Méthanol	Ethanol	TAME	DIPE
Masse volumique	746	250	793	794	750	730
Température d'ébullition (°C)	55.3	72.8	64.7	78.3	86.3	68.3
Pression de vapeur (bar)	0.55	0.4	5.24	1.54	0.25	0.34
Pouvoir calorifique (kJ/l)	26260	26910	15870	21285	27375	2721
Chaleur d'évaporation(kJ/Kg)	337	321	1100	854	310	1
Teneur en oxygène (%masse)	18.2	15.7	49.9	34.7	15.7	310
NOR	118	118	123	120	115	15.7
MON	101	101	95	99	100	110

II .5.Spécifications des essences :

Les spécifications de carburant des voitures varient d'un pays ou d'une région à l'autre. Autrement dit, ces spécifications changent d'un pays à l'autre sous divers aspects allant de l'indice d'octane, des points de distillation, du TVR et même de la composition. Les modifications les plus importantes apportées à l'essence sont :

- Elimination du plomb .
- Réduction de la teneur en benzène .
- Réduction de la teneur en aromatiques .
- Réduction de la teneur en oléfines .
- Réduction de la TVR . (Beddiaf, Mahmoudi, et Bouragaa 2017)

Nous étudions ici un ensemble de spécifications qui expliqueraient la différence de propriétés entre l'essence éthyle et le benzène sans plomb. Les tableaux **II.02** et **II.03** montrent ce qui suit :

Tableau II. 2: Spécifications des essences éthyle (Abouri et Siagh 2016)

Caractéristiques moyennes	Essence normale	Supercarburant
Densité à 15°C	0.7259	0.7685
T.V.R. (Hiver/Été) bars à 37.8°C	0.6 5/0.80	0.65/0.80
Corrosion lame cuivre	1a	1a
Doctor Test	N	N
Gommes actuelles mg/100 cc	0.41	0.53
PTE % Poids	0.04	0.04
N.O.R.	90.0	96.4

Distillation ASTM P.I. °C	34	38
10%	51	62
20%	60	75
30%	68	89
50%	89	112
65%	107	128
70%	113	134
90%	148	157
95%	164	174
P.F	178	182
% distillé	98	98
% pertes	02	02
Teneur en soufre Ppm	100	100
Teneur en plomb g/l	0.4	0.4
Masse volumique Kg/m3	710- 765	730-770

Tableau II.3:Spécifications des essences sans plomb. (Abouri et Siagh 2016)

Caractéristiques moyennes	Essence sans plomb
Densité	0.65
Masse volumique	725/ 780
RON	95
MON	85
Benzène % Vol	5
T.V.R. (Hiver/Été) bars à 37.8°C	0.65/ 0.8
Distillation ASTM °C	
15%	70
40%	100
85%	180
90%	210
Point final	215
Teneur en soufre (ppm)	100

II. 6.Conclusion :

la fin de ce chapitre, nous avons pu savoir que la substance est un carburant pour les voitures, et qu'elle est obtenue après le processus de distillation, et d'autres opérations sont également effectuées dessus afin d'améliorer sa qualité, c'est-à-dire augmenter l'indice d'octane , car c'est la caractéristique importante dans le processus de vente sur le marché .

Chapitre III :

Moteur à allumage commandé par étincelle

III.2. Introduction :

L'ère actuelle de la civilisation a une caractéristique distincte qui la distingue de tous ses prédécesseurs, qui est l'utilisation intensive de l'énergie mécanique. Ce phénomène est principalement attribué à un moteur, un appareil qui convertit une forme d'énergie en une autre, souvent sous la forme de moteurs thermiques (Sundar 2018a) . La chose la plus importante que nous examinerons dans ce chapitre est les composants de base du moteur à allumage commandé SI, le principe de fonctionnement des moteurs SI et CI (deux et quatre temps), ses utilisations les plus importantes et le risque de ses émissions dans l'environnement. Et comment les atténuer .

III.2. Définition du moteur thermique :

Les moteurs thermiques convertissent le carburant (énergie chimique) en énergie thermique et l'utilisent pour effectuer des travaux mécaniques (énergie mécanique). Un moteur thermique peut être classé en deux catégories:

- (1) Moteurs à combustion interne (moteurs à combustion) .
- (2) Moteurs à combustion externe (moteurs EC) . (Sundar 2018f)

III.2.1. Moteurs à combustion externe et à combustion interne:

Les moteurs thermiques externes, tels que les moteurs à vapeur, utilisent des sources de chaleur distinctes du fluide de travail, contrairement aux moteurs à combustion interne. Un moteur à combustion externe utilise une flamme pour chauffer l'eau en vapeur, puis utilise la vapeur pour alimenter une turbine, tandis que les moteurs à combustion interne, tels que les moteurs de voiture, enflamment l'essence à l'intérieur d'un piston. Tous les moteurs à combustion externe sont classés comme moteurs thermiques externes. Cependant, il est important de noter que tous les systèmes d'énergie thermique, tels que les centrales solaires, nucléaires et géothermiques, ne relèvent pas de la catégorie des moteurs à combustion externe. (Sabhadiya 2021)

Un moteur à combustion interne (ICE) est un moteur thermique qui fonctionne par combustion d'un carburant oxydant, généralement de l'air, au sein d'une chambre de combustion qui est un composant essentiel d'un circuit de circulation de fluides. Les carburants à densité énergétique plus élevée, tels que l'essence et le carburant diesel, ainsi

que les liquides dérivés de carburants fossiles, sont généralement utilisés pour alimenter les moteurs à combustion interne. (Sabhadiya 2023)

Il existe actuellement deux types différents de moteurs à combustion interne en production, le moteur à essence à étincelle et le moteur diesel compact. La majorité de ces moteurs fonctionnent sur un cycle à quatre temps, nécessitant quatre coups de piston pour terminer chaque cycle. Ce cycle se compose de quatre phases distinctes : Admission, compression, combustion, course et échappement. (« Internal Combustion Engine Basic »,2013)

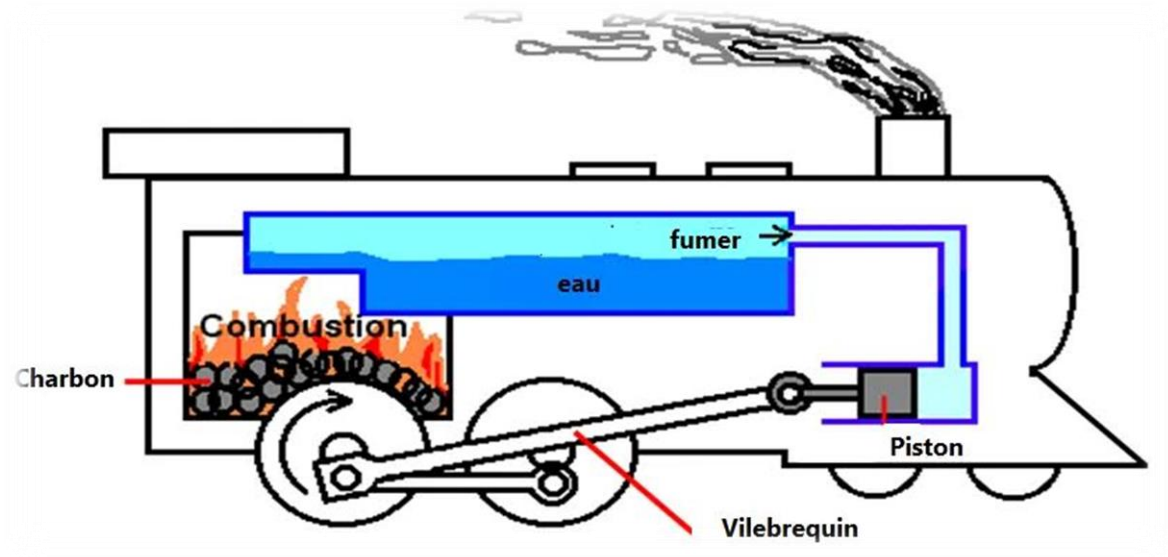


Figure III.1: Moteurs à combustion externe (« Steam Engines », 2016)

III . 3. Composants de base du moteur :

Les moteurs alternatifs à combustion interne semblent simples, mais ce sont en fait des machines complexes avec de nombreux composants nécessaires pour produire efficacement de l'énergie. Il existe deux types de moteurs, l'allumage par étincelle et l'allumage par compression. Nous allons discuter des composants importants du moteur .

La Figure 1.2 montre une vue en coupe d'un moteur monocylindre à allumage commandé avec soupapes en tête. Nous décrirons brièvement les principaux composants du moteur et leurs fonctions ci-dessous .

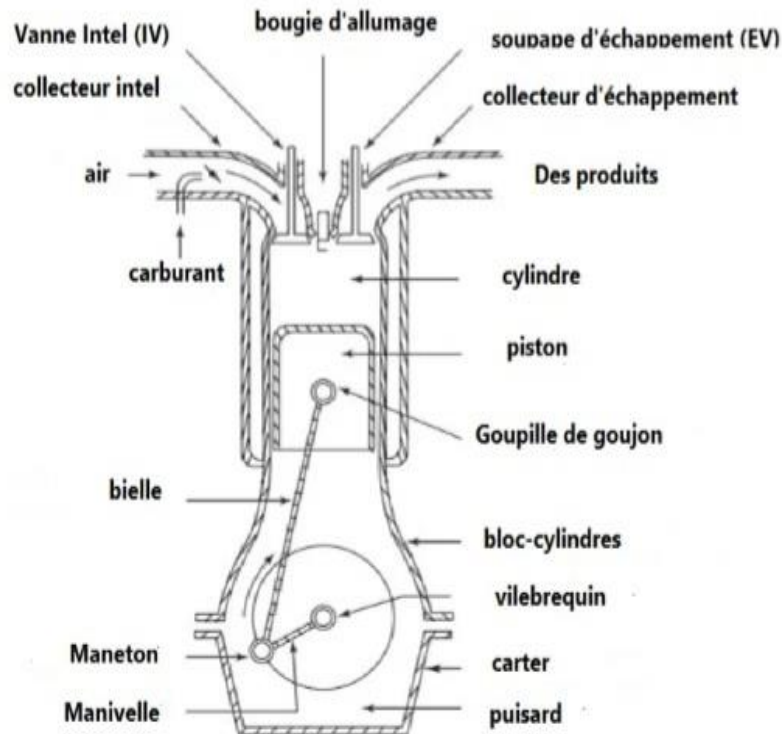


Figure III.2. Coupe transversale d'un moteur à allumage commandé .
(Sundar 2018h)

III .3.1. Éléments de construction

Le moteur thermique est constitué de organes fixes et variable et annexes

a) Organes fixes

Les parties fixes comprennent essentiellement

- la culasse
- le bloc-cylindres
- les carters
- les collecteurs d'admission et d'échappement

b) Organes mobiles

Les organes mobiles d'un moteur sont essentiellement.

- les pistons
- les bielles
- le vilebrequin

- le volant moteur
- les soupapes et leurs commandes (distribution)

c) Organes annexes

- Le système d'allumage
- Les systèmes d'alimentation et de carburation.
- Le circuit de graissage
- Le circuit de refroidissement
- Les collecteurs
- Les circuits électriques de démarrage et de charge. (« constitution-du-moteur.pdf » , 1992)

III.3.2. COMPOSANTS DU MOTEUR

Les composants de base d'un moteur thermique à combustion interne sont les suivant :

Bloc-cylindres:

- La structure de support principale pour les différents composants .
- Ce bloc-cylindres avec la culasse sera serré avec le nombre de boulons et de goujons. (Un joint sera placé entre le bloc-cylindres et la culasse) .
- Le bloc-cylindres est fourni avec les ailettes de refroidissement Si le système de refroidissement du moteur est un système de refroidissement par air .
- S'il s'agit d'un système de refroidissement par eau, les chemises d'eau seront fournies sur les parois des blocs-cylindres .
- Pour les moteurs multicylindres, le bloc-cylindres sera coulé en une seule pièce .
- La partie inférieure du bloc-cylindres s'appelle le carter de vilebrequin. Il servira de carter pour l'huile de lubrification .

Cylindre:

- À l'intérieur du bloc-cylindres, il y aura une forme cylindrique usinée avec précision pour permettre au piston d'aller et venir. C'est ce qu'on appelle un cylindre .
- Ce cylindre rempli du fluide de travail et subit les différents processus thermodynamiques pour produire une sortie de travail. (Sundar 2018h)

- mais les voitures ont généralement plus d'un cylindre (quatre, six et huit cylindres sont courants). Dans un moteur multicylindre, les cylindres sont généralement disposés de l'une des trois manières suivantes : en ligne , en V ou à plat (également appelé opposé horizontalement ou boxer), comme le montrent les figures

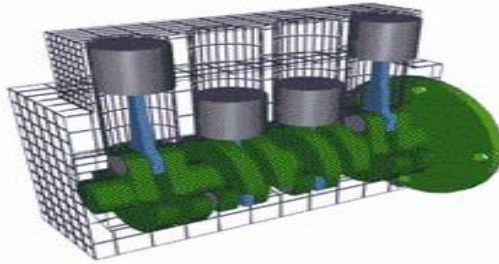


Figure III.3. En ligne : les cylindres sont disposés en ligne dans un seul banc .

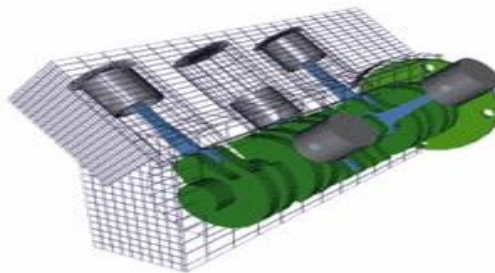


Figure III.4. Les cylindres sont disposés en deux bancs disposés en biais l'un par rapport

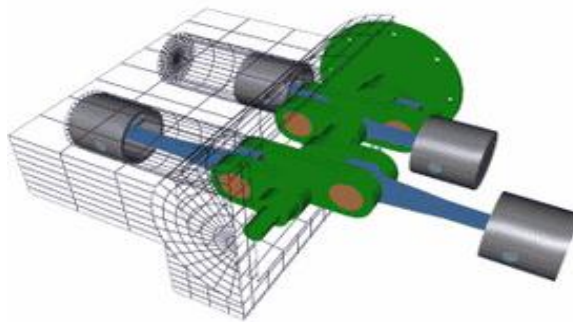


Figure III.5. Plat : Les cylindres sont disposés en deux bancs sur les côtés opposés du moteur .

Puisard:

Le carter entoure le vilebrequin. Il contient une certaine quantité d'huile qui s'accumule au fond du carter (le carter d'huile). (Jamie Page Deaton 2011)

Piston:

- Un composant cylindrique monté dans le cylindre est appelé piston .
- Joue un rôle crucial dans la production du résultat du travail .
- Il forme la limite mobile du système de combustion en créant un espace étanche aux gaz à l'aide des segments de piston et du lubrifiant .
- Segments de piston montés dans les fentes disponibles dans le piston lui-même pour fournir un joint étanche entre le piston et le cylindre .

Chambre de combustion:

- L'espace entre la partie supérieure du cylindre et le haut du piston, comme indiqué sur la figure, s'appelle la chambre de combustion .
- La combustion du carburant a lieu dans la chambre de combustion .
- La combustion du carburant dégageant l'énergie thermique entraîne la construction de la pression dans le cylindre .

Collecteur d'admission:

- Le tuyau qui relie le système d'admission à la soupape d'admission du moteur est appelé collecteur d'admission .
- À travers le collecteur d'admission, l'air et le mélange de carburant sont directement aspirés dans le cylindre .

Collecteur d'échappement:

- Le tuyau qui relie le système d'échappement à la soupape d'échappement du moteur est appelé collecteur d'échappement .
- Par le collecteur d'échappement, les produits de combustion seront échappés dans l'atmosphère .

Soupapes d'admission et d'échappement :

- La soupape est un dispositif permettant de faire fonctionner le fluide dans une seule direction .
- Les soupapes d'admission et d'échappement sont prévues sur la culasse ou sur le côté du cylindre pour réguler la charge entrant dans le cylindre (soupape d'admission) ou pour évacuer les produits de combustion du cylindre (soupape d'échappement) .
- Les soupapes seront disponibles s'il s'agit d'un moteur 4 temps uniquement. Dans les moteurs 2 temps , il existe des orifices disponibles pour réguler la charge entrant dans le cylindre (orifice de transfert) ou pour évacuer les produits de combustion du cylindre (orifice d'échappement) .

Bougie d'allumage :

- Le composant utilisé pour initier le processus de combustion dans le système d'allumage par étincelle .
- La bougie d'allumage sera située dans la culasse .
- La bougie d'allumage ne sera disponible que sur les moteurs Spark Ignition uniquement .

Bielle :

- Relie le piston et le vilebrequin .
- Une extrémité de la bielle est appelée pied de bielle qui est reliée côté piston par un axe de piston .
- L'autre extrémité de la bielle s'appelle la tête de bielle qui est reliée au vilebrequin par le maneton .

Vilebrequin :

- L'arbre de manivelle convertit le mouvement alternatif du piston en mouvement rotatif vers un arbre de sortie .
- Des masselottes d'équilibrage sont fournies sur les vilebrequins pour l'équilibrage dynamique du système de rotation .

Cames et arbre à cames :

- Pour faire fonctionner les soupapes d'admission et de sortie au bon moment, des cames sont fournies sur l'arbre à cames. Et entraîne également le système d'allumage .
- L'arbre à cames est entraîné par le vilebrequin via des pignons de distribution.
- Les pièces associées dans les cames et l'arbre à cames sont les culbuteurs, les ressorts de soupape et les poussoirs .

Volant :

- Pour obtenir une génération de couple uniforme, une masse d'inertie sous la forme d'une roue est prévue sur le vilebrequin appelé volant d'inertie . (Sundar 2018h)

III.3.3. Les fonctions du moteur thermique

Ils sont réalisées en intégrant quatre fonctions de base du groupe. Il s'agit notamment de systèmes à fonctions mécaniques constitués d'un système de confinement pour assurer l'isolement de la masse gazeuse et d'un système de levier relié dont le mouvement n'est pas difficile à modifier en remplaçant le piston par un mouvement de rotation. De plus, il existe un système de distribution pour réguler l'ouverture et la fermeture opportunes des vannes. Le système à carburant est chargé d'alimenter le moteur en mélange carburé, tandis que le système d'allumage assure l'allumage dudit mélange. De plus, il existe des systèmes auxiliaires, notamment le système de lubrification, le système de refroidissement, la batterie et le système de charge (circuit électrique). (LAAMARI 2008)

III.4. LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MOTEURS

Pour que le moteur fonctionne correctement, il doit suivre un cycle d'opérations de manière séquentielle qui ne peut pas être changé. Dans les sections suivantes, nous décrirons le principe de fonctionnement des moteurs SI et CI, à la fois à deux temps et à quatre temps. Bien que les deux moteurs aient beaucoup en commun, il existe quelques différences essentielles .

Moteur à allumage commandé SI :

Le mérite de l'invention du moteur à allumage commandé revient à Nicolas Otto (un ingénieur allemand) en 1876, en proposant le cycle à air standard (cycle Otto), qui est le cycle idéal pour un moteur à allumage commandé . (Sundar 2018e)

L'essence est le carburant de choix pour le fonctionnement des moteurs à allumage par étincelle, principalement en raison de sa grande volatilité, qui lui permet d'être facilement brûlée par une petite étincelle. La volatilité du carburant est inversement proportionnelle à la température d'allumage, plus la volatilité du carburant est élevée, plus la température d'allumage est basse. De même, les composés aromatiques sont préférés comme carburants aux alcanes car ils sont plus volatils et peuvent brûler à des températures plus basses. De plus, la technologie d'allumage par étincelle nécessite un taux de compression inférieur (environ 9:1) par rapport aux autres technologies en raison de la volatilité plus élevée du carburant. De plus, ils produisent relativement moins d'émissions de fumée au démarrage. Le plus petit volume de la chambre de combustion est une caractéristique des moteurs SI. Cependant, la technique d'allumage par étincelle est relativement risquée car le mélange air-carburant est comprimé avant d'être envoyé dans la chambre de combustion. Si la température atteint le point d'éclair (température d'allumage) avant l'allumage de l'étincelle, une détonation peut se produire car la température augmentera après l'étincelle . (Bilal 2020)

Moteur à allumage par compression CI :

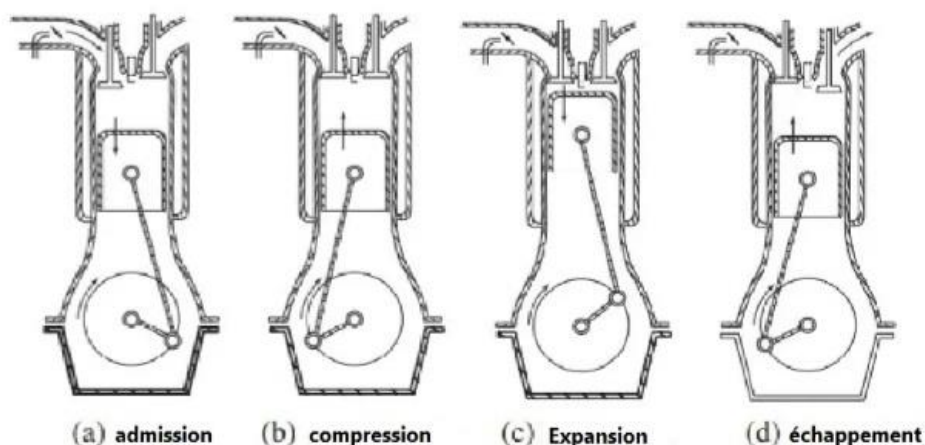
Le mérite de l'invention du moteur à allumage par compression revient à Rudolf Diesel (un ingénieur allemand) en 1892, pour avoir proposé le cycle diesel (cycle à pression constante), qui est le cycle idéal pour les moteurs à allumage par compression (Sundar 2018f) . Cette technologie diffère de l'allumage par étincelle en ce sens qu'elle n'utilise pas de bougie d'allumage. Au lieu de cela, la température élevée créée par la pression d'air est suffisante pour enflammer le carburant. Les moteurs à allumage par compression fonctionnent sur le cycle diesel, utilisant un carburant diesel moins volatil et donc moins sujet à l'auto-inflammation. En conséquence, la technologie CI atteint un taux de compression relativement plus élevé d'environ 20:1 , ce qui se traduit par une efficacité accrue du moteur. Pendant le fonctionnement CI, le carburant est injecté sous pression dans le cylindre après que l'air a été comprimé. La post-inflammation se produit à la suite de l'augmentation de température causée par la pression. Cependant, l'inconvénient de la

technologie CI est la combustion incomplète du carburant, ce qui entraîne des hydrocarbures imbrûlés dans les gaz d'échappement. De plus, le processus de compression en mode CI produit un bruit relativement plus élevé . (Bilal 2020)

III.4.1. Moteur à quatre temps à allumage commandé :

- Dans le moteur 4 temps, le cycle thermodynamique sera complété dans les quatre temps de la position ou les deux tours du vilebrequin .
- Tous les quatre coups seront complétés dans les 720° de rotation de la manivelle .
- Au cours de ces quatre temps, il y a cinq actions/événements à accomplir. Ce sont l'aspiration et la compression la combustion, la détente, l'échappement .
- La combustion du carburant sera prise en charge par la bougie d'allumage, c'est ce qu'on appelle le moteur à allumage par étincelle à 4 temps également connu sous le nom de moteur à essence à quatre temps .
- Le cycle de fonctionnement d'un moteur à essence à quatre temps comprend les temps suivants : (01) course d'aspiration ou d'admission ; (02) course de compression ; (03) expansion ou coup motrice et (04) course d'échappement . (Sundar 2018c)

Les détails des différents processus d'un moteur à allumage par étincelle à quatre temps avec soupapes en tête sont illustrés à la Fig.6 (a-d). Lorsque le moteur termine les cinq événements en mode de cycle idéal, le diagramme pression-volume (p-V) sera comme indiqué sur la Fig. 7



FigureIII.6: Principe de fonctionnement d'un moteur SI à quatre temps. (Sundar 2018c)

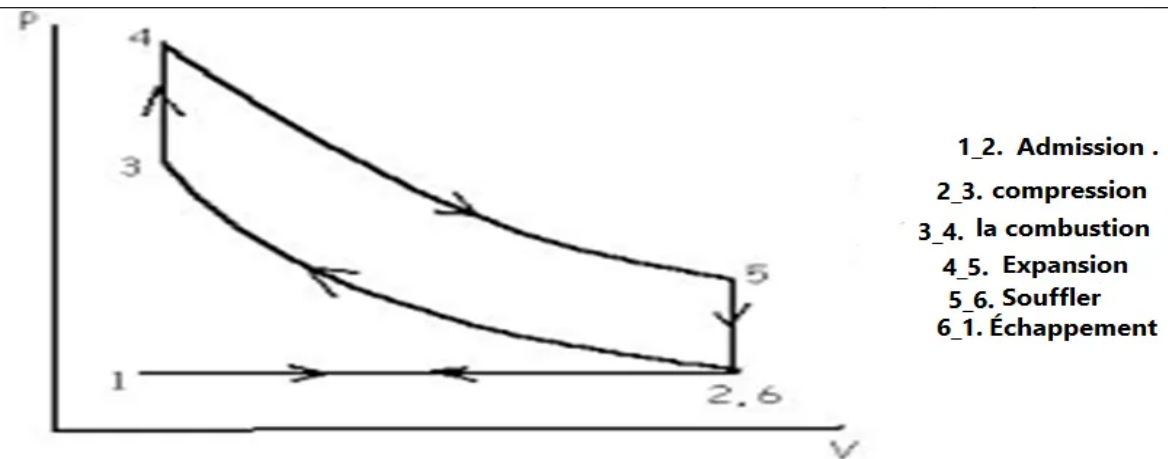


Figure III.7 Diagramme p -V idéal d'un moteur SI à quatre temps . (Virtual Laps)

- *Course d'aspiration ou d'admission , 1→2 (Fig.7) :*

La course d'aspiration commence lorsque le piston est au point mort haut (PMH) et sur le point de se déplacer vers le bas. A ce moment, la soupape d'admission est ouverte et la soupape d'échappement est fermée, Fig.6 (a) . L'aspiration créée dans le cylindre en raison du mouvement du piston vers le bas (point mort bas) le mélange de carburant sera aspiré dans le cylindre. Lorsque le piston atteint le point mort bas (PMB), la course d'aspiration se termine .

- *Course de compression , 2→4 (Fig.7) :*

La course de compression commence juste après la fin de la course d'aspiration. c'est-à-dire que le piston atteint le PMB. Pendant la course de compression, le piston se déplace du point mort bas (PMB) au point mort haut (PMH). De ce fait, la charge aspirée dans le cylindre sera comprimée (2→3 , Fig.7) . Pendant cette course, les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées , Fig.6 (b). La charge occupée par le cylindre est comprimée dans le volume de jeu qui est disponible lorsque le piston est au PMH. En conséquence, la pression et la température du mélange ou de la charge air-essence sont augmentées. Juste avant que le piston n'atteigne le PMH, le mélange air-essence (charge) est allumé par une bougie d'allumage ; la combustion soudaine du mélange air-essence se produit de manière quasi instantanée. Ces deux courses (c'est-à-dire la course d'aspiration et de compression) effectuent un tour complet du vilebrequin. Pendant le processus de

combustion, l'énergie chimique du combustible est converti en énergie thermique produisant une élévation de température d'environ 2000 C° (3→4, Fig.7) . La pression à la fin de le processus de combustion est considérablement augmenté en raison du dégagement de chaleur du carburant .

- *Expansion ou course de puissance , 4→5 (Fig.7) :*

Pendant la course de détente, les soupapes d'admission et d'échappement restent fermées, Fig.6 (C) . La haute pression des produits de combustion pousse le piston du point mort haut (PMH) au point mort bas (BDC). On l'appelle aussi course de travail car le mouvement linéaire du piston est converti en mouvement de rotation par l'arbre

de manivelle. Un volant d'inertie est monté sur ce vilebrequin pour collecter l'excès d'énergie pendant la course motrice et aide les trois courses idéales restantes .

- *Course d'échappement , 6→1 (Fig.7) :*

A la fin de la course de détente, les soupapes d'échappement sont ouvertes pour évacuer les gaz brûlés hors du cylindre. Pendant la course d'échappement, les soupapes d'admission resteront fermées , Fig.5 (D) . Dans cette course, le piston commence à se déplacer du point mort bas (PMH) au point mort haut (PMH) , 6→1 (Fig.7) et balaie tous les gaz brûlés du cylindre dans l'atmosphère. maintenant, le cycle se répète à partir de la première étape en tant qu'admission. Ces deux temps (c'est-à-dire les temps d'expansion et d'échappement) effectuent un tour complet du vilebrequin . (LAAMARI 2008)

III.4.2. Moteur à quatre temps à allumage par compression :

- Le moteur diesel 4 temps est similaire au moteur essence 4 temps , mais la seule différence est que dans le moteur essence 4 temps , nous utilisons la bougie d'allumage pour allumer le mélange air-carburant. Dans les moteurs diesel (moteurs à allumage par compression), nous utilisons un taux de compression élevé. à l'air pour atteindre une température élevée suffisante pour auto-enflammer le carburant injecté .
- Le taux de compression des moteurs diesel est compris entre 16 et 12, tandis que le taux des moteurs de base est compris entre 6 et 10 .

- Dans le moteur diesel 4 temps, le cycle thermodynamique sera complété dans les quatre temps de la position ou les deux tours du vilebrequin .
- Tous les quatre coups seront complétés dans les 720° de rotation de la manivelle .
- Au cours de ces quatre temps, il y a cinq actions / événements à accomplir. ce sont l'aspiration et la compression la combustion, la détente, l'échappement .
- Le cycle de fonctionnement d'un moteur diesel à quatre temps comprend les mêmes courses qu'un moteur à essence . (Sundar 2018d)

Les détails des différents processus d'un moteur à allumage par compression à quatre temps avec soupapes en tête sont illustrés à la Fig.8 (a-d). Lorsque le moteur termine les cinq événements en mode de cycle idéal, le diagramme pression-volume (p-V) sera comme indiqué sur la Fig.7 .

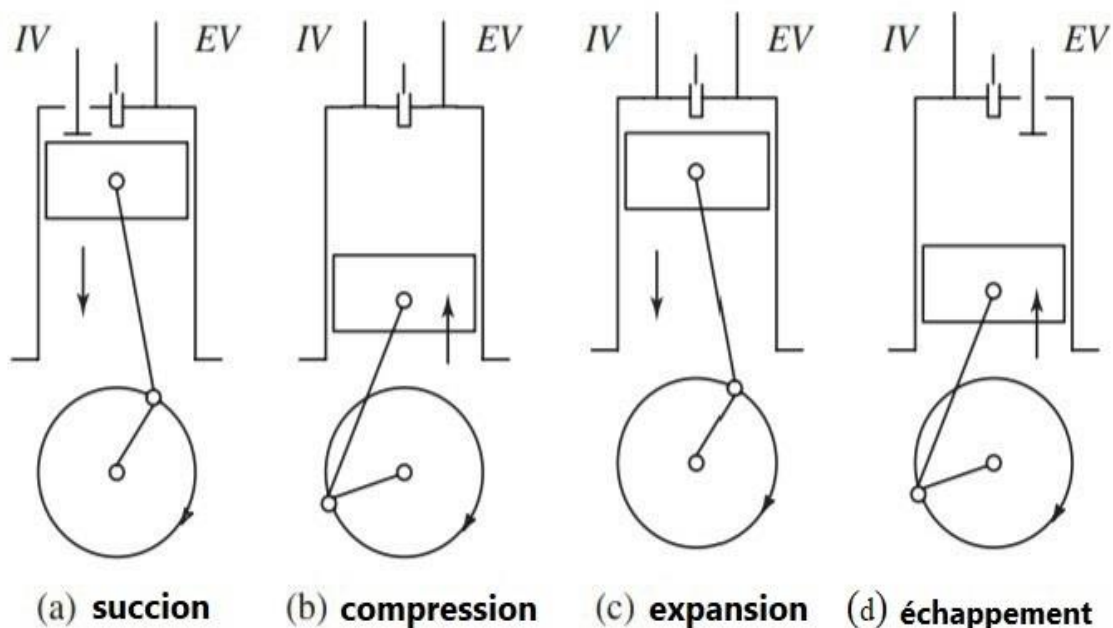


Figure III.8 : Cycle de fonctionnement d'un moteur CI (Sundar 2018d)

- **Course d'aspiration ou d'admission:**

La course d'aspiration commence lorsque le piston est au point mort haut (PMH) et sur le point de se déplacer vers le bas. À ce moment, la soupape d'admission est ouverte et les soupapes d'échappement sont fermées , Fig.8 (a) .

- *Course de compression :*

L'air qui est occupé par le cylindre est comprimé dans le volume de jeu qui est disponible lorsque le piston est au PMH , et Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées. Ce volume est appelé volume de dégagement. Maintenant, le carburant est injecté dans le cylindre par l'injecteur de carburant haute pression à la fin de la course de compression. Du fait de la forte compression de l'air dans le cylindre, la pression et la température de l'air sont augmentées ce qui est suffisant pour auto-enflammer le carburant qui est injecté en fin de course de compression. Ces deux courses (c'est-à-dire la course d'aspiration et de compression) effectuent un tour complet du vilebrequin. soit 360° de rotation du vilebrequin .

- *Expansion ou course de puissance :*

Pendant la course de détente, les soupapes d'admission et d'échappement restent fermées, et La haute pression des produits de combustion pousse le piston du point mort haut (PMH) au point mort bas (BDC) , Fig.8 (C) .

- *Course d'échappement :*

Le piston mobile passe du BDC au TDC Produits de combustion (gaz brûlés). Soupape d'échappement ouverte et admission La vanne est fermée pendant cette course, Fig. 8 (d) (Sundar 2018d)

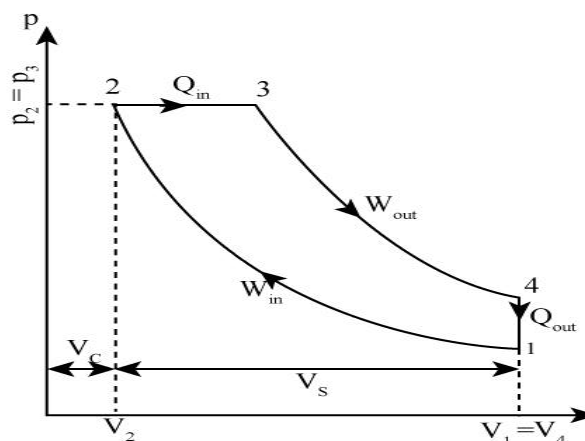


Figure III.9 Diagramme p-V idéal d'un moteur CI à quatre temps . (Study.com)

En raison de pressions plus élevées dans le cycle de fonctionnement, le moteur CI doit être plus robuste qu'un moteur SI pour le même rendement. Cela se traduit par un moteur CI étant plus lourd que le moteur SI. Cependant, il a une efficacité thermique plus élevée en raison du taux de compression élevé (de l'ordre de 18 contre environ 8 en moteurs SI) utilisés .

III.4.3. Moteur 2 temps | Moteur essence 2 temps :

- Dans un moteur 2 temps, le cycle thermodynamique sera complété en un tour de vilebrequin .
- La seule différence entre le moteur 2 temps et le moteur 4 temps est la méthode de prise de la charge (mélange air/carburant) dans le cylindre. Et évacuer les produits de combustion du cylindre .
- Dans le moteur 2 temps, la charge sera remplie à l'aide du ventilateur. Mais en 4 temps du fait du mouvement du piston, l'aspiration du mélange air-carburant sera automatiquement aspirée dans le cylindre .
- Dans le moteur 2 temps, nous utilisons des orifices plutôt que des soupapes .
- Orifice : le fluide peut être actionné vers l'intérieur et vers l'extérieur, Vanne : le fluide ne peut être actionné que dans une seule direction .
- La fermeture et l'ouverture des orifices seront opérées par le mouvement du piston lui-même. Le cycle de fonctionnement d'un moteur 2 temps comprend les temps suivants : Course d'admission, Coup de compression, Expansion ou coup de force et Course d'échappement . (Sundar 2018e)

- *Course d'admission et d'échappement :*

Tout d'abord, la charge sera introduite dans le carter à travers la soupape à ressort. Lorsque le piston se déplace vers le bas, l'orifice de transfert s'ouvre et la charge est poussée dans le cylindre depuis le carter. Cette charge pousse automatiquement la charge dans le cylindre à travers l'orifice de transfert en raison du mouvement vers le bas du piston. De plus, la charge sera aspirée par la soupape à ressort dans le carter pendant le mouvement ascendant du piston. Cette course d'admission sera dite à partir du moment où seule la lumière de transfert est ouverte. Pendant que le port de transfert est ouvert, le port

d'échappement sera également en état ouvert. Mais cet orifice d'échappement est ouvert un peu plus tôt que l'orifice de transfert pour évacuer les particules de combustion de la combustion précédente. Lorsque l'orifice de transfert est ouvert, la charge est poussée dans le cylindre, cette nouvelle charge aide également à pousser les particules de combustion hors du cylindre à travers l'orifice d'échappement. Pour cette action, il y a cette conception de déflecteur sur la tête de piston, de telle manière qu'elle créera l'action Scavenging. Ces deux actions se complètent dans les 180° de rotation du vilebrequin .

- *Course de compression et d'expansion :*

Pendant cette course de compression et cette course d'expansion, les deux orifices seront fermés. La compression se produit lorsque le piston se déplace vers le haut et la course d'expansion se produit lorsque le piston se déplace vers le bas. À la fin de la course de compression, la bougie d'allumage donnera l'étincelle pour allumer la charge, et c'est le début de la course d'expansion également appelée course de puissance. Course de compression et course de détente complètes dans les 180° de rotation du vilebrequin. À la fin de la course d'expansion, la course d'échappement commence lorsque les orifices d'expansion sont ouverts. et la course d'admission commencera également lorsque le port de transfert est ouvert. C'est ainsi qu'un cycle thermodynamique complet se termine dans un moteur 2 temps. Ainsi, dans une rotation de vilebrequin à 360°, les quatre actions complètes seront terminées . (Sundar 2018b)

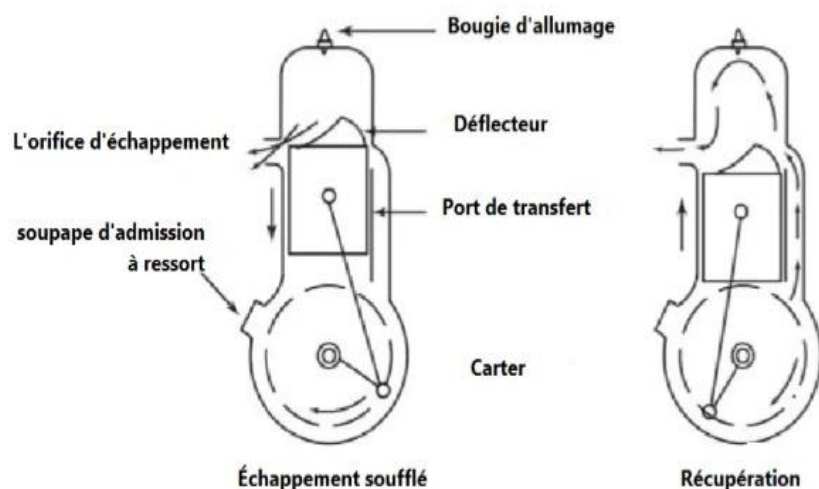
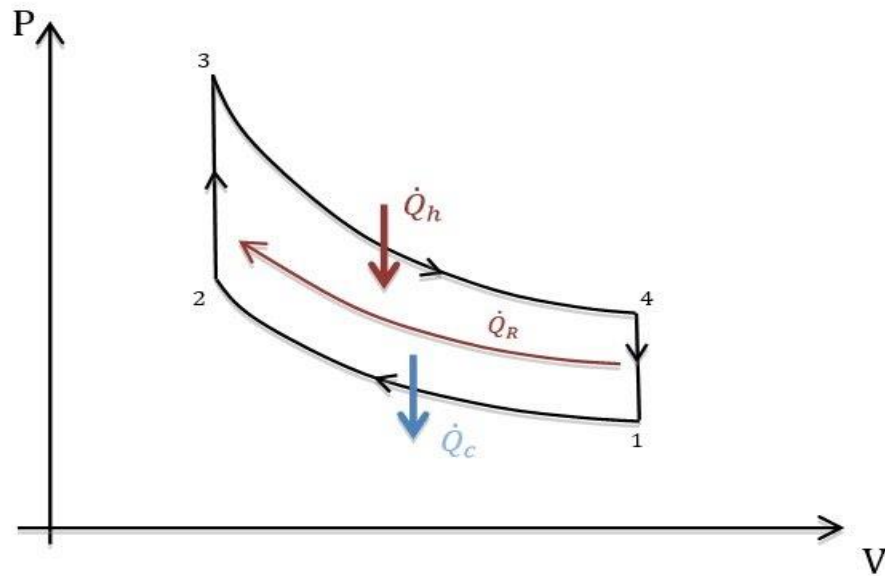


Figure III.10 Moteur SI à deux temps à balayage de carter . (Sundar 2018e)**Figure III.11:** Diagramme p-V idéal d'un moteur SI à deux temps . (Mabrouk 2015)

III.4.4. Comparaison des moteurs à quatre temps et à deux temps :

Tableau III.1 : Comparaison des moteurs à quatre temps et à deux temps . (Sundar 2018f)

<u>Moteur 2 temps</u>	<u>Moteur 4 temps</u>
Une course motrice pour un tour de vilebrequin.	Une course motrice pour deux tours de vilebrequin.
Pour une plus grande puissance par rapport au moteur à quatre temps. Théoriquement deux fois plus de puissance que le quatre temps. (Mais en pratique réelle la puissance est augmentée de 30%)	Moins de puissance de sortie que le moteur à deux temps en raison d'une course de puissance pour deux révolutions de l'arbre de manivelle.
Les moteurs à deux temps auront les ports. (Port : le fluide peut être actionné vers	Les moteurs à quatre temps auront les soupapes. (Vanne : le fluide ne peut être actionné que

l'intérieur et vers l'extérieur)	dans un seul sens)
Moins d'efficacité thermique avec une consommation de carburant élevée	Haute efficacité thermique avec moins de consommation de carburant.
En raison de la conception compacte des deux temps et de la puissance de sortie élevée, ils sont utilisés dans les motos, les scooters et les moteurs hors-bord.	Les moteurs à quatre temps sont utilisés dans tous les véhicules à quatre roues, camions et véhicules lourds
La consommation d'huile de lubrification est élevée	La consommation d'huile de lubrification est faible par rapport aux moteurs à deux temps
Moteur à deux temps Ne peut pas fonctionner avec la même efficacité à .toutes les vitesses	Peut être capable de fonctionner avec la même efficacité à toutes les vitesses

III.5. Application des moteurs CI :

Les utilisations les plus importantes des moteurs thermiques sont le transport terrestre, maritime et aérien. Il comprend également les centrales électriques industrielles et comme moteurs principaux pour les générateurs électriques. Le tableau 1.3 présente, en bref, les applications des variateurs CI et CE

Tableau III.2. Application des moteurs .

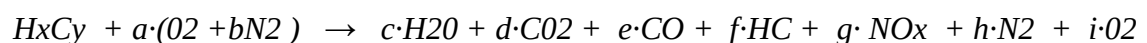
MoteurCI	MoteurCE
----------	----------

Type	Application	Type	Application
Moteurs à essence	Automobile, Marine, Avion	Machines à vapeur	Locomotives, Marin
Moteurs à gaz	Puissance industrielle	Moteurs Stirling	Expérimental Véhicules spatiaux
Moteurs diesel	Automobile, Les chemins de fer, Puissance, Marine	Turbines à vapeur	Puissance, Grand Marin
Turbines à gaz	Puissance, Avions, Industriel, Marin	Gaz à cycle fermé Turbine	Puissance, Marine

III.6. Emission de polluants :

L'une des principales préoccupations des constructeurs aujourd'hui est de réduire les émissions polluantes. Cela est dû aux normes de plus en plus strictes mises en œuvre. Le dioxyde de carbone (CO₂) est un produit majeur de la combustion et contribue à l'effet de serre. Il faut que sa production soit limitée, notamment en limitant la consommation des véhicules. Les sources de polluants dans un véhicule peuvent être divisées en trois catégories : les gaz d'échappement et les vapeurs d'essence (qui proviennent principalement du réservoir) et les gaz de carter (qui sont composés d'huile et de vapeurs d'essence). La combustion complète d'un hydrocarbure produit théoriquement de la vapeur d'eau (H₂O), du dioxyde de carbone (CO₂), de l'azote (N₂) et du dioxyde de soufre (SO₂), ce dernier étant toxique mais émis en faible quantité.

les hydrocarbures sont oxydés selon la formule chimique suivante :



En plus de ces composés, on trouve les familles de polluants dont la production est réglementée par les normes.

- ☐ Le monoxyde de carbone (CO)
- ☐ Les hydrocarbures imbrûlés (HC)
- ☐ Les oxydes d'azote (NO, NO₂) appelés communément NO_x . (LAAMARI 2008)

III.6.1. la formation des principaux :

polluants, existant dans les gaz d'échappement, est exposé comme suit :

- *Gaz carbonique (CO₂)*

Le dioxyde de carbone (CO₂) n'est généralement pas considéré comme un polluant, mais il reste un gaz très nocif qui, lorsqu'il est présent à des concentrations excessives, peut provoquer la suffocation et des changements climatiques qui causent des dommages à long terme à l'environnement. Ce composé est formé à la suite de la combustion complète du carbone dans la chambre de combustion, avec l'apparition occasionnelle d'un stade intermédiaire de monoxyde de carbone.

- *Les hydrocarbures imbrûlés (HC)*

Les hydrocarbures non brûlés (HC) provoquent généralement une irritation des muqueuses humaines. Les hydrocarbures dans les gaz de combustion sont causés par divers facteurs, dont le phénomène d'extinction de flamme qui se produit près des murs où la température est basse et dans les espaces confinés. De plus, une propagation incomplète de la flamme peut se produire dans un mélange léger ou à de faibles charges (pression et température basses), ce qui peut conduire à l'extinction. La composition du carburant affecte la quantité et la qualité des hydrocarbures émis lors du démarrage du moteur et lors de la montée en température. Le lubrifiant moteur qui monte dans la chambre à partir du carter et sort de l'échappement sans combustion est également un facteur contributif, en particulier dans les moteurs diesel où l'injection est coupée pour les véhicules descendant des pentes raides et le frein moteur est appliqué. Enfin, les émissions par évaporation incontrôlées du moteur ou des réservoirs de carburant sont une autre source importante d'émissions d'hydrocarbures .

- *Suie*

La suie, la présence de particules de carbone dans les poumons, est associée à un effet cancérigène. Bien qu'une quantité précise inférieure à 0,05 mg/L soit considérée comme inoffensive, elle génère toujours un effet indésirable et une sensation associée à la pollution de l'air respiratoire. Les particules ultrafines, allant de 1 à quelques microns, pénètrent la barrière muqueuse pulmonaire et entrent dans le système circulatoire, l'obstruant et provoquant des maladies cardiovasculaires. Plusieurs théories expliquent la formation de suie, dont la décomposition du carburant C_xH_y en acétylène puis en suie, la décomposition du carburant C_xH_y en produits aromatiques et en suie, et l'oxydation du monoxyde de carbone en CO_2 ; $2 CO \rightarrow CO_2 + C$.

- *Monoxyde de carbone*

En raison de sa grande affinité pour l'hémoglobine, des concentrations infimes de monoxyde de carbone peuvent provoquer une asphyxie. La formation de dioxyde de carbone peut se produire à partir de la combustion à flamme froide à basse température, de l'oxydation à haute température des hydrocarbures présents dans le carburant, de la décomposition des aldéhydes et de la décomposition du dioxyde de carbone à haute température.

- *Oxydes d'azote*

Même à de faibles concentrations, les oxydes d'azote peuvent irriter les poumons et endommager les muqueuses. Les dangers de la formation d'acide nitrique sont également répandus. La formation de NO_x est liée à trois paramètres fondamentaux, à savoir la présence d'oxygène et d'azote atmosphérique en excès en général dans le moteur diesel, des températures élevées pouvant atteindre 2800 K dans la flamme et derrière le front de flamme, et le temps de séjour de l'azote en présence d'oxygène à haute température . (Malek 2015)

III.6.2. Réduction des émissions polluantes :

Les moyens d'action pour réduire les émissions de polluants dans les gaz d'échappement, dans le cas le plus général des moteurs équipant des véhicules automobiles, dépendent, dans sa partie la plus large, de la technologie des moteurs.

Parce qu'un moteur de véhicule fonctionne sous des charges et des vitesses variables en continu, par opposition à un moteur monocylindre fonctionnant à vitesse constante, il devient nécessaire de considérer d'autres paramètres, y compris la répartition du mélange de carburant entre les différents cylindres, et les défis associés avec réglage de la richesse du mélange pour tous les modes de fonctionnement (par exemple ralenti, charge partielle, pleine charge, ralenti, activation par temps froid) et Fonctionnement en régime transitoire.

En raison de la variabilité des législations d'un pays à l'autre, la majorité des méthodes utilisées pour réduire les polluants sont choisies pour se conformer aux cadres juridiques, ce qui a entraîné des différences dans les méthodes d'échantillonnage des gaz et les techniques d'analyse.

Les moyens d'actions concernent :

- Les paramètres de réglage du moteur .
- Les paramètres de construction du moteur .
- La nature et la composition du carburant .
- Les dispositifs auxiliaires extérieurs au moteur . (Malek 2015)

III.6.2.1. Techniques de réduction des émissions polluantes :

Au cours des dernières décennies, la principale préoccupation dans la conception et le développement des moteurs à essence ou diesel a été la réduction des émissions polluantes. Diverses techniques ont été développées pour cela .

III.6.2.2. Réduction des émissions à la source:

L'une de ces technologies est la réduction des émissions à la source, qui peut être mise en œuvre de deux manières sur les moteurs à essence, soit séparément, soit simultanément. La première méthode implique une combustion à très faible richesse, avec des valeurs de 0,6 à 0,7 requises dans certaines conditions pour atteindre de faibles niveaux de NOx. La deuxième méthode consiste en une recirculation externe d'une partie des gaz d'échappement, communément appelée EGR (Exhaust Gas Recirculation)

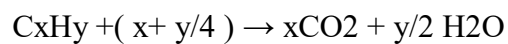
III.6.2.3. Traitement catalytique des gaz d'échappement :

Des 1960, aux États-Unis et en Europe, on examinait la possibilité de traiter les gaz d'échappement par voie catalytique. Initialement, les catalyseurs redox étaient utilisés dans les moteurs à mélange riche. Ensuite, un système de double catalyse a été utilisé, dans

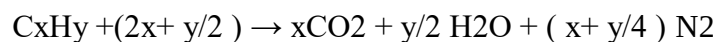
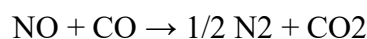
lequel le catalyseur de réduction était suivi de l'introduction d'air, puis le catalyseur d'oxydation. En 1975, le soi-disant "triple" catalyseur a été introduit dans les moteurs CV11, et il a rapidement pris de l'ampleur. Depuis le début des années 1990, la catalyse d'oxydation appliquée aux moteurs fonctionnant avec des mélanges allégés a connu des avancées significatives. Le terme "méthode ternaire" fait référence au traitement simultané de CO, HC et NO_x par des réactions redox. Les deux premiers polluants sont oxydés, tandis que le troisième est réduit .

Les réactions principales mises en jeu, sont les suivantes :

Oxydation : $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$



Réduction : $\text{NO} + \text{H}_2 \rightarrow 1/2 \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$



III.6.2.4. Modification effectuées au niveau de la conception du moteur :

Une augmentation du taux de compression du moteur entraîne une augmentation des émissions d'oxydes d'azote, principalement en raison d'une augmentation de la température des gaz au cours du cycle. Par conséquent, il est nécessaire d'améliorer le taux de compression pour réduire les émissions. À l'inverse, une augmentation du diamètre du piston à pressions moyennes égales fait fonctionner le moteur à plus de charges partielles, ce qui réduit les émissions d'hydrocarbures imbrûlés et d'oxydes d'azote. La présence d'hydrocarbures imbrûlés est une conséquence de l'extinction de la flamme près des parois. Ainsi, il est nécessaire de régler les paramètres de la chambre de combustion pour s'assurer que la teneur en hydrocarbures imbrûlés soit la plus faible possible. Les principaux cadres impliqués dans l'atteinte de cet objectif sont les suivants :

- La taille de la chambre de combustion doit être réduite .
- Les espaces morts, qui comprennent le volume de débit et le volume de course du piston, doivent être réduits jusqu'aux segments les plus précoces, tout en s'assurant

que les « turbulences » causées par la vitesse de reprise du moteur ne sont pas compromises . (Malek 2015)

III.7. COCLUSION :

Dans ce chapitre, un aperçu complet du fonctionnement d'un moteur thermique est donné. Les composants de base du moteur à allumage commandé sont expliqués, ainsi que le principe de fonctionnement des moteurs SI et CI (deux et quatre temps). Dans les zones urbaines densément peuplées, la pollution atmosphérique est devenue un problème urgent. Pour réduire la consommation de carburant et les émissions toxiques produites par les automobiles, les fabricants de moteurs et les ingénieurs en automatisation collaborent pour établir des réglementations appropriées pour régir et gérer les composants du moteur .

Chapitre IV : Technologie d'un bi-carburant

IV.1. Introduction:

Le bi-carburant essence / hydrogène est une technologie utilisée dans les moteurs à combustion interne, permettant un fonctionnement avec deux carburants différents, le carburant principal étant l'essence et le carburant alternatif étant l'hydrogène .

Un système à double carburant se compose de deux circuits d'alimentation en carburant séparés, reliés au moteur par des injecteurs ou un carburateur à sélecteur. Le passage d'un carburant à un autre se fait à l'aide d'une clé située sur le tableau de bord de la voiture manuellement ou automatiquement .

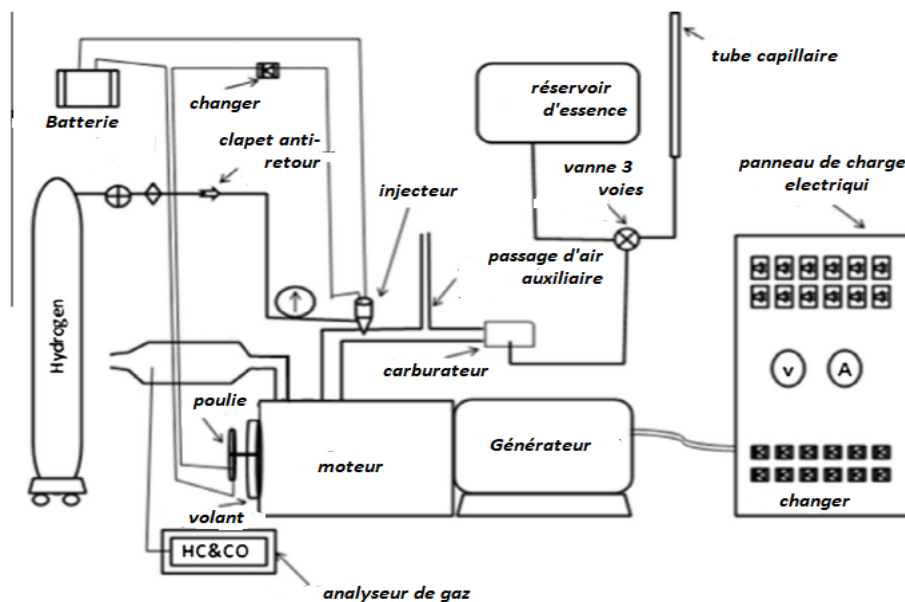
L'utilisation des bi-carburants présente de nombreux avantages, notamment la réduction des émissions polluantes et l'économie de carburant grâce à la possibilité de choisir entre deux sources d'énergie en fonction du coût et des performances. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude du bi-carburant l'essence /hydrogène . (« Définition de bicarburation | Dictionnaire français » s. d.)

Dans cette étude, plusieurs expériences ont été examinées pour mieux comprendre le sujet. L'une de ces expérimentations a été réalisée à l'aide d'un banc d'essai comprenant un bloc moteur essence quatre temps monocylindre, un système de ravitaillement en hydrogène, un analyseur de gaz d'échappement et divers équipements de mesure. Le moteur d'essai consistait en un moteur à allumage commandé couplé à un alternateur. L'incertitude sur la puissance de sortie a été calculée à $\pm 0,3$ W. Le débit d'hydrogène a été contrôlé à l'aide d'un débitmètre à gaz et a été ajusté par la vanne de régulation (vanne à pointeau) .

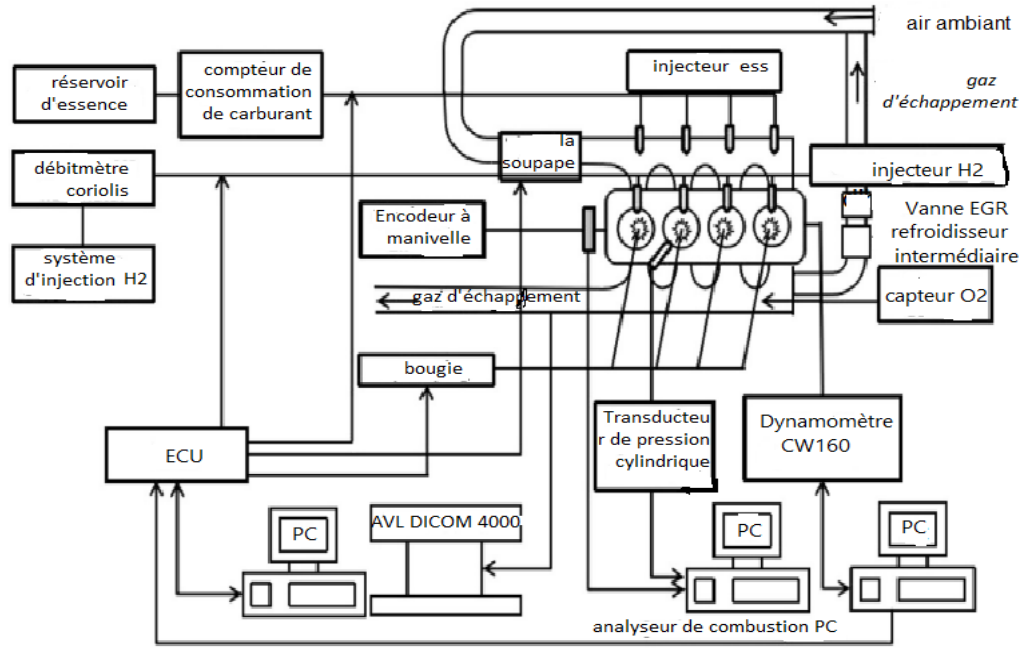
Les tests se sont déroulés en deux temps. Lors de la première étape, le moteur a été testé uniquement à l'essence. Dans la deuxième étape, le moteur a été testé avec un mélange d'essence et d'hydrogène en ajustant la quantité d'hydrogène dans le mélange. Ceci a été réalisé en injectant de l'hydrogène dans l'air pour atteindre (24%, 26%, 27%, 28%, 29%, 31%, 35%, 37%, 49%) en volume dans le mélange hydrogène-air. Après l'injection, d'autres paramètres du moteur, tels que la consommation spécifique de carburant et les émissions d'échappement, sont enregistrés. L'incertitude sur les émissions de gaz d'échappement a été estimée à $\pm 0,2$ % pour les émissions de dioxyde de carbone et à ± 5 ppm pour les émissions d'hydrocarbures. (Elsemary et al. 2016) Où la figure 01 représente le banc d'essai expérimental .

Une autre expérience analysée a été réalisée avec un moteur ST à quatre temps refroidi par eau. Des expériences ont été réalisées avec trois taux d'air en excès (1, 1.2.1.4), cinq fractions énergétiques d'hydrogène ($\alpha = 0$ %, 5 %, 15 %, 20 %, 25 %) et cinq taux d'EGR

(0 %, 6 %, 18 %, 24 %, 30 %). Le moteur tournait à 1500 tr/min et la pression absolue variable (MAP) était de 50 kPa (pas d'EGR). L'angle d'avance à l'allumage est réglé sur MBT. La pression d'injection directe d'hydrogène était de 5 MPa et le calage de l'injection directe était fixé à 105 CA BTDC. Avec l'introduction de l'EGR, une partie du volume d'admission devait être absorbée par les gaz d'échappement. Tout en maintenant une quantité constante d'injection de carburant, l'ouverture du papillon des gaz doit être augmentée à un taux croissant pour rester égale à celle sans EGR. Ainsi, la MAP augmentera à mesure que le taux d'EGR augmentera. L'utilisation de cette méthode réduit la perte d'accélération et améliore la puissance du moteur. Le carburant testé dans l'expérience était de l'essence commerciale produite par PetroChina avec un indice d'octane de recherche de 97 et une fraction volumique d'hydrogène de 99,995 %. (Yu et al. 2019) . La figure 02 montre un diagramme schématique de la configuration expérimentale.



FigureIV.1. Le banc d'essai expérimental . (Elsemary et al. 2016)



FigureIV.2. Diagramme schématisique de l'installation expérimentale . (Yu et al. 2019)

Au cours de la conduite de ces deux expériences, un certain nombre de cadres juridiques ont été mis en place, avec un accent particulier sur ceux jugés les plus importants, à savoir :

La première expérience :

- La puissance de sortie du moteur est déterminée en mesurant l'ampérage et les volts de l'alternateur connecté directement à la plaque de charge (Figure. 1), de sorte que la puissance générée par le moteur est calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$B.P = 1.73 \times V \times I \quad W$$

- La consommation spécifique de carburant a été estimée par la formule suivante :

$$B.S.F.C = \frac{m_{essence} + m_{hydrogen}}{B.P} \quad kg/kw \ h$$

- L'efficacité thermique du frein a été calculée à partir des éléments suivants équation :

$$\eta = \frac{B.P}{(m_{essence} \times CV_{essence}) + (m_{hydrogen} \times CV_{essence})}$$

Deuxième étude :

- Dans cette étude, le COVIMEP est utilisé pour représenter cycle par cycle variantes. Le COV est défini par la formule suivante :

$$\text{COV} = \frac{\sigma x}{x} \times 100\%$$

Où

$$X = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N}$$

$$\sigma x = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - X)^2}}{N}$$

où x représente l'IMEP et N est le numéro ducycles de test d'échantillonnage, qui est fixé à 200.

- Le taux d'addition d'hydrogène est défini comme la fraction énergétique dont la formule est la suivante:

$$\alpha_{H2} = \frac{q_{H2}}{q_{H2} + q_{essence}}$$

où α_{H2} désigne la fraction énergétique de l'hydrogène et $q_{essence}$ et q_{H2} désignent la chaleur produite par l'essence et l'hydrogène, respectivement.

- Nous avons mesuré la teneur en CO_2 dans l'admission, le tuyau d'échappement, et l'atmosphère pour calculer le taux d'EGR en utilisant
- les éléments suivants formule:

$$\text{EGR}_{\text{taux}} = \frac{\phi_{CO2.in} - \phi_{CO2.air}}{\phi_{CO2.ext} - \phi_{CO2.air}} \times 100\%$$

Où $\phi_{CO2.in}$ est la fraction volumique de CO_2 dans l'apport, $\phi_{CO2.air}$ est la fraction volumique de CO_2 dans l'atmosphère, et $\phi_{CO2.out}$ est la fraction volumique de CO_2 dans les gaz d'échappement.

Alors que **Yaodong Duet autres**, ont effectués un travail expérimental dans lequel ils ont étudié un moteur à essence à injection directe d'essence et d'hydrogène dans une fourche, qui a été modifié à partir d'un moteur à injection directe d'essence (GDI). Un système d'alimentation en essence a été installé dans le collecteur d'admission du moteur pour l'injection et le pré-mélange de l'essence. Et connectez la conduite d'hydrogène à la conduite d'alimentation en carburant du moteur d'origine pour fournir de l'hydrogène au cylindre. Il utilisait un ensemble de systèmes d'unité de commande électronique (ECU) pour contrôler l'impulsion d'injection et le calage de l'injecteur qui était situé respectivement au niveau de l'orifice d'admission et du cylindre. L'ouverture du papillon était contrôlée par l'ECU. Un gazoduc a été installé pour diriger les gaz d'échappement vers l'avant depuis le papillon des

gaz et le rapport EGR a été contrôlé électroniquement via la vanne EGR. Ce travail a été effectué dans des conditions telles que le régime moteur était maintenu à 1500 tr/min, le rapport air/carburant relatif était de ($1,0 = \lambda$), la pression d'injection d'hydrogène était de 2 MPa et l'angle de vilebrequin (CA) était de 110° avant le sommet. Point mort (BTDC). La régulation du taux EGR a été obtenue en installant l'injection d'admission de carburant, en réglant le pas de la soupape EGR, puis en augmentant l'ouverture du papillon pour maintenir un rapport air / carburant proportionnel de 1,0. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut réduire la perte de pompage du moteur et ainsi augmenter l'efficacité thermique. Le taux d'addition d'hydrogène varie en fonction de la modulation de largeur d'impulsion d'injection d'hydrogène, le taux d'addition d'hydrogène est déterminé comme suit : La vitesse du moteur a été maintenue à 1 500 tr/min et le rapport air/carburant relatif était de ($1,0 = \lambda$) sans EGR ni hydrogène ajouté. L'ouverture initiale était pour le papillon ϕ (H2). 12,5 %. L'ouverture des gaz a été maintenue fixe en position ϕ (H2). Les caractéristiques d'émission et de casse du moteur pour les différents taux d'ajout d'hydrogène ont été fixées à %0 %5 %25 . L'ouverture du papillon est augmentée tant que l'EGR R reste égal à celui sans EGR sous courant ϕ (H2). L'avantage de cette méthode est qu'elle peut réduire la perte d'accélération et augmenter l'efficacité thermique du moteur. La figure 03 représente les composants du système expérimental pour cette étude .

Une étude pilote a également été réalisée par **Peng Sunet autres** .Ils ont utilisé un moteur à essence à quatre temps à double injection refroidi par eau pour répondre aux besoins de l'expérience, et le système d'alimentation en hydrogène a été installé sur la base de l'original. Injection directe qui peut réaliser une commutation flexible entre le mode GD et le mode d'injection HDI. L'unité de commande électronique (ECU) peut contrôler avec précision et efficacité l'injection de carburant, l'allumage, modifier les conditions de travail et obtenir des signaux. Alors que l'objectif principal de cette expérience était d'étudier les effets de différents rapports de mélange et conditions de fonctionnement sur le bilan de puissance d'un moteur à essence en modes d'injection PFI + GDI et PFI + HDI lors des essais, les carburants à injection directe ont été divisés en deux types : Hydrogène, essence et carburant injecté L'orifice d'admission était de l'essence. La pression d'injection directe a été fixée à 5 MPa et la pression de l'orifice d'admission à 0,38 MPa. Le temps d'injection de l'orifice, le temps d'injection directe et le coefficient de dépassement d'air ont été déterminés à 300° CA BTDC 120° CA BTDC et 1, et l'angle d'avance à l'allumage optimal a été déterminé au stade précoce. La température de sortie de l'eau de refroidissement est fixée à $80 \pm 1,5^\circ\text{C}$ pour

faciliter le calcul. Afin de réduire le coût, Une approche de contrôle variable a été adoptée. Lors de l'étude du rapport de mélange, la vitesse constante était de 1500 tr/min, le taux de chargement était de 54% (le taux de chargement défini comme le rapport de la pression d'admission et de la pression atmosphérique ambiante), et le rapport de mélange prenait cinq points de 0 à 20% . En parlant de vitesse, le rapport de mélange statique était de 10 %, le rapport de charge était de 54 % et la vitesse était de 1200, 1500 et 1800 tours par minute, respectivement. Lors de la vérification du facteur de charge, le rapport de mélange statique était de 10 %, la vitesse était de 1 500 tr/min et la charge était réglée sur 44 %, 54 % et 64 % respectivement. En raison des propriétés physiques et chimiques uniques de l'hydrogène, cette étude a choisi une vitesse et une charge faibles et moyennes pour éviter les collisions sous forte charge. Le carburant à injection directe est utilisé uniquement pour un mélange combustible stable, de sorte que le rapport de mélange (le rapport de l'énergie libérée par cycle de carburant à injection directe à l'apport d'énergie total dans le cylindre) ne doit pas être trop grand et 20% est suffisant. La figure (4) représente les composants du système expérimental pour cette expérience .

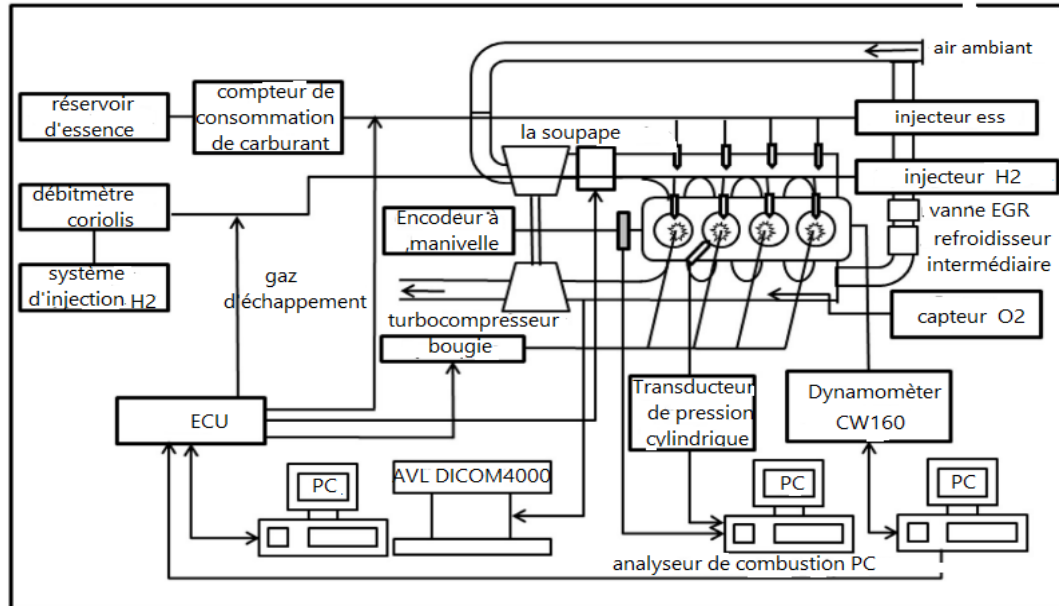
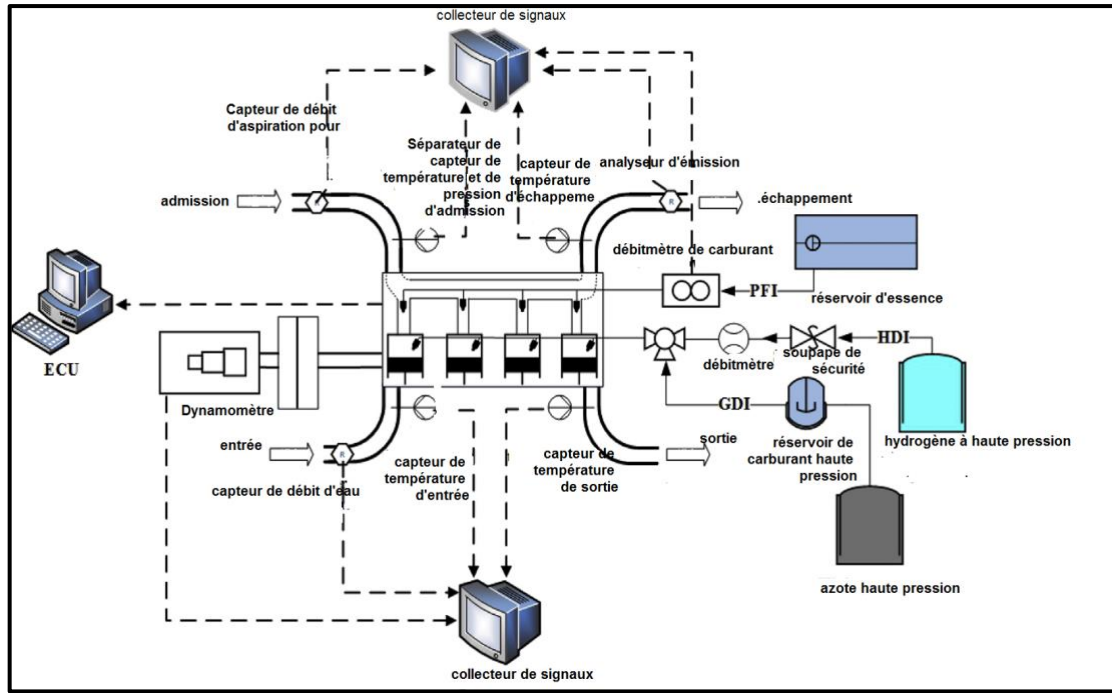


Figure IV.3. Composants du système expérimental . (Du et al. 2017)



FigureIV.4.Disposition du système expérimental . (Sun et al. 2019)

Aussi, dans ces deux expériences, un certain nombre de cadres juridiques ont été adoptés dont les plus importants sont :

Troisième étude :

- $\phi(H_2)$ est déterminé selon l'équation suivante :

$$\phi(H_2) = \frac{m(H_2)H_{\mu}(H_2)}{m(H_2)H_{\mu}(H_2) + m(carburant)H_{\mu}(carburant)}$$

Dans l'éq , $H_m(H_2)$ et $H_m(carburant)$ sont le pouvoir calorifique (kJ/kg) del'hydrogène et l'essence, respectivement, et $m(H_2)$ et $m(carburant)$ sont

- Pour calculer le taux d'EGR, la teneur en dioxyde de carbone dansL'admission, l'échappement et l'atmosphère ont été mesurés par l'expérience mentale avec la formule suivante :

$$EGR \text{ taux} = \frac{\phi_{co2.in} - \phi_{co2.back}}{\phi_{co2.ext} - \phi_{co2.back}} \times 100\%$$

ϕ_{co2-in} est la fraction volumique de CO2 dans l'admission, et $\phi_{co2-back}$ est la

Une fraction du dioxyde de carbone se trouve dans l'atmosphère, et 4 est le dioxyde de carbone à l'extérieur La fraction de dioxyde de carbone dans les gaz d'échappement.

Quatrième étude :

- le rapport de mélange a été défini comme le rapport de l'énergie émise par chaque cycle de carburant à injection directe pour l'apport total d'énergie dans le cylindre:

$$\phi_{DI} = \frac{MDI \times L_x}{MDI \times L_x + MFI \times L_g} = \frac{Q_{DI}}{Q_{DI} + Q_{FI}}$$

Dans la formule, ϕ_{DI} indique le rapport de mélange ; MDI signifie la masse de carburant à injection directe (DI) (kg) (hydrogène ou essence); L_x est le faible pouvoir calorifique du carburant DI ; MFI représente la qualité de l'essence injectée dans le cylindre par l'orifice d'admission (kg) ; L_g indique une faible valeur calorifique de l'essence ; Q_{DI} signifie la libération d'énergie du carburant DI (kJ), Q_{FI} représente la libération d'énergie du carburant de l'orifice d'admission (kJ), ($Q_{DI} + Q_{FI}$) est la libération d'énergie totale de la combustion du carburant (kJ) .

- Au cours de l'essai, il a été constaté que l'erreur de mesure était au-delà de la plage tolérable (erreur de 10 %) à faible débit. Par conséquent, la formule suivante a été utilisée pour déduire le MDI :

$$\lambda = \frac{M_{air}}{M_{fi} \times A_{Fg} + M_{di} \times A_{Fx}}$$

Dans la formule, M_{air} désigne la masse ingérée (kg) ; A_{Fg} représente le rapport air-carburant stoechiométrique de l'essence; dans GDI mode, A_{Fx} désigne le rapport air-carburant stoechiométrique de l'essence ; en mode HDI, A_{Fx} indique le rapport air-carburant stoechiométrique de l'hydrogène.

- Méthode de calcul du bilan thermique Le système d'entrée d'énergie comprend l'énergie chimique (Q_f) générée par le combustible brûlé et la chaleur (Q_{in}) véhiculée par l'air d'admission. Et la production d'énergie du système est divisée en quatre aspects : travail effectif (Q_w), chaleur de l'eau de refroidissement (Q_c), chaleur d'échappement (Q_{out}) et perte de chaleur non comptée (Q_{un}) . l'équation du bilan thermique est la suivante:

$$Q_f + Q_{in} = Q_w + Q_c + Q_{out} + Q_{un}$$

- Q_f peut être calculé par la formule suivante :

$$Q_f = \sum_1^1 L_x \times M_x$$

IV.2. Variation d'indice d'octane :

Les études menées jusqu'à présent ont généralement conclu de manière positive quant à l'ajout d'hydrogène à l'essence en ce qui concerne l'indice d'octane du mélange. Cette pratique permet de réduire le risque de cliquetis, d'améliorer la combustion, d'optimiser les performances du moteur et de réduire les émissions polluantes .

Une étude publiée dans le "Journal of Energy Engineering" en 2017 s'est penchée sur l'effet de l'ajout d'hydrogène à l'essence sur l'indice d'octane. Les résultats ont démontré une augmentation de l'indice d'octane allant jusqu'à 8 points grâce à l'ajout d'hydrogène .

Une autre étude, parue dans le "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power" en 2015, a également examiné les effets de l'ajout d'hydrogène à l'essence sur l'indice d'octane. Les chercheurs ont observé une augmentation d'environ 7 points de l'indice d'octane grâce à l'ajout d'hydrogène .

Une étude publiée dans l'"International Journal of Hydrogen Energy" en 2013 s'est intéressée aux effets de différents pourcentages d'hydrogène dans le mélange essence-hydrogène sur l'indice d'octane. Les résultats ont indiqué une augmentation significative de l'indice d'octane pouvant atteindre 10 points grâce à l'ajout d'hydrogène à l'essence .

Enfin, une étude parue dans " Fuel Processing Technology " en 2008 a examiné l'effet de l'ajout d'hydrogène à l'essence non seulement sur l'indice d'octane, mais également sur les émissions de gaz d'échappement. Les résultats ont montré que l'ajout d'hydrogène à l'essence permettait d'augmenter l'indice d'octane tout en réduisant les émissions de gaz d'échappement nocifs .

Ces différentes études ont contribué à démontrer les avantages potentiels de l'ajout d'hydrogène à l'essence en termes d'indice d'octane, de performances du moteur et de réduction des émissions polluantes .

IV.3.Émissions de gaz:

La principale préoccupation des constructeurs est aujourd'hui de réduire les émissions polluantes dans l'environnement et de se conformer à des normes strictes. Le dioxyde de carbone (CO₂) en particulier est un produit de combustion inévitable qui contribue à l'effet de serre et sa production doit être limitée, en réduisant la consommation des véhicules. . Il existe trois sources de polluants dans une voiture : les gaz d'échappement, les vapeurs d'essence, provenant principalement du réservoir, et les gaz de carter, constitués de vapeurs d'huile et d'essence. Il existe des catégories de polluants dont la production est réglementée par des normes. Ce sont :

- le monoxyde de carbone (CO) .
- les hydrocarbures imbrûlés (HC) .
- les oxydes d'azote (NO_x) .

IV.3.1. Émissions de NO_x :

XiuminYu et autres , obtiennent qu'après avoir ajouté 5% d'hydrogène, à mesure que le taux d'EGR augmente, les émissions de NO_x diminuent. Alors que 18% EGR a un effet significatif sur la réduction de NO, qui atteint un maximum d'environ 82,7%, 77,8% et 60% par rapport aux valeurs sans EGR de $\lambda = 1,0$. et 1.2 et 1.4, respectivement. Les émissions de NO_x ne montrent qu'une légère diminution avec l'augmentation de l'EGR lorsque l'EGR est

supérieur à 18 %, et il ressort des trois chiffres que l'introduction de l'EGR entraîne des émissions de oxydes d'azote inférieures à la valeur de référence .De plus, les émissions de NOx diminuent d'abord puis augmentent avec α_{H2} jusqu'à 1,4, et les émissions de NOx à 5% H2 sont inférieures à celles de l'essence pure. En effet, le mélange est très léger à 1,4, et la combustion est instable en l'absence d'hydrogène ajouté .Nous concluons de ce que nous avons mentionné, que la combinaison de l'EGR et de l'ajout d'hydrogène compense non seulement l'entrave de l'EGR lors de la combustion, mais réduit également l'augmentation des émissions de oxydes d'azote causée par l'ajout d'hydrogène, de sorte que la combustion et les émissions du moteur sont grandement améliorées. figure. 9 - 11 montre les émissions de NOx par rapport à α_{H2} pour différents EGR de $\lambda=1$, 1,2 et 1,4 respectivement .

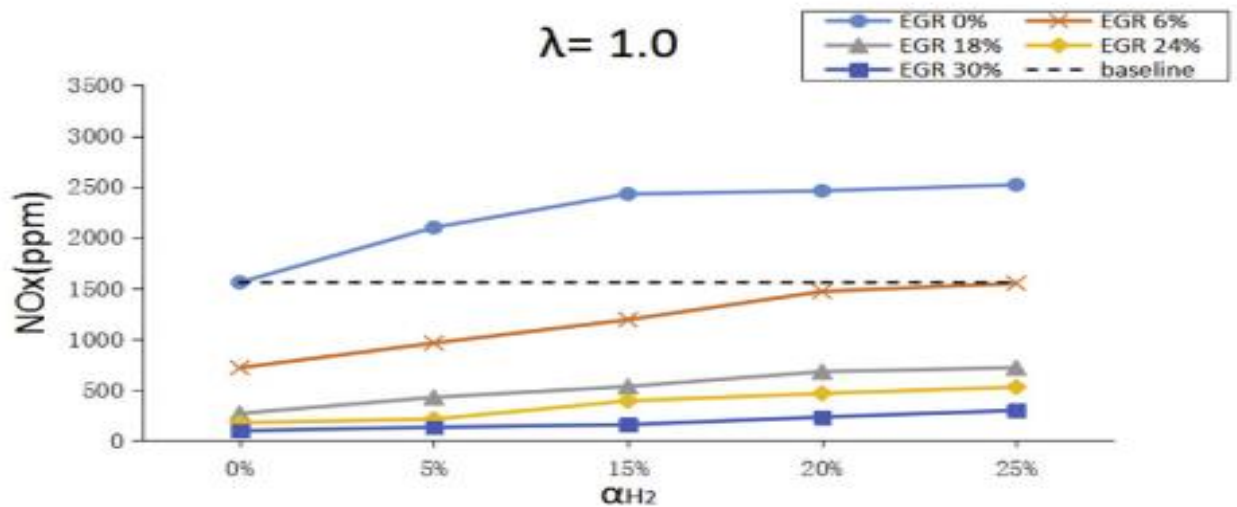


Figure.IV.5 :NOx versus α_{H2} pour différents taux d'EGR à $\lambda=1,0$.

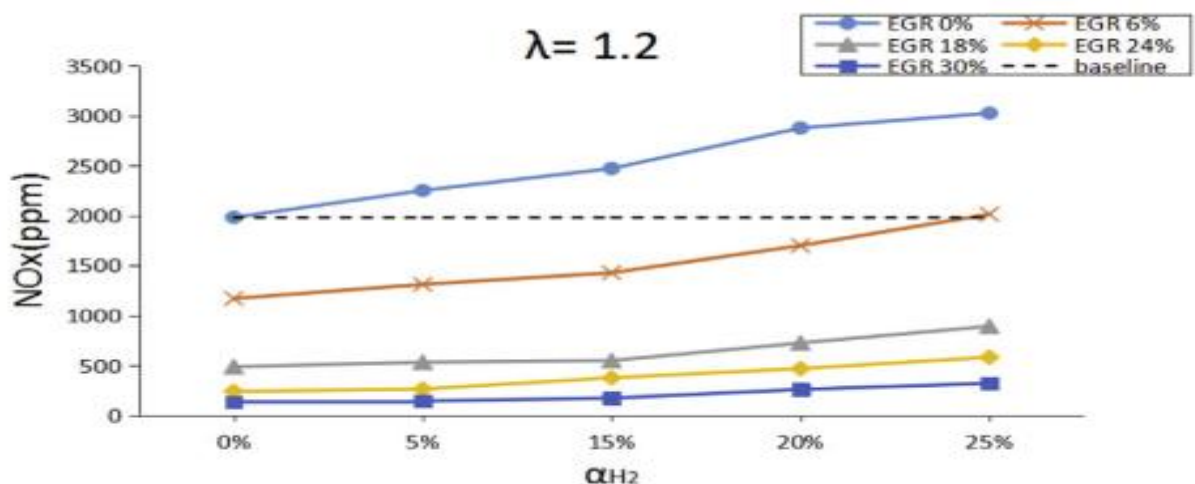


Figure.IV.6 NOx versus α_{H2} pour différents taux d'EGR à $\lambda=1,2$.

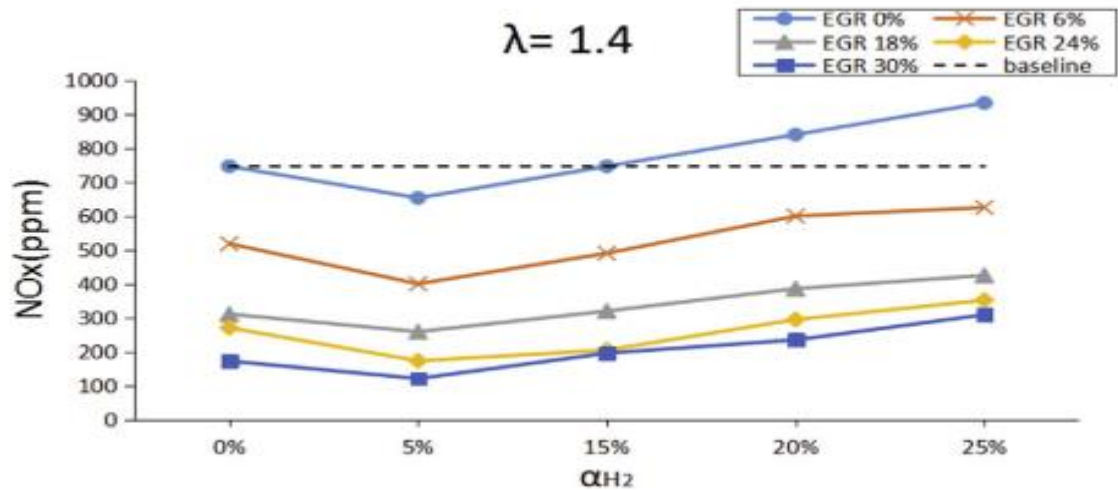
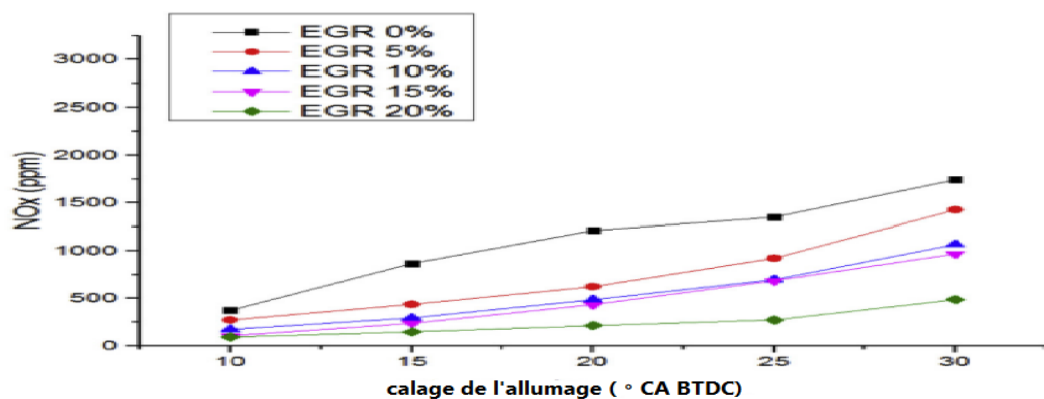
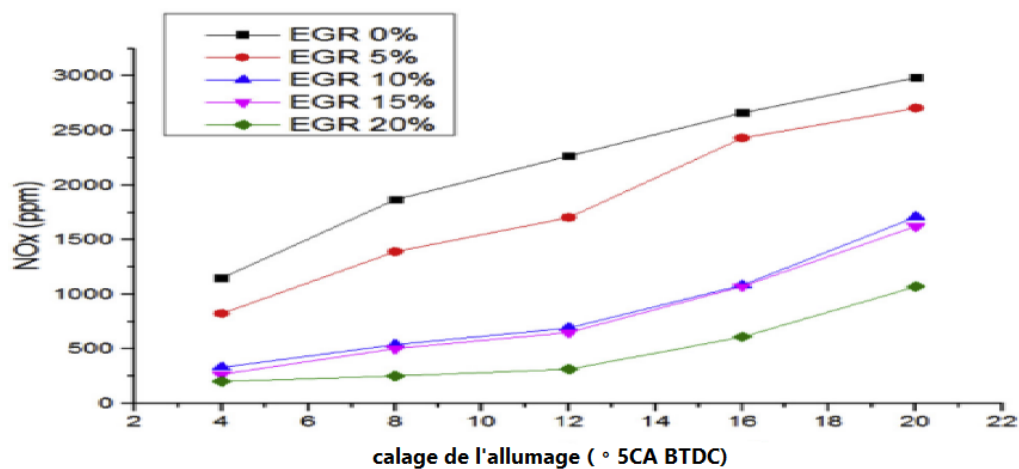


Figure.IV.7 NOx versus α_{H_2} pour différents taux d'EGR à $\lambda = 1,4$. (Yu et al. 2019)

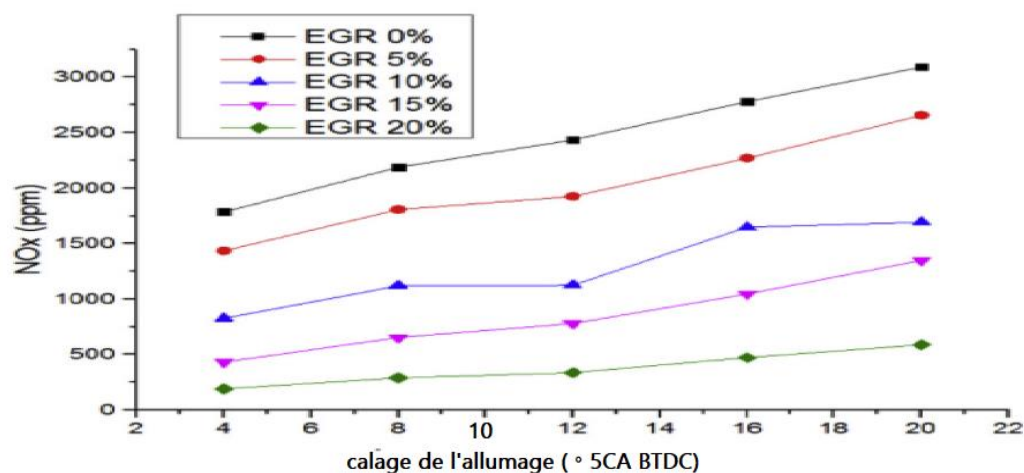
Alors que **YaodongDu et autres**. Les émissions de NOx diminuent progressivement à mesure que le calage de l'allumage est retardé. Lors de l'ajout de 0 % d'hydrogène, 0 % d'EGR, les émissions de oxydes d'azote ont diminué de 1 741 ppm à 374 ppm. Autrement dit, les émissions de NOx ont diminué de manière significative après l'EGR, lorsque le taux d'EGR était de 20 %, les émissions de oxydes d'azote ont diminué de 486 ppm à 92 ppm. L'effet de l'EGR sur les émissions de oxydes d'azote est significatif. Les émissions de NOx diminuent progressivement avec une ondulation dans l'EGR, car la capacité calorifique spécifique des gaz d'échappement est élevée, ce qui abaisse la température du cylindre. Les gaz d'échappement peuvent diluer l'air frais, ralentir le taux de combustion et réduire la température du cylindre, réduisant ainsi les émissions de NOx. Augmentation des émissions d'oxyde d'azotes ou d'ainement après avoir ajouté de l'hydrogène. Dans le calage de l'allumage 5 AC BTDC, lorsque l'EGR est de 0 %, les émissions de oxydes d'azote augmentent de 374 ppm avec une augmentation de 0 % d'hydrogène à 1 786 ppm avec une augmentation de 25 % d'hydrogène. Donc, un mélange d'hydrogène et d'EGR L'injection directe réduit les émissions de oxydes d'azote . La figure 8 montre l'effet de l'EGR sur les émissions de NOx pour différents calages d'allumage. La figure 8(aec) montre la relation entre les émissions de NO et le moment de l'allumage pour des taux d'ajout d'hydrogène de 0 %, 5 % et 25 %, respectivement .



(a) des taux d'ajout d'hydrogène de 0 %



(b) des taux d'ajout d'hydrogène de 5 %



(c) taux d'ajout d'hydrogène de 25 %

Figure.IV.8 Effet du taux d'EGR sur l'émission de NO_x pour différents . (Du et al. 2017)

IV.3.2. Émissions de CO :

Les résultats d'*Elsemary et autres* sont montrés que le monoxyde de carbone n'est présent que dans les gaz d'échappement des moteurs. est causée par une combustion incomplète en raison d'une quantité insuffisante d'air entrant dans le mélange air-carburant ou d'un temps de cycle insuffisant pour terminer la combustion. En mélangeant mieux le carburant avec l'air et en le remplissant avec plus d'air, une combustion complète peut être obtenue. En ce qui concerne un moteur à essence, cela dépend aussi de la qualité du carburant qui est vaporisé (carburé ou carbonaté) et bien mélangé. En conséquence, les moteurs à essence produisent une proportion importante de dioxyde de carbone lors du démarrage à froid, lorsque le carburant s'évapore incomplètement et que le mélange est pauvre en quantité ou en air. Mélanger de l'hydrogène avec de l'air est une tâche facile car il s'agit d'un combustible gazeux. donc le moteur est moins agile que l'essence et émet moins de CO₂.

Il a été observé que l'augmentation de la part d'hydrogène réduit la quantité de gaz carbonique à l'échappement pour une même puissance du fait de la vitesse de flamme élevée du mélange hydrogène-essence et de la température élevée, mais après craquage de l'hydrogène de 31%, l'émission de dioxyde de carbone augmente à nouveau en raison d'une combustion insuffisante, d'une faible puissance de sortie et d'une basse température.

La figure (IV.9) montre l'effet du débit d'hydrogène sur la concentration de dioxyde de carbone dans les gaz d'échappement force :

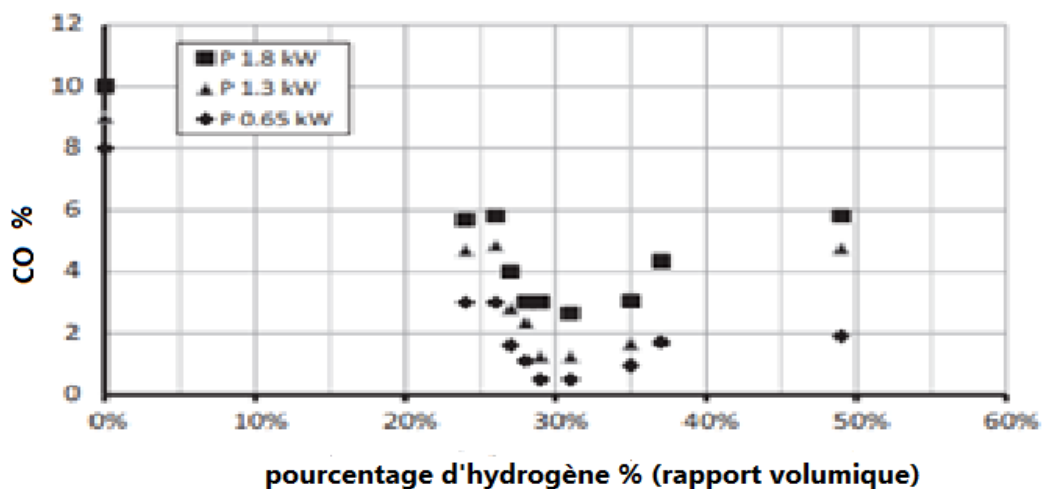


Figure. IV.9. Effet du débit d'hydrogène sur la concentration de CO dans les gaz d'échappement à différentes puissances. (Elsemary et al. 2016)

Alors que les résultats de cette étude ont montré que les émissions de dioxyde de carbone diminuent avec l'augmentation de α_{H_2} . Cela est principalement dû au fait que la quantité d'essence injectée diminue à mesure que la quantité d'hydrogène ajoutée augmente, ce qui peut réduire la quantité de carbone dans un carburant hybride. Dans le même temps, l'augmentation de la quantité d'hydrogène ajoutée peut augmenter le taux de combustion du

mélange dans le cylindre, ce qui est propice à la réduction des émissions de dioxyde de carbone .

De plus, les émissions de CO augmentent avec le taux d'EGR . C'est parce que les gaz d'échappement augmentent La capacité calorifique spécifique du mélange du cylindre, réduisant ainsi la température à l'intérieur du cylindre afin que le monoxyde de carbone ne puisse pas être complètement oxydé en CO₂ .

Nous notons que lorsque le α_{H2} est supérieur à 20 %, les émissions de monoxyde de carbone ne montrent qu'un petit changement avec des augmentations de α_{H2} . En effet, la grande quantité d'injection d'hydrogène compense l'instabilité de la combustion Causée par les gaz d'échappement, l'élévation de température à l'intérieur du cylindre peut accélérer l'oxydation du dioxyde de carbone . (Yu et al. 2019)

La figure IV.10 montre les émissions de CO en fonction de l'EGR de α_{H2} pour différentes valeurs à $\lambda=1,2$ et $1,4$:

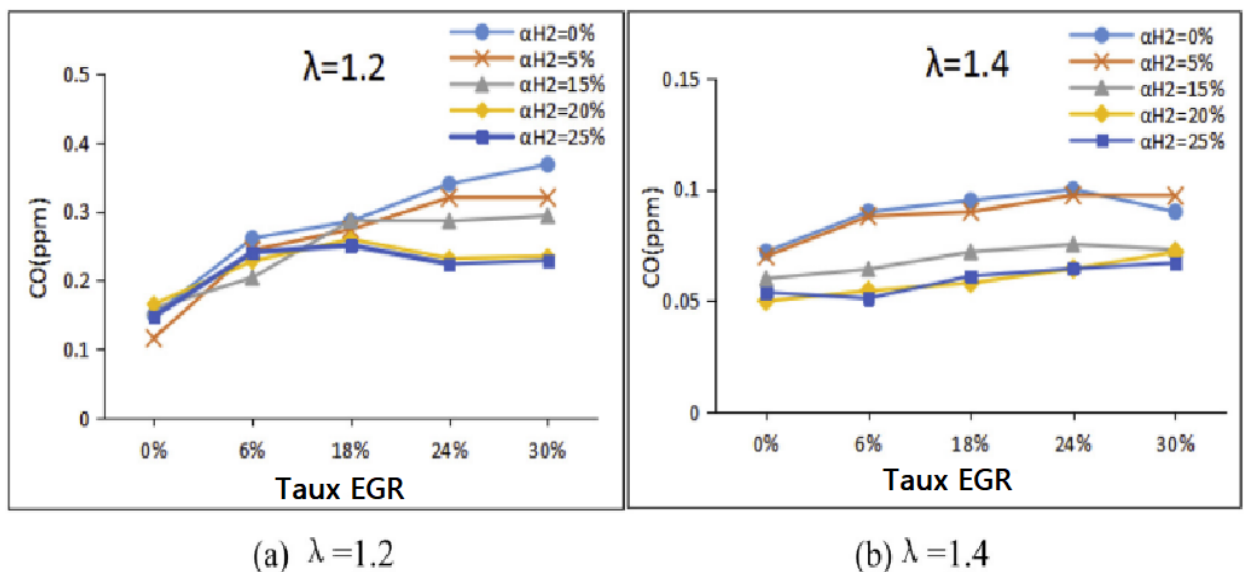


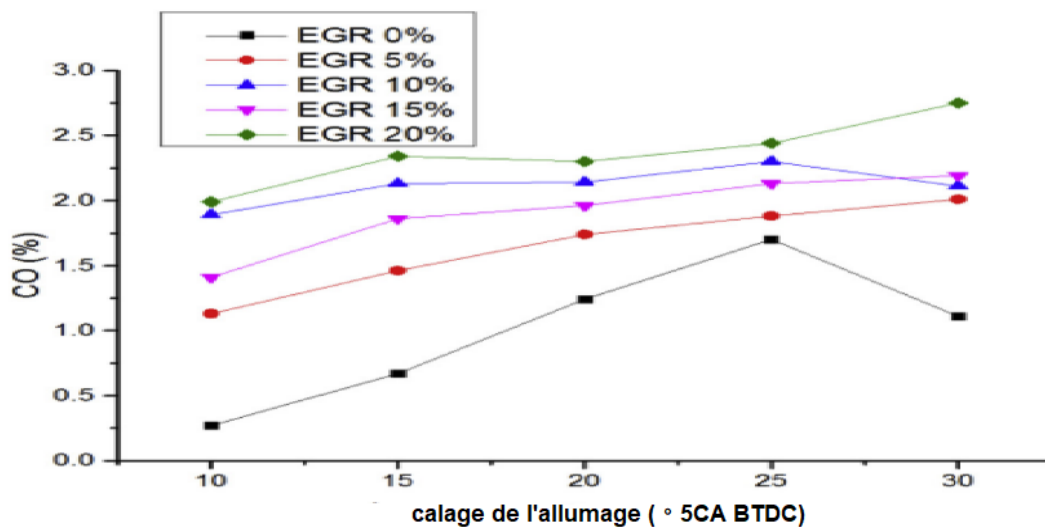
Figure. IV.10 : Émissions de CO en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda= 1,2$ et $1,4$. (Yu et al. 2019)

En ce qui concerne cette étude, ils ont constaté que l'angle d'avance à l'allumage avait peu d'effet sur les émissions de monoxyde de carbone dans le moteur. Le monoxyde de carbone étant un produit intermédiaire du processus de combustion, la teneur en oxygène du mélange combustible est importante pour contrôler les émissions de monoxyde de carbone . Au même rapport air/carburant relatif, l'angle d'avance à l'allumage a moins d'effet sur les émissions de CO .

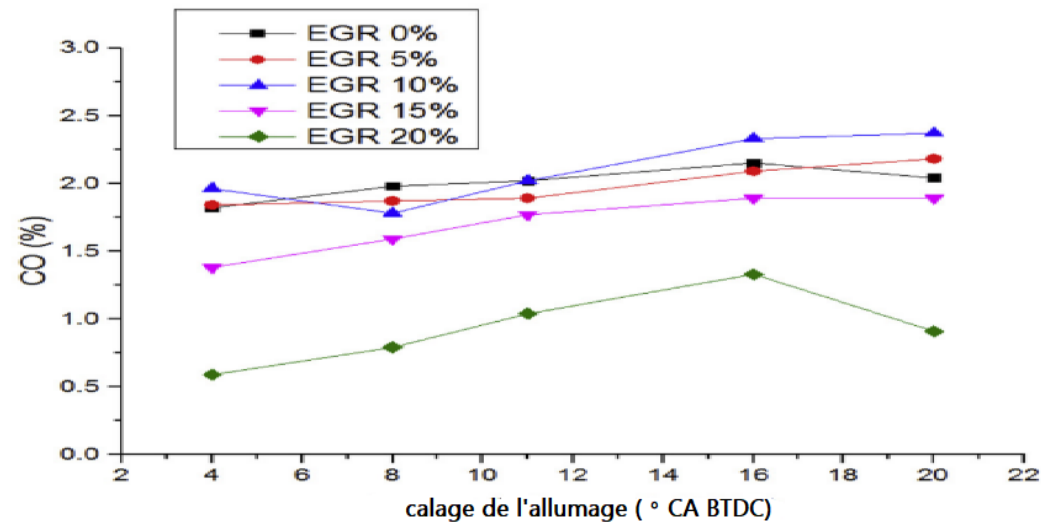
Augmenter les émissions de CO pour augmenter le taux d'EGR. En raison de l'EGR, le monoxyde de carbone ne peut pas être complètement oxydé en CO₂. L'EGR réduit le taux de combustion, donc la température du cylindre est plus basse et le taux d'oxydation du monoxyde de carbone diminue, ce qui entraîne une augmentation des émissions de monoxyde de carbone .

L'ajout d'hydrogène peut réduire les émissions de CO dans le moteur en partie parce que la fraction massique de carbone dans le carburant est réduite, et donc les émissions de monoxyde de carbone sont réduites. L'ajout d'hydrogène améliore considérablement les conditions de combustion, ce qui permet au carburant de brûler plus complètement. La durée de montée en température est plus longue dans le cylindre, donc plus de CO peut être oxydé en CO₂ .

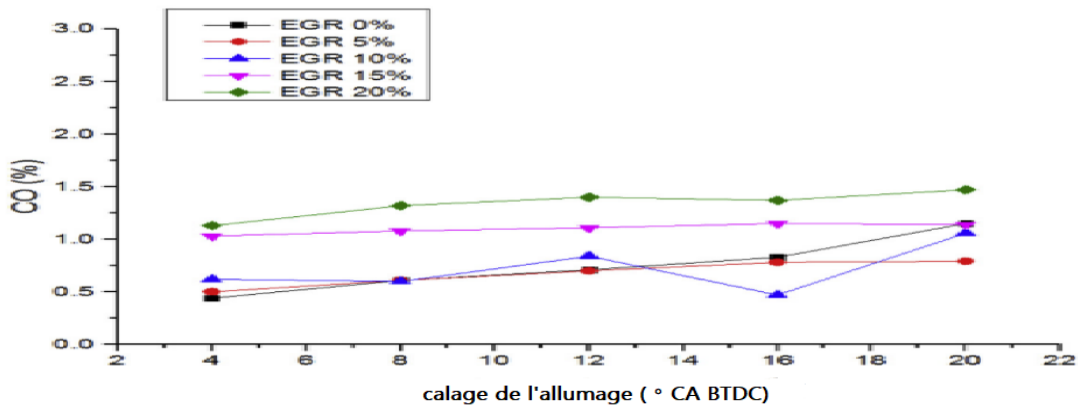
Dans le calage d'allumage de 10 CA BTDC, l'EGR est de 20 %, l'ajout d'hydrogène est de 0 % et les émissions de CO₂ sont réduites de 1,99 % à 1,03 % avec l'ajout d'hydrogène de 25 %, qui est réduit de 48,2 %. (Du et al. 2017) .La figure 11 (a à c) montre la relation entre les émissions de dioxyde de carbone et le moment de l'allumage pour des taux d'addition d'hydrogène de 0 %, 5 % et 25 %,respectivement .



(a) des taux d'ajout d'hydrogène de 0 %



(b) des taux d'ajout d'hydrogène de 5 %



(c) taux d'ajout d'hydrogène de 25 %

Figure. IV. 11 Effet du taux d'EGR sur les émissions de CO à différents horaires d'allumage (Du et al. 2017)

IV.3.3. Émissions de HC:

La quantité d'hydrocarbures dans les gaz d'échappement diminue en tant que fraction d'hydrogène Augmente en raison de la vitesse de flamme élevée du mélange essence-hydrogène Ce qui conduit à une augmentation de la température de la paroi du cylindre et Réduire la suppression des flammes, mais la quantité d'émissions de HCII augmente à nouveau lorsque la fraction d'hydrogène atteint plus de 31% en raison d'une diminution de la quantité d'air dans le cylindre et de la hauteur Vitesse de la flamme de l'hydrogène qui consomme plus d'air que l'essence Pour que la quantité d'air restante ne soit pas suffisante pour brûler La quantité d'essence qui augmente la quantité d'imbrûlés hydrocarbure.

(Elsemary et al. 2016) .La figure 4 montre l'effet du débit d'hydrogène sur l'hydrocarbure non brûlé avec une capacité différente :

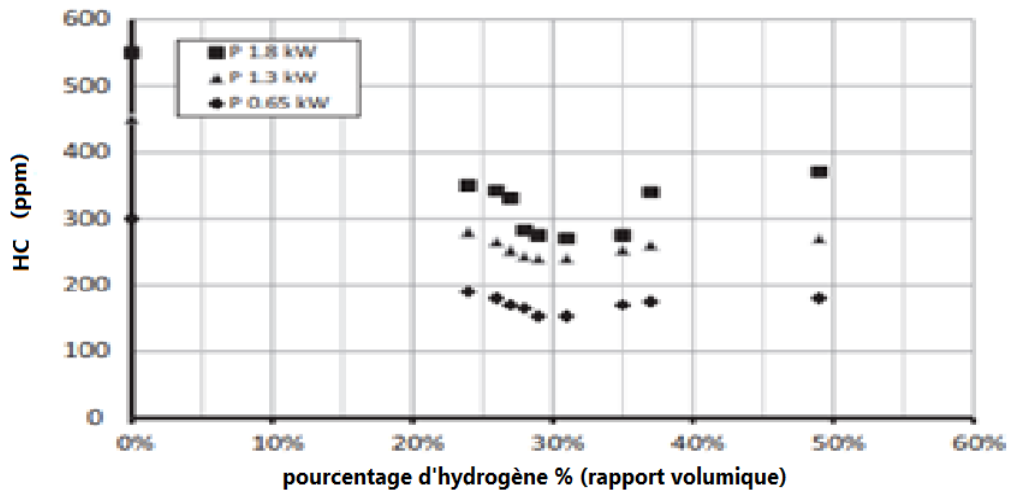


Figure IV.12. Effet du débit d'hydrogène sur l'hydrocarbure non brûlé à différents Pouvoir .
(Elsemary et al. 2016)

Alors que **XiuminYu et autres** ont conclu que les émissions de HC diminuent continuellement avec l'augmentation de H. Cela est dû à trois raisons principales :

Tout d'abord, à mesure que H₂ augmente, la quantité d'essence injectée diminue et l'hydrogène n'a pas de composant HC, ce qui réduit les émissions de HC .Deuxièmement, en raison de la faible énergie d'allumage et de la vitesse de flamme laminaire de l'hydrogène, l'ajout d'hydrogène est bénéfique pour former un noyau de flamme stable, accélérer le processus d'oxydation des HC et réduire l'effet de refroidissement des parois .Troisièmement, l'angle d'avance à l'allumage, qui a été réglé sur le MBT au cours de cette expérience, diminuera avec l'augmentation de H en raison de l'augmentation de la vitesse de propagation de la flamme par l'ajout d'hydrogène. Il est également propice à l'augmentation de la température des gaz d'échappement et à l'accélération de l'oxydation des émissions de HC. Pour ces trois raisons, les émissions de HC diminuent lorsque H augmente. Lorsque 1, à mesure que le taux d'EGR augmente, les émissions de HC diminuent légèrement Au début, puis en augmentant rapidement, atteignant la valeur la plus basse avec une moyenne de 18 % d'EGR. En effet, lorsque le taux d'EGR est inférieur à 18%, plus le taux d'EGR augmente, plus la quantité de gaz d'échappement introduite dans le cylindre augmente, ce qui peut améliorer l'atmosphère thermique dans le cylindre et favoriser l'oxydation des HC. Lorsque l'EGR est continuellement augmenté à $\lambda=1$, 1,2 et 1,4 , l'effet négatif des gaz d'échappement sur la combustion conduit à une augmentation de la combustion partielle entraînant une forte augmentation des émissions de HC .Alors que les émissions d'hydrocarbures affichent une légère augmentation de moins de 18% EGR. Compte tenu de l'effet inflationniste de l'EGR sur les émissions d'hydrocarbures, un taux d'EGR de 18 % peut être considéré comme une amélioration .A noter qu'à 1,4 les émissions d'hydrogène de l'essence pure sont très élevées avec des EGR de 24% et 30% qui sont supérieurs à 114% et 60% en ajoutant respectivement 5% d'hydrogène. Ainsi, l'ajout de 5 % d'hydrogène peut réduire considérablement les

émissions de HC à un EGR plus élevé de $\lambda = 1,4$. Où Les figures 13 à 15 montrent les émissions de HC contre EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda = 1, 1,2$ et $1,4$ respectivement :

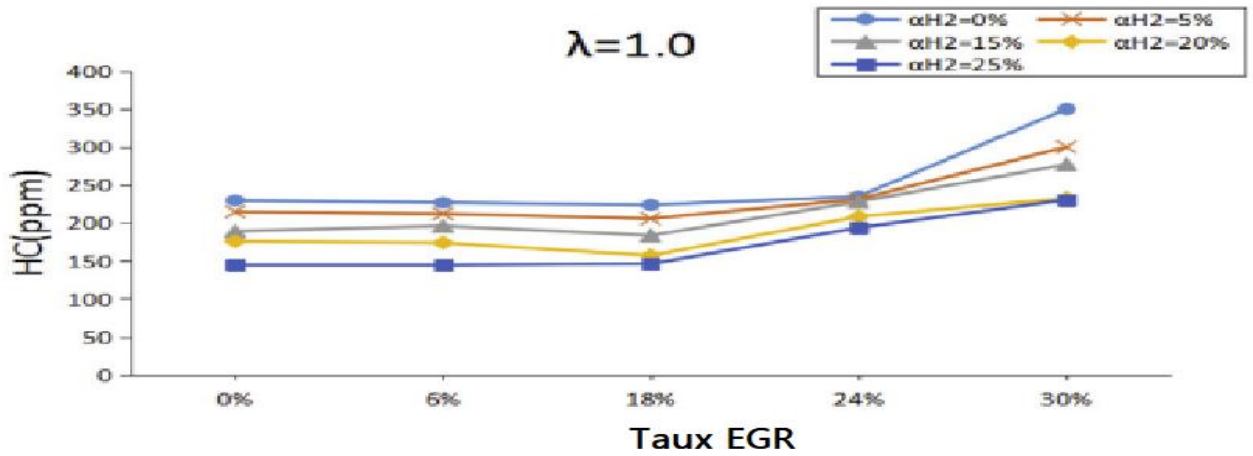


Figure IV. 13: Émissions de HC en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda = 1,0$. (Yu et al. 2019)

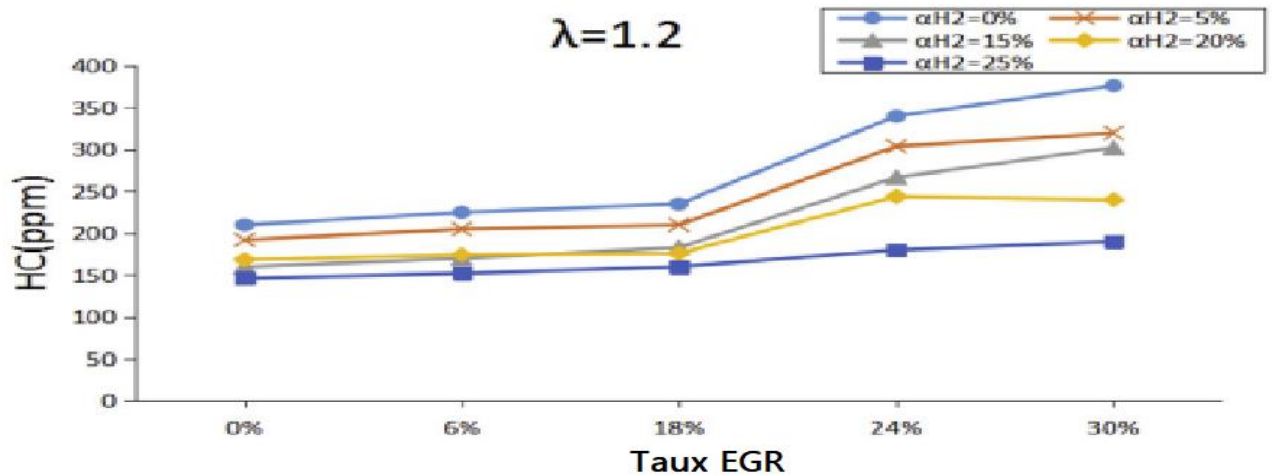


Figure IV. 14 : Émissions de HC en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de α_{H2} à $\lambda = 1,2$. (Yu et al. 2019)

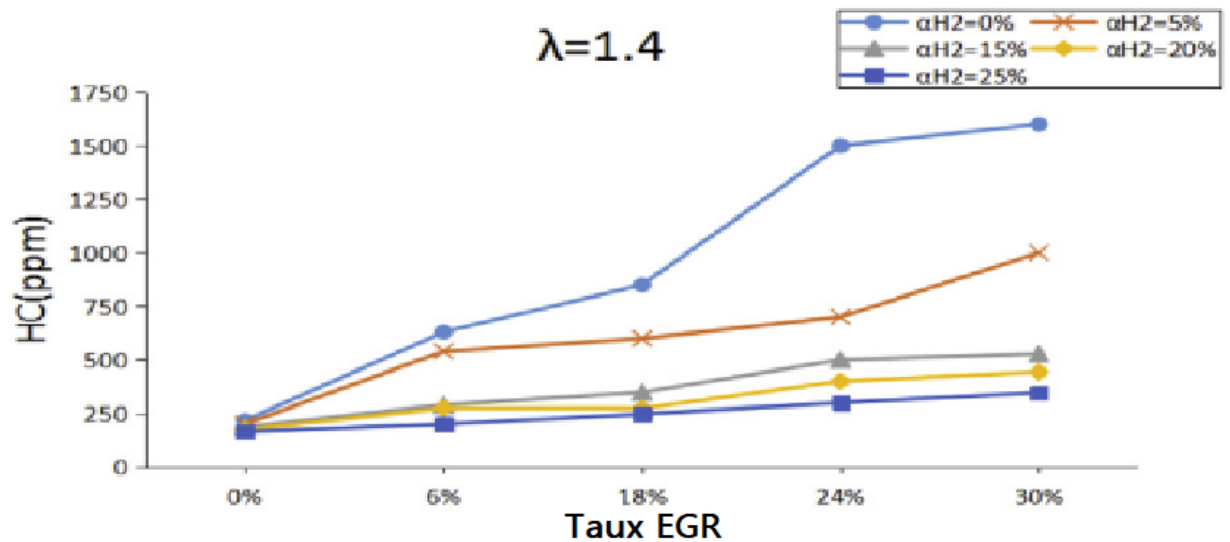


Figure IV. 15 : Émissions de HC en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de αH_2 à $\lambda = 1.4$. (Yu et al. 2019)

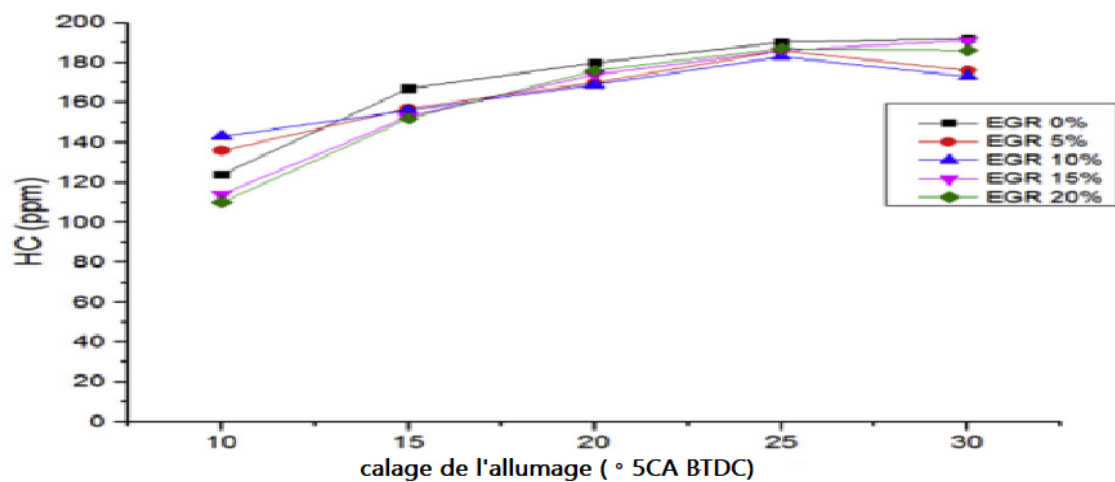
Du et al. ont découvert que les émissions des moteurs HC augmentaient légèrement avec l'augmentation de l'angle d'avance à l'allumage. Les principaux mécanismes de formation des émissions de HC sont la trempe des parois, l'effet d'adsorption du film d'huile, l'effet d'espace étroit et le grand volume de trempe. Le refroidissement des parois est une source importante d'émissions d'hydrocarbures. Avec l'augmentation de l'angle d'avance à l'allumage, la température du cylindre diminue dans la dernière partie de la course de détente, ce qui n'est pas propice à l'oxydation des HC non brûlés dans la couche de refroidissement, par conséquent, les émissions de HC augmentent légèrement.

L'effet aggravant des gaz d'échappement sur la combustion entraîne une augmentation des émissions de HC, ce qui entraîne une diminution de l'effet de l'EGR sur les émissions de HC.

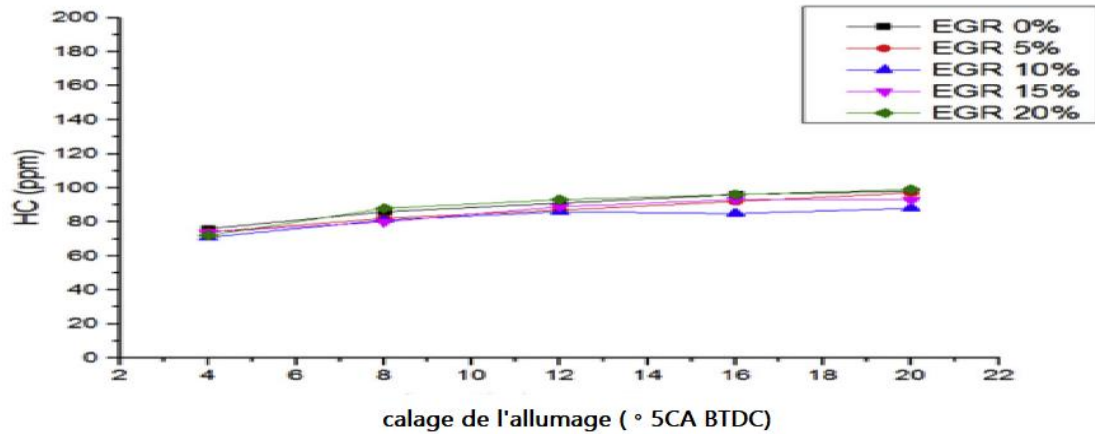
Lorsque le calage de l'allumage est de 15 °CA BTDC, l'EGR ajusté est de 0 % et les émissions d'hydrocarbures sont de 167 ppm de conduite de gaz pur. Après l'ajout d'une petite quantité d'hydrogène, l'émission de HC est réduite à 82 ppm. Pour ajouter de l'hydrogène, l'hydrogène réduira la proportion de benzène dans le carburant et l'hydrogène avec une vitesse de propagation de flamme élevée, ce qui stabilise la vitesse de combustion du mélange et réduit le refroidissement des parois, ainsi l'ajout d'hydrogène peut réduire les émissions de HC. La quantité de consommation de carburant est réduite de seulement 6 %, tandis que les HC sont réduits de 51 %. Par conséquent, la raison de la diminution des émissions de HC est

principalement due à l'ajout d'hydrogène et à l'amélioration de sa combustion. Lorsque le rapport d'ajout d'hydrogène est relativement important, le rapport d'émission d'hydrogène est de 80 ppm, ce qui indique que la modification du rapport d'ajout d'hydrogène a moins d'influence sur les émissions. (Du et al. 2017)

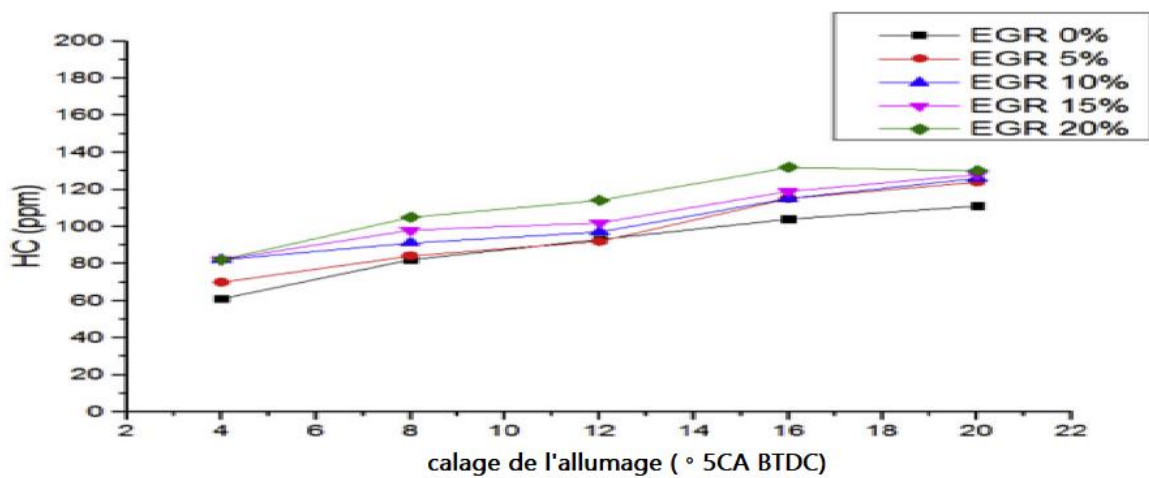
Là où la Figure. 16 montre les effets de l'EGR sur les émissions de HC avec différents temps d'allumage, la Figure. 16 (a - c) montre la relation entre les émissions d'hydrogène avec des temps d'allumage de 0 %, 5 % et 25 % d'ajout d'hydrogène, respectivement .



(a) des taux d'ajout d'hydrogène de 0 %



(c) taux d'ajout d'hydrogène de 25 %



(b) des taux d'ajout d'hydrogène de 5 %

Figure IV.16 : Effet du taux d'EGR sur les émissions de HC pour différents horaires d'allumage . (Du et al. 2017)

IV.4. Le rendement:

Un paramètre important est l'efficacité thermique du frein, qui fournit la puissance de l'arbre de sortie du moteur facilement disponible et mesure la puissance du même moteur avec différentes formulations d'hydrogène. En général, l'efficacité thermique des freins augmente avec l'augmentation de la teneur en hydrogène. En effet, la plus grande vitesse de flamme du mélange essence-hydrogène conduit à un apport calorifique plus important à volume constant pour un cycle idéal. Ce gain est une plus grande efficacité thermique du frein que d'utiliser uniquement de l'essence dans toutes les fractions d'hydrogène de travail, mais après avoir

craqué l'hydrogène de 31%, l'efficacité thermique du frein diminue en raison de la réduction de la quantité d'air nécessaire à une combustion complète. La figure 3 montre une image de comparaison de l'efficacité de freinage par rapport à la puissance de freinage pour différents suppléments d'hydrogène du moteur à accélération et calage d'allumage constants .

(Elsemary et al. 2016)

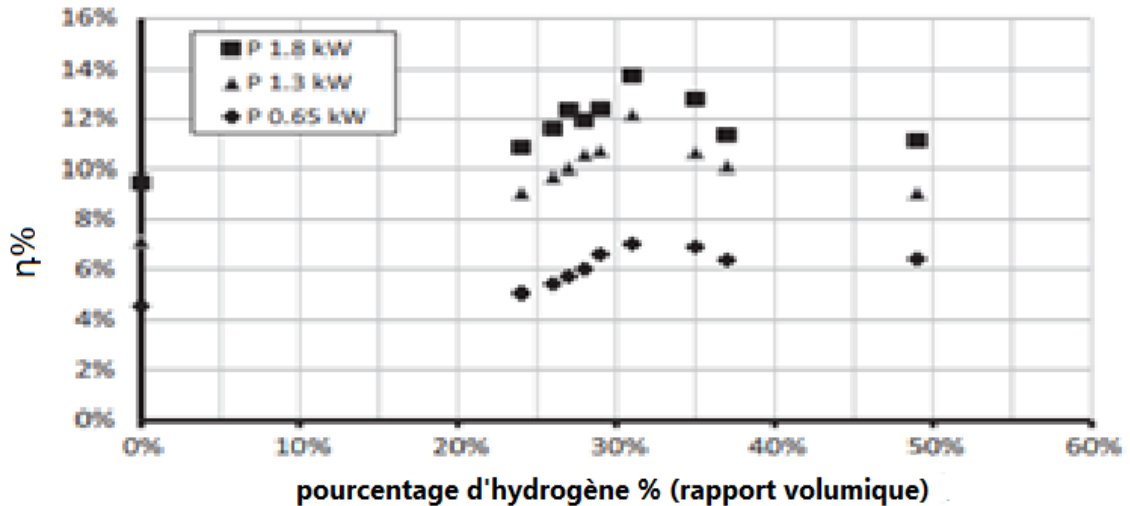
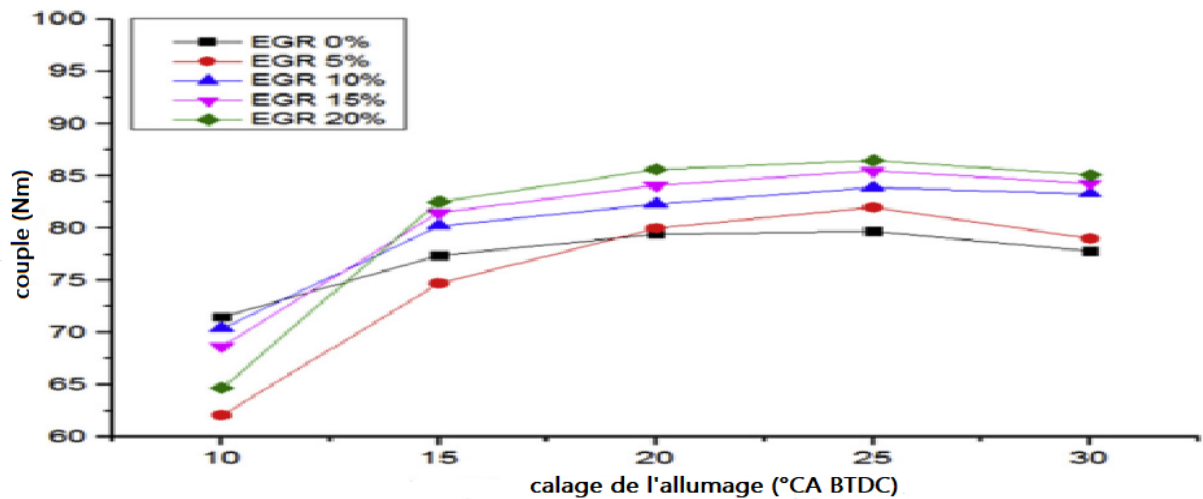


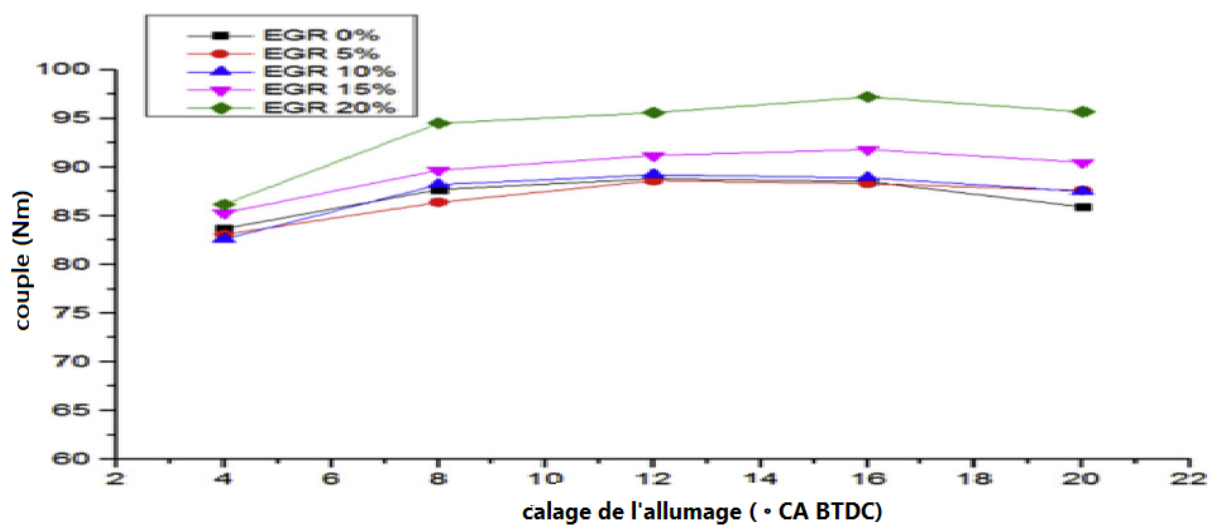
figure IV. 17 Effet du débit d'hydrogène sur le rendement thermique de rupture à différentes puissances. (Elsemary et al. 2016)

Alors que dans une autre étude, il a été conclu que l'EGR affecte les performances de puissance en augmentant d'abord le couple, puis en le diminuant. Le calage d'allumage avancé entraîne plus de BTDC, une combustion de carburant à pression négative. Le travail augmente. Lorsque l'angle d'avance à l'allumage est trop tard, il en résulte une postcombustion, ce qui entraîne une sortie de couple inférieure. L'ajout d'hydrogène améliore les conditions de combustion du cylindre, de sorte que le couple augmente fortement. Lorsque l'angle d'avance à l'allumage est de 15 CA BTDC et que l'EGR est de 0 %, le couple produit par le moteur essence à combustion est de 77,4 Nm. Lorsque le taux d'ajout d'hydrogène est de 5 %, le couple monte instantanément à 87,7 Nm, ce qui représente une augmentation de 13,3 %. Lorsque le pourcentage d'ajout d'hydrogène est constamment augmenté, le couple augmente à 87,5 Nm. Par conséquent, il n'y a pas de changement évident du rapport d'addition d'hydrogène grand ou petit. Le rapport d'ajout d'hydrogène a peu d'effet sur le couple. Avec une ride dans le rapport d'ajout d'hydrogène, le MBT est progressivement réduit de 25 CA BTDC à 16 CA BTDC, puis à 12 CA BTDC .

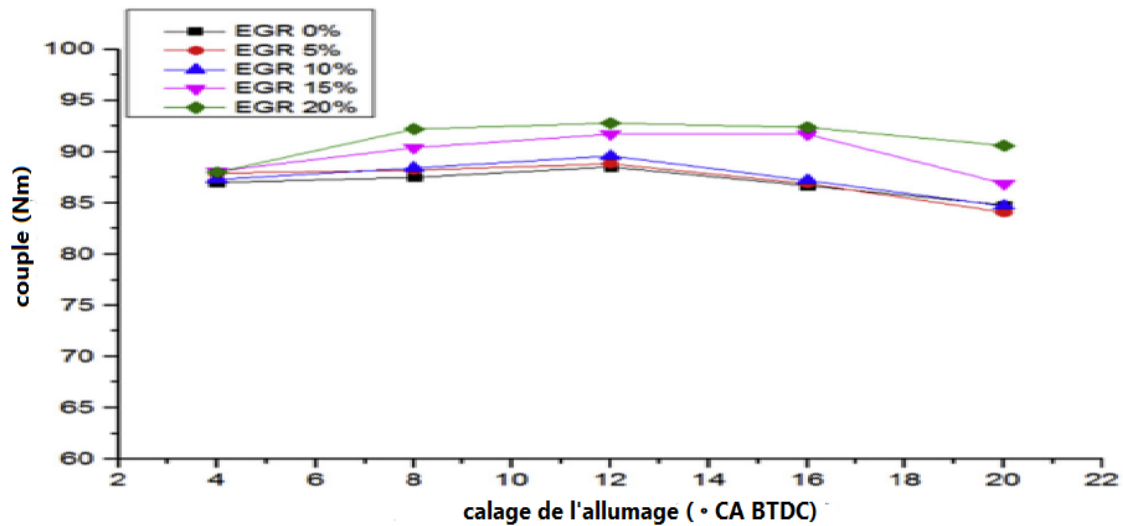
Le couple maximal est passé de 79,7 Nm à 88,5 Nm, ce qui indique que l'ajout d'hydrogène entraîne une combustion proche du PMH, augmentant considérablement les performances. AcotéLe couple de sortie augmente à mesure que le rapport EGR augmente . Cela se produit parce qu'une augmentation de l'EGR augmente l'ouverture de l'accélérateur, ce qui réduit la perte d'accélérateur et contribue à améliorer l'efficacité mécanique. Le couple moteur d'origine peut être augmenté de 8,5% à EGR 20% et il peut encore être augmenté de 20% après ajout d'hydrogène. La figure montre. 4 (AEC) Relation entre la pression du cylindre et le calage de l'allumage à des taux d'ajout d'hydrogène de 0 %, 5 % et 25 % , respectivement . (Du et al. 2017)



(a) Taux d'ajout d'hydrogène de 0 %



(b) Taux d'ajout d'hydrogène de 5 %



(c) Taux d'ajout d'hydrogène de 25 %

Figure IV.18 : Effet du taux EGR sur le couple pour différents allumages horaires .
(Du et al. 2017)

Cette étude s'est concentrée sur l'amélioration résultant de l'ajout d'hydrogène et de l'introduction de l'EGR par rapport à la combustion et à la puissance du moteur d'origine. Les propriétés de combustion ont été étudiées dans des conditions de $\lambda=1,2$ et $1,4$ et ils en ont déduit que :

(1) L'ajout d'hydrogène et l'introduction d'EGR peuvent augmenter la BMEP. Alors qu'à $\lambda=1,2$, avec une augmentation de α_{H2} de 0 % à 25 %, la valeur maximale de BMEP dans chaque condition α_{H2} augmente de 9 %, 12,70 %, 16,50 %, 11,30 % et 8,20 %, respectivement, par rapport à la valeur sans RGE. L'introduction d'un EGR de 30 % avec l'ajout de 25 % d'hydrogène obtient la valeur la plus élevée pour le BMEP. Cependant, l'introduction d'un EGR à 30 % avec l'ajout de 20 % d'hydrogène peut également obtenir la valeur approximative de la BMEP la plus élevée. A $\lambda=1,4$, le BMEP atteint sa valeur maximale lors de l'introduction d'un EGR à 18 % avec l'ajout de 20 % ou 25 % d'hydrogène, l'amélioration de l'EGR par rapport au BMEP est moindre qu'à $\lambda=1,2$.

(2) CA0-10 a tendance à diminuer avec les augmentations de α_{H2} , tandis que CA0-10 montre la tendance opposée avec les augmentations d'EGR. Les valeurs de CA0-10 sont inférieures aux valeurs de référence lorsque α_{H2} est supérieur à 15 % à $\lambda=1,2$. A $\lambda=1,4$, CA0-10 est proche du niveau moteur d'origine après ajout de 20 % de α_{H2} . Par conséquent, l'effet de l'EGR sur l'augmentation de CA0-10 peut être compensé en ajoutant de l'hydrogène pour atteindre le niveau d'origine du moteur.

(3) COVIMEP augmente avec l'augmentation de l'EGR mais diminue avec l'augmentation de αH_2 . L'ajout de 5 % d'hydrogène peut réduire efficacement COVIMEP et nous avons constaté que toutes les valeurs COVIMEP sont inférieures aux valeurs de base après l'ajout de 5 % αH_2 . Par conséquent, l'ajout d'hydrogène peut réduire le COVIMEP ainsi que prolonger la limite d'EGR dans des conditions de combustion pauvres. En conclusion, à $\lambda=1,2$, le couplage de 25 % d'ajout d'hydrogène avec 30 % d'EGR peut être considéré comme la meilleure condition de fonctionnement. En effet, ajouter 20 % d'hydrogène est suffisant avec l'introduction de 30 % d'EGR. Lorsque $\lambda=1,4$, par conséquent, nous pouvons conclure que le couplage de l'ajout de 20 % d'hydrogène avec 18 % d'EGR est la meilleure condition de fonctionnement à $\lambda=1,4$. Ces figures montrent respectivement ce qui suit :

(Figure IV.19) montre le taux de BMEP par rapport au taux d'EGR avec différentes valeurs de αH_2 à $\lambda=1,2$ et $1,4$. (Figure IV.20) montre CA0-10 par rapport à αH_2 différemment taux d'EGR à $\lambda=1,2$ et $1,4$. (Figure IV.21) montre le taux de COVIMEP par rapport au taux d'EGR pour divers valeurs de αH_2 à $\lambda=1,2$ et $1,4$.

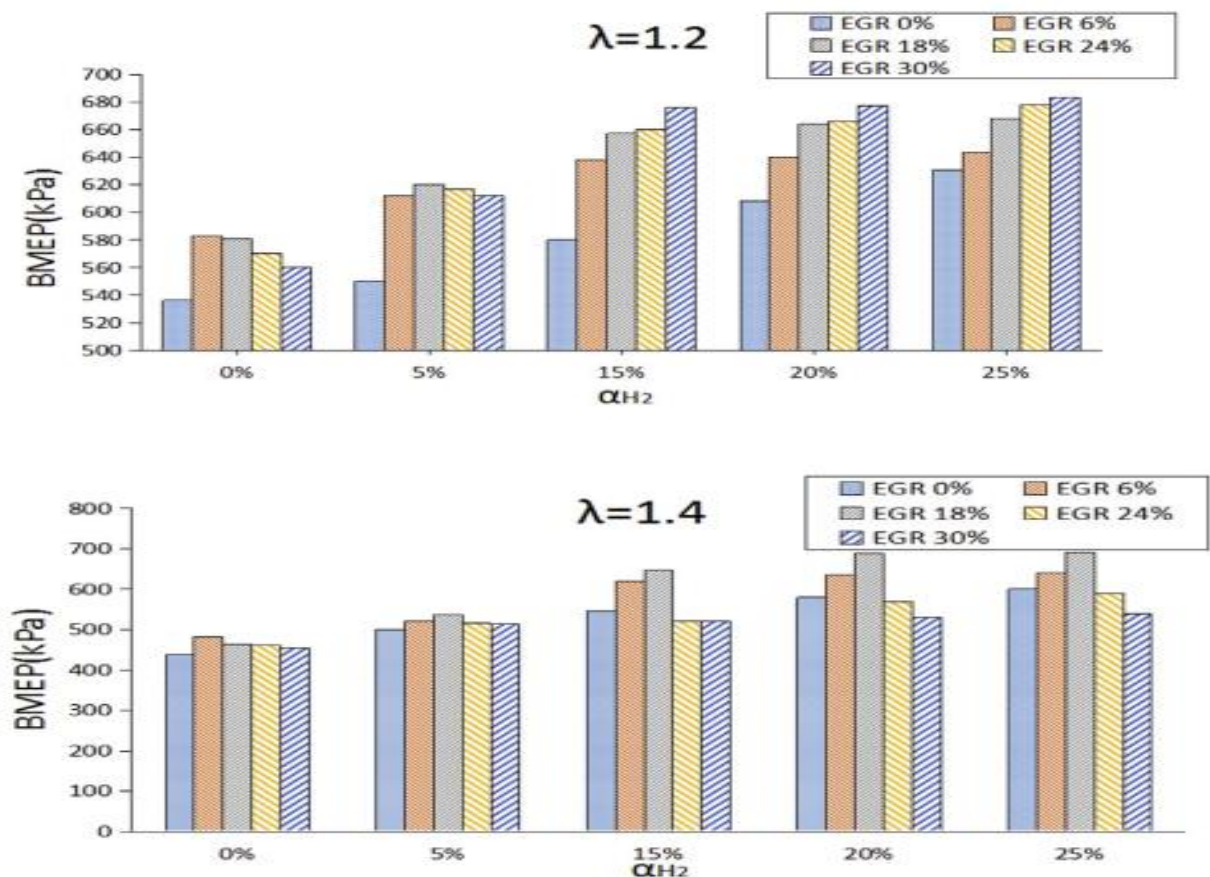


Figure IV.19: BMEP en fonction du taux d'EGR pour différentes valeurs de αH_2 à $\lambda=1.2$ et $1,4$. (Yu et al. 2019)

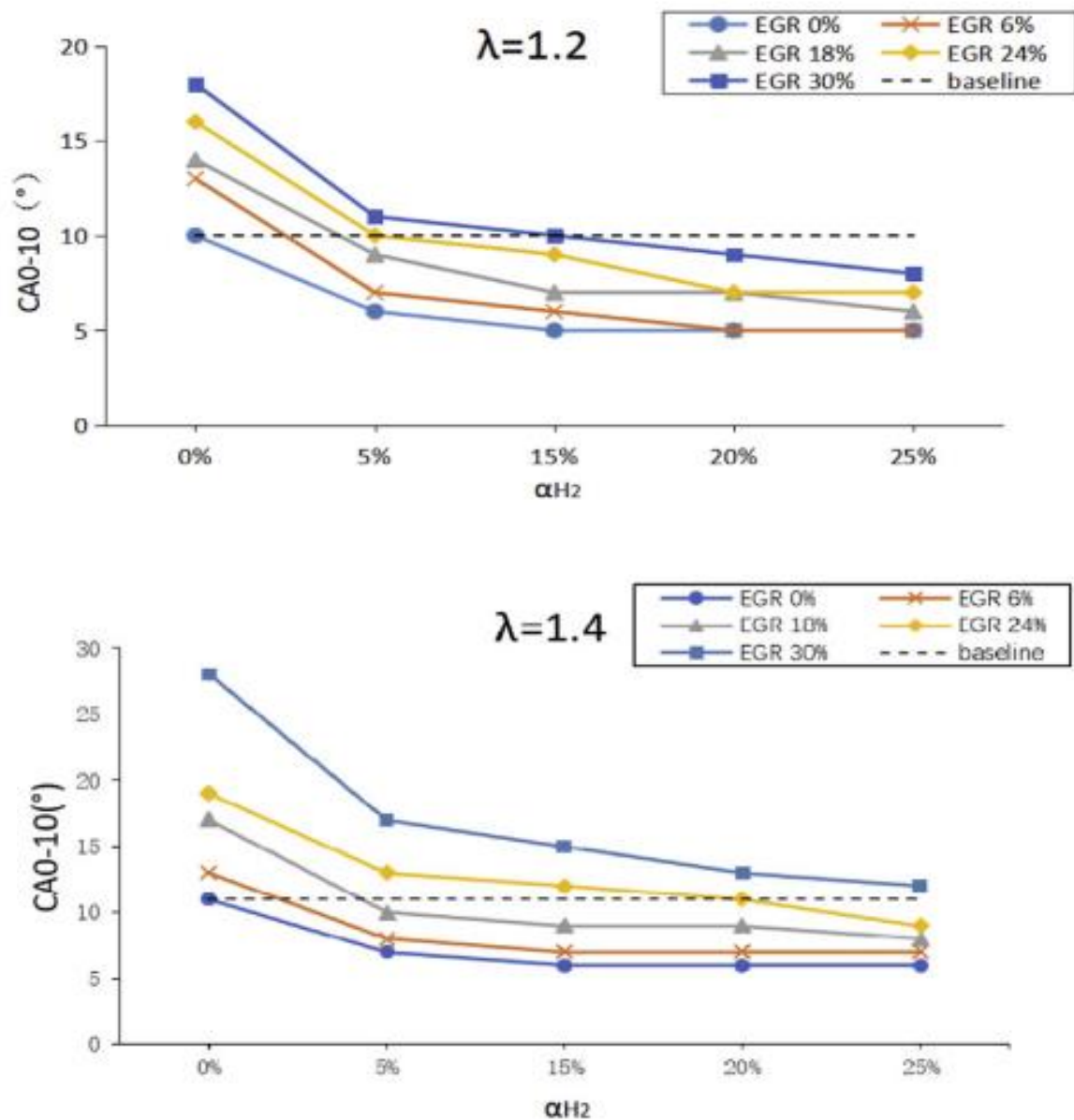


Figure IV.20: CA0-10 versus αH_2 pour différents taux d'EGR à $\lambda = 1,2$ et $1,4$. (Yu et al. 2019)

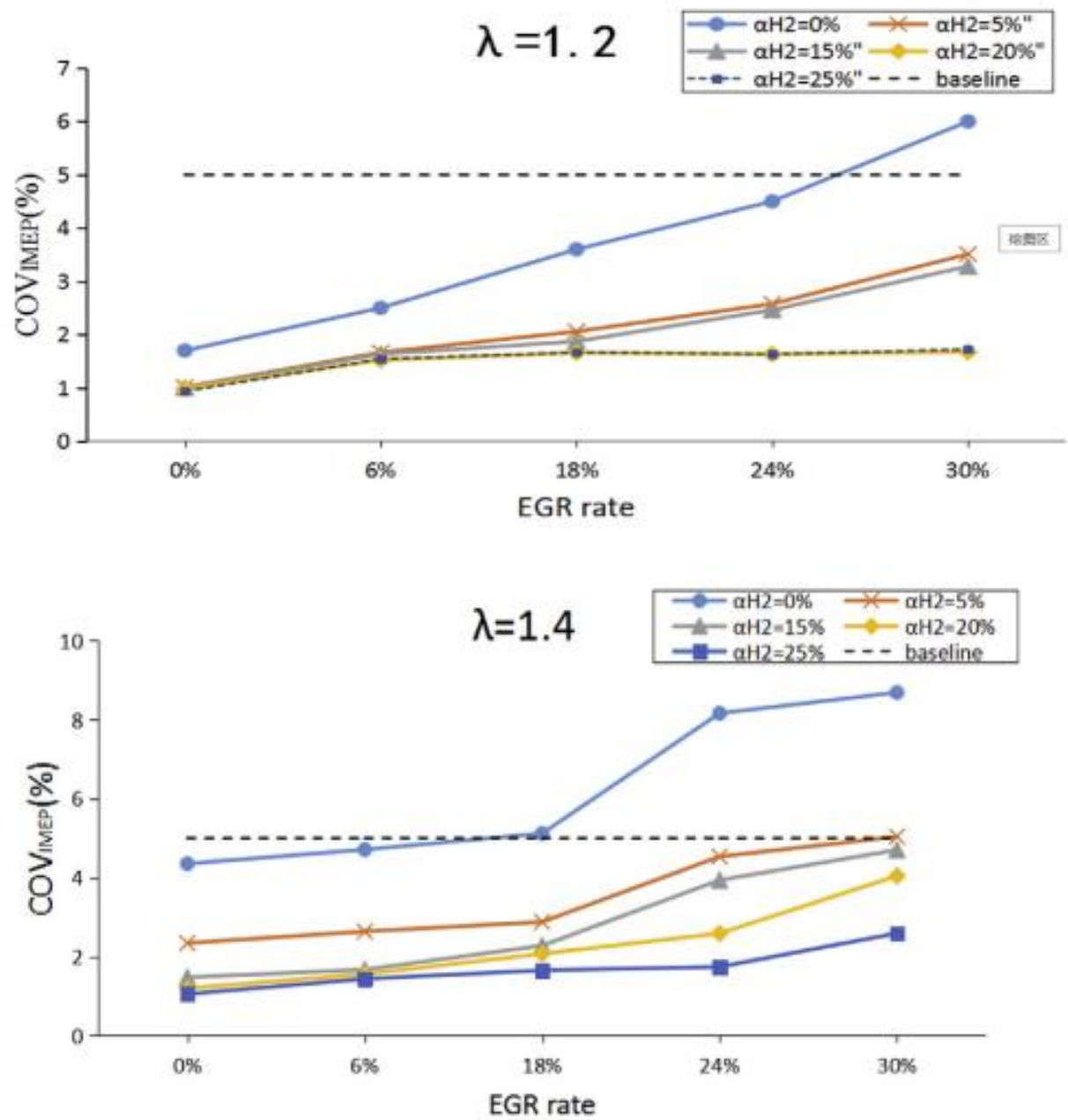


Figure IV.21: COVIMEP versus taux EGR pour différentes valeurs de αH_2 à $\lambda = 1,2$ et $1,4$. (Yu et al. 2019)

Conclusion générale

Dans cette revue, l'effet de l'ajout d'hydrogène comme deuxième carburant avec l'essence sur les performances et les émissions d'échappement des moteurs à allumage commandé (SI) a été étudié. Les résultats suivants ont été obtenus après revue de la littérature :

- ✓ Après avoir ajouté 5 % d'hydrogène, à mesure que le taux d'EGR augmente, les émissions de NO_x diminuent et le taux d'EGR de 18 % peut maintenir les émissions de Oxydes d'azote à un niveau relativement bas . De plus, les émissions de NO_x diminuent d'abord puis augmentent avec α_{H_2} à $\lambda = 1,4$, et les émissions de Oxydes d'azote à 5 % H₂ sont inférieures à celles de l'essence pure .
- ✓ En ajoutant de l'hydrogène, les émissions de NO_x augmentent, tandis que les émissions de HC et de CO diminuent significativement, jusqu'à 31 %, après quoi elles augmentent par rapport au moteur à essence d'origine en l'absence d'un taux d'EGR . Lorsque l'EGR est présent, les émissions de monoxyde de carbone ne montrent qu'un petit changement avec des augmentations de α_{H_2} de plus de 20 % .
- ✓ Les émissions de CO augmentent lorsque le taux d'EGR augmente. En raison de l'EGR, le CO ne peut pas être complètement oxydé en CO₂ .
- ✓ À $\lambda = 1$, à mesure que l'EGR augmente, les émissions d'hydrocarbures diminuent légèrement dans un premier temps, puis augmentent rapidement, atteignant la valeur la plus basse avec une moyenne de 18 % d'EGR. Seules de légères augmentations sont observées dans les taux d'EGR inférieurs à 18 %. En raison de l'effet accru des gaz d'échappement sur les émissions d'hydrocarbures, un EGR de 18 % peut être considéré comme optimal. L'ajout de 5 % d'hydrogène peut réduire considérablement les émissions d'hydrogène à EGR élevé et $\lambda = 1,4$.
- ✓ L'efficacité thermique des freins augmente avec l'augmentation de la teneur en hydrogène. Cependant, après avoir atteint une teneur en hydrogène de 31% , l'efficacité thermique des freins diminue car la quantité d'air nécessaire à une combustion complète est réduite .
- ✓ À $\lambda = 1,2$, les valeurs de BMEP correspondant au couplage de 25 % d'ajout d'hydrogène avec 30 % d'EGR sont très élevées et les émissions gazeuses sont relativement faibles, ce qui en fait la meilleure condition de fonctionnement. En effet, l'ajout de 20 % d'hydrogène est suffisant avec l'introduction de 30 % d'EGR. À $\lambda = 1,4$, le couplage de 20 % d'ajout d'hydrogène avec 18 % d'EGR peut être considéré comme la meilleure condition opératoire .

- ✓ CAO-10 tend à diminuer avec les augmentations, tandis que CAO-10 montre la tendance inverse avec une augmentation de l'EGR. Les valeurs de CAO-10 sont inférieures aux valeurs de référence lorsque le rapport est supérieur à 15% à $\lambda = 1,2$. À $\lambda = 1,4$, le CAO-10 est proche du niveau d'origine du moteur après ajout de 20 %. Par conséquent, l'effet de l'EGR peut être compensé en augmentant le CAO-10 en ajoutant de l'hydrogène pour atteindre le niveau d'origine du moteur .
- ✓ COVIMEP augmente avec l'augmentation de l'EGR, mais diminue avec l'augmentation de l' αH_2 . L'ajout de 5 % d'hydrogène peut le réduire efficacement.
- ✓ Les propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène améliorent la tolérance du moteur à l'EGR, ce qui entraîne une augmentation considérable des performances d'économie de carburant du moteur. Cette approche peut augmenter le rapport EGR utilisé, améliorer l'ouverture de l'accélérateur et réduire la perte d'accélérateur pour améliorer l'efficacité mécanique. L'ajout de 5 % d'hydrogène et 20 % d'EGR peut améliorer le couple moteur de 20 % .

Enfin, concernant les perspectives et suggestions de travaux futurs, il serait intéressant d'étudier les bi-carburants hydrogène/diesel .

Références bibliographique:

Duc, Khanh Nguyen, et Vinh Nguyen Duy. 2018. « Study on performance enhancement and emission reduction of used fuel-injected motorcycles using bi-fuel gasoline-LPG ». *Energy for Sustainable Development* 43: 60-67.

Duy, Vinh Nguyen, Khanh Nguyen Duc, et Nguyen Cam Van. 2021. « Real-time driving cycle measurements of fuel consumption and pollutant emissions of a bi-fuel LPG-gasoline motorcycle ». *Energy Conversion and Management*: X 12: 100135.

Pipitone, Emiliano, et Stefano Beccari. 2009. « Performances improvement of a SI CNG bi-fuel engine by means of double-fuel injection ». *Stroke* 2000: 78-86.

Salimifard, Khodakaram, et Ramin Raeesi. 2014. « A green routing problem: optimising CO2 emissions and costs from a bi-fuel vehicle fleet ». *International Journal of Advanced Operations Management* 6 (1): 27-57.

Tabar, Abbas Raei, Ali Asghar Hamidi, et Hossein Ghadamian. 2017. « Experimental investigation of CNG and gasoline fuels combination on a 1.7 L bi-fuel turbocharged engine ». *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 8: 37-45.

Verhelst, Sebastian, Pieter Maesschalck, Nathalie Rombaut, et Roger Sierens. 2009. « Efficiency comparison between hydrogen and gasoline, on a bi-fuel hydrogen/gasoline engine ». *International journal of hydrogen energy* 34 (5): 2504-10.

Wu, Xuesong, Ritchie Daniel, Guohong Tian, Hongming Xu, Zuohua Huang, et Dave Richardson. 2011. « Dual-injection: The flexible, bi-fuel concept for spark-ignition engines fuelled with various gasoline and biofuel blends ». *Applied Energy* 88 (7): 2305-14.

Yao, Zhiliang, Xinyue Cao, Xianbao Shen, Yingzhi Zhang, Xintong Wang, et Kebin He. 2014. « On- road emission characteristics of CNG-fueled bi-fuel taxis ». *Atmospheric Environment* 94: 198-204.

Abdin, Zainul, Ali Zafaranloo, Ahmad Rafiee, Walter Mérida, Wojciech Lipiński, et Kaveh R. Khalilpour. 2020. « Hydrogen as an Energy Vector ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120:109620. doi: 10.1016/j.rser.2019.109620.

Abohamzeh, Elham, Fatemeh Salehi, Mohsen Sheikholeslami, Rouzbeh Abbassi, et Faisal Khan. 2021. « Review of Hydrogen Safety during Storage, Transmission, and Applications Processes ». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 72:104569. doi: 10.1016/j.jlp.2021.104569.

- Armaroli, Nicola, et Vincenzo Balzani. 2011. « The Hydrogen Issue ». *ChemSusChem* 4(1):21-36. doi: 10.1002/cssc.201000182.
- Asseli, Rabah. 2018. « Synthèse par voie électrolytique et caractérisation d'alliages niw comportement électrochimique en milieu alcalin concentré ». Thesis.
- Azin, Hugo. 2022. « Conception d'un stockage d'énergie éolienne pour une entreprise minière isolée du réseau : faisabilité du stockage d'hydrogène ». masters, École de technologie supérieure.
- Babaali, Zineddine, Oussama Benchidi, et Naima Sofi. 2022. « Etude de la pile à combustible (PAC) alimentée par L'hydrogène ».
- Bekhtaoui, Aimene, Mohamed el Mokhtar Bokhari, S. Abudura, et N. Sofi. 2022. « Etude d'un système de production et de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque ».
- Belhoucette, Amira, et Hassina Merzoug. 2019. « Quantification De L'Effet De L'ajout De L'Hydrogène Sur La Formation Des Hapdansles Mélanges Ethylène/Méthane et Ethylène/Ethane ».
- Benyahia, Nacera. 2014. « Préparation et caractérisation de catalyseurs pour la production embarquée d'hydrogène à partir du méthanol. » Thesis.
- Benzerrouk, Abd-el-Kader, et Mounir Alliche. 2013. « Simulation Numérique du Comportement d'une Flamme Non –Prémélangée Hydrogène-Air dans un milieu confiné ».
- Boateng, Emmanuel, et Aicheng Chen. 2020. « Recent Advances in Nanomaterial-Based Solid-State Hydrogen Storage ». *Materials Today Advances* 6:100022. doi: 10.1016/j.mtadv.2019.100022.
- Bonhomme, Gérard. s. d. « L'hydrogène : carburant du futur ? »
- Boucheur, Salim, et Nadir Bellel. 2021. « Synthèse, élaboration et caractérisation des nanocomposants à base de graphite pour le stockage solide d'hydrogène. » Thesis, Université Frères Mentouri - Constantine 1.
- Boudebouze, Nor El Houda. 2022. *Etude des propriétés physiques des métaux pour le stockage d'hydrogène. Working Paper.* université de guelma.
- Cao, Leichang, Iris K. M. Yu, Xinni Xiong, Daniel C. W. Tsang, Shicheng Zhang, James H. Clark, Changwei Hu, Yun Hau Ng, Jin Shang, et Yong Sik Ok. 2020. « Biorenewable Hydrogen Production through Biomass Gasification: A Review and Future Prospects ». *Environmental Research* 186:109547. doi: 10.1016/j.envres.2020.109547.

- Caudal, Jean. 2013. « Simulation numérique du reformage autothermique du méthane ». phdthesis, Ecole Centrale Paris.
- Daoui, Cheikh, et Mohammed elamine Bouzid. 2017. « ETUDE DE POSSIBILITE DE STOCKAGE DE L'HYDROGENE PAR ADSORPTION SOLAIRE ». Thesis.
- Dawood, Furat, Martin Anda, et G. M. Shafiullah. 2020. « Hydrogen Production for Energy: An Overview ». *International Journal of Hydrogen Energy* 45(7):3847-69. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.
- Djaballah, Katre Nnada, et Yousra Denaguir. 2019. « Modélisation et optimisation d'un système de stockage d'énergie à base d'hydrogène dans un réseau électrique autonome ».
- Djilali, Messaoudi. 2021. « Contribution à la conception de la chaîne logistique de l'hydrogène ». Thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Eliezer, D., N. Eliaz, O. N. Senkov, et F. H. Froes. 2000. « Positive Effects of Hydrogen in Metals ». *Materials Science and Engineering: A* 280(1):220-24. doi: 10.1016/S0921-5093(99)00670-X.
- Hajjaji, Nouredine. 2011. « Exergetic life cycle assessment of hydrogen production systems ».
- Hassiba, Bekkouche, et Chaker (Née Abdelmoumene) Abba. 2017. « Etude numerique des phenomenes de transferts de chaleur et de masse dans une pile a combustible de type PEMFC ».
- Hren, Robert, Annamaria Vujanović, Yee Van Fan, Jiří Jaromír Klemeš, Damjan Krajnc, et Lidija Čuček. 2023. « Hydrogen Production, Storage and Transport for Renewable Energy and Chemicals: An Environmental Footprint Assessment ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 173:113113. doi: 10.1016/j.rser.2022.113113.
- Kpoumié, Amidou. 2013. « Modèle de structuration et d'évaluation des scénarios des technologies de l'hydrogène du point de vue de l'acceptabilité sociale ». phdthesis, Université Paris Dauphine - Paris IX.
- Kuczyński, Szymon, Mariusz Łaciak, Andrzej Olijnyk, Adam Szurlej, et Tomasz Włodek. 2019. « Thermodynamic and Technical Issues of Hydrogen and Methane-Hydrogen Mixtures Pipeline Transmission ». *Energies* 12(3):569. doi: 10.3390/en12030569.
- Lubitz, Wolfgang, et William Tumas. 2007. « Hydrogen: An Overview ». *Chemical Reviews* 107(10):3900-3903. doi: 10.1021/cr050200z.

- Manoharan, Yogesh, Seyed Ehsan Hosseini, Brayden Butler, Hisham Alzhahrani, Bhi Thi Fou Senior, Turaj Ashuri, et John Krohn. 2019. « Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect ». *Applied Sciences* 9(11):2296. doi: 10.3390/app9112296.
- Megía, Pedro J., Arturo J. Vizcaíno, José A. Calles, et Alicia Carrero. 2021. « Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review ». *Energy & Fuels* 35(20):16403-15. doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c02501.
- Mehdaoui, Younes, et Mohamed Kabouch. 2017. « REALISATION D'UN GÉNÉRATEUR D'HYDROGÈNE ». Thesis.
- N, Bellel, et Mahdi Khaled. 2017. « Production d'hydrogène par électrolyse sous chauffage solaire par un concentrateur paraboloidal ». Thesis.
- Nadjia, Nour El Imane. 2020. « Faisabilité de transformation du réseau gazoduc algérien en réseau de transport d'hydrogène ». Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- OUAGUENI, Fayssal. 2021. « Modélisation et Commande Des Piles à Combustible ». doctoral, Université Mohamed Khider – Biskra.
- Petrinin, V. V., I. V. Marov, et N. G. Kodochigov. 2020. « Hydrogen Energy and Large Scale Hydrogen Production with Nuclear Power Plants Based on High-Temperature Reactors ». *Journal of Physics: Conference Series* 1683(4):042031. doi: 10.1088/1742-6596/1683/4/042031.
- Ramachandran, Ram, et Raghu K. Menon. 1998. « An Overview of Industrial Uses of Hydrogen ». *International Journal of Hydrogen Energy* 23(7):593-98. doi: 10.1016/S0360-3199(97)00112-2.
- Rivera-Tinoco, Rodrigo. 2009. « Etude technico-économique de la production d'hydrogène à partir de l'électrolyse haute température pour différentes sources d'énergie thermique ». phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Rouai, Mohamed, et Abderahman Zouzou. 2017. « Estimation du potentiel de la production d'hydrogène à partir de la biomasse ». Thesis.
- Safidine, Amine, et Mounir Alliche. 2012. « Etude paramétrique du comportement d'une flamme d'hydrogène-oxygène dans un milieu confiné ». Thesis.
- Shusheng, Xiong, Song Qiujie, Guo Baosheng, Zhao Encong, et Wu Zhankuan. 2020. « Research and Development of On-Board Hydrogen-Producing Fuel Cell ». Thesis.

Vehicles ». *International Journal of Hydrogen Energy* 45(35):17844-57. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.236.

Staffell, Iain, Daniel Scamman, Anthony Velazquez Abad, Paul Balcombe, Paul E. Dodds, Paul Ekins, Nilay Shah, et Kate R. Ward. 2019. « The Role of Hydrogen and Fuel Cells in the Global Energy System ». *Energy & Environmental Science* 12(2):463-91. doi: 10.1039/C8EE01157E.

Tarhan, Cevahir, et Mehmet Ali Çil. 2021. « A Study on Hydrogen, the Clean Energy of the Future: Hydrogen Storage Methods ». *Journal of Energy Storage* 40:102676. doi: 10.1016/j.est.2021.102676.

Tasaltin, Mustafa. 2008. « Economic and Environmental Supply of Hydrogen Fuels in Comparison with Conventional Fuels ». Thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg.

Williams, L. O. 2013. *Hydrogen Power: An Introduction to Hydrogen Energy and Its Applications*. Elsevier.

طه دودي. « Etude de la nature d'eau d'EL oued sur l'électrolyse ». محمد خميس ومومن بكوش, et 2018.

اسامة اقصاصي, زوادة و مهربية. 2021. "Amélioration du qualité de l'essence (nombre d'octane) A la Raffinerie d'adrar ADRAR RA1D".

دريدي, عبد الله, و زكري أحمد بده. 2016. "Amélioration du rendement en aromatiques dans l'unité de magnaforming", مايو. <http://dspace.univ-eloued.dz:80/xmlui/handle/123456789/3303>.

Abdellatif, Tamer M. M., Mikhail A. Ershov, Vladimir M. Kapustin, Mohammad Ali Abdelkareem, Mohammed Kamil, و A. G. Olabi. 2021. "Recent Trends for Introducing Promising Fuel Components to Enhance the Anti-Knock Quality of Gasoline: A Systematic Review". *Fuel* 291 (120112): مايو. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120112>.

Abouri, Roumaissa, و Hadjer Siagh. 2016. "Production de l'essence sans plomb par amélioration du procédé de reforming catalytique (RHM2)". Thesis. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/12107>.

Baba Ahmed, Abderrazek. 2021. "Raffinage et pétrochimie". <http://dspace.univ-relizane.dz/home/handle/123456789/67>.

Beddiaf, Sofiane, Abderrahmane Mahmoudi, و Mondher Bouragaa. 2017. "Hydrochlorination Catalysée du Naphtalène". <http://dspace.univ-eloued.dz:80/xmlui/handle/123456789/2144>.

Boucha, Khaled, Abderrezak Ousfia, و Omar / promoteur Khelifi. 2019. "AMELIORATION DE L'INDICE D'OCTANE PAR REFORMAGE CATALYTIQUE AU NIVEAU DE LA RAFFINERIE D'ADRAR RA1D".

- Thesis, Université Ahmed Draia - ADRAR. <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/handle/123456789/2322>.
- Charmat, Abdelkarim, و Mourad Hadj Othmane. 2022. "Simulation de performance du craqueur catalytique fluidisé dans une raffinerie de brut". في .
- Chellali, Dr. د.ت. "Simulation de performance du craqueur catalytique fluidisé dans une raffinerie de brut".
- "DISTILLATION - Encyclopædia Universalis". 2023. تاريخ الوصول 14 مارس، د.ت. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/distillation/>.
- Dou, Faïda, Moufida Dou, و Somia Retheb. 2017. "Changement du Ballon de Flash par une Colonne de Prédistillation avec une Augmentation de 16% de la Capacité de l'Unité de Distillation Atmosphérique". <http://dspace.univ-eloued.dz:80/xmlui/handle/123456789/2141>.
- Gabbour, Sid Ahmed, و Ryad Bousbia Salah. 2013. "Conception d'un logiciel pour le calcul des propriétés physico-chimiques des corps purs et des fractions pétrolières". Thesis. <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/4947>.
- GRAIDIA, Yasmina, و Sara KOUR. د.ت. "Etude générale sur la valorisation de l'isopentane comme condensat stabilisé". PhD Thesis.
- Kouacem, Safa. 2021. "Une étude théorique de la production d'essence (une étude comparative)". Thesis, Université KASDI-MERBAH Ouargla. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/29386>.
- Lalaoui, Sonia, و Abdelhamid Boukerroui. 2015. "Caractérisation physico-chimiques des carburants des véhicules cas essence super et gazole." PhD Thesis, Université Abderrahmane Mira-Bejaia.
- Lebloub, Redouane. 2020. "La conformité d'un mélange final résultant de l'utilisation d'un nouveau Blender essence à la Raffinerie de Skikda". Working Paper. <http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/10219>.
- Mehenni, Imen, و Aya Kabbeche. 2021. "Etude de performances d'une unité de craquages catalytique par aspen tech hysys". في .
- Nicholas P. Cheremisinoff. 2008. "About the Authors". في *Responsible Care*, تحقيق Paul Rosenfeld و Anton R. Davletshin, ix–x. Pergamon Texts in Inorganic Chemistry. Gulf Publishing Company. <https://doi.org/10.1016/B978-1-933762-16-6.50003-7>.
- SLATNIA Dhiya-eddine, BOUSLAMA Ayoub. 2020. "COMMANDE ROBUSTE D'UNE COLONNE DE DISTILLATION".
- Tamma, Imane, و Lamia Kaib. 2021. "Optimisation des quantités de naphta utilisées pour la valorisation des condensats de Hassi Messaoud". Thesis. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/26578>.
1992. "constitution-du-moteur.pdf". 2023. استرجع في 22 مايو، (https://pdfprof.com/PDFV2/Documents1/7494/16/2).
2013. "Internal Combustion Engine Basics". *Energy.Gov*. 2023. استرجع في 22 مايو، (https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/internal-combustion-engine-basics).

2016. "Steam Engines". *Sutori*. 2023. استرجع في 22 مايو،
(<https://www.sutori.com/en/item/how-does-the-steam-train-work-having-a-fire-is-the-main-thing-needed-when-worki>).
- Bilal, Mr Khaled. 2020. "Caractérisation d'une huile de moteur à allumage commandée et étude de sa dégradation".
- Jamie Page Deaton. 2011. "5 Ways Modern Car Engines Differ from Older Car Engines". *HowStuffWorks*. 2023. استرجع في 22 مايو، (<https://auto.howstuffworks.com/5-ways-modern-car-engines-differ-from-older-car-engines.htm>).
- LAAMARI, Yahia. 2008. "MODELISATION ET COMMANDE D'UN MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDE POUR VEHICULE HYBRIDE: APPLICATION À LA RÉGULATION DU RÉGIME MOTEUR". PhD Thesis, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila.
- Laamari, Yahia. 2008. "MODELISATION ET COMMANDE D'UN MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDE POUR VEHICULE HYBRIDE : APPLICATION À LA RÉGULATION DU RÉGIME MOTEUR". Thesis, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila.
- Mabrouk, Mohamed Tahar. 2015. "Figure 3.2-Le Diagramme P-V Du Cycle Idéal de Stirling". *ResearchGate*. 2023. استرجع في 23 مايو،
(https://www.researchgate.net/figure/Le-diagramme-P-V-du-cycle-ideal-de-Stirling_fig23_320944122).
- Malek, Mohamed Raouf. 2015. "Etude thermodynamique d'un moteur à combustion interne utilisant hythane comme carburant alternatif". PhD Thesis.
- Sabhadiya, Jignesh. 2021. "What Is an External Combustion Engine?- Their Example". *Engineering Choice*. 2023. استرجع في 22 مايو،
(<https://www.engineeringchoice.com/what-is-external-combustion-engine/>).
- Sabhadiya, Jignesh. 2023. "How Does an Internal Combustion Engine Work?" *Engineering Choice*. 2023. استرجع في 22 مايو،
(<https://www.engineeringchoice.com/internal-combustion-engine/>).
- Study.com. S d. "An air-standard diesel cycle has a compression ratio of 18.2. Air is at 80 degrees F and 14.7 psia at the beginning of the compression process and at 3000 R at the end of the heat-addition process. Determine the temperature at the beginning of the heat re". *homework.study.com*. 2023. استرجع في 23 مايو،
(<https://homework.study.com/explanation/an-air-standard-diesel-cycle-has-a-compression-ratio-of-18-2-air-is-at-80-degrees-f-and-14-7-psia-at-the-beginning-of-the-compression-process-and-at-3000-r-at-the-end-of-the-heat-addition-process-determine-the-temperature-at-the-beginning-of-the-heat-re.html>).
- Sundar. 2018a. "Comparison of 2 Stroke vs 4 Stroke Engine". *ExtruDesign*. 2023. استرجع في 23 مايو، (<https://extrudesign.com/2-stroke-vs-4-stroke-engine/>).
- Sundar. 2018b. "What is 2 Stroke Engine? | 2 Stroke Petrol Engine". *ExtruDesign*. 2023. استرجع في 23 مايو، (<https://extrudesign.com/2-stroke-engine/>).
- Sundar. 2018c. "What Is a 4 Stroke Diesel Engine?" *ExtruDesign*. 2023. استرجع في 22 مايو، (<https://extrudesign.com/4-stroke-diesel-engine/>).

- Sundar. 2018d. "What is a 4 stroke engine? Four Stroke Petrol Engine". *ExtruDesign*. 2023 استرجع في 22 مايو، (<https://extrudesign.com/4-stroke-engine/>).
- Sundar. 2018e. "What is Diesel Cycle?" *ExtruDesign*. 2023 استرجع في 22 مايو، (<https://extrudesign.com/diesel-cycle/>).
- Sundar. 2018f. "What Is Heat Engine? Classification of Heat Engines?" *ExtruDesign*. 2023 استرجع في 21 مايو، (<https://extrudesign.com/heat-engines-classification/>).
- Sundar. 2018g. "What is Otto Cycle?" *ExtruDesign*. 2023 استرجع في 22 مايو، (<https://extrudesign.com/otto-cycle/>).
- Sundar. 2018h. "What List of Basic Engine Components? | Internal Combustion Engines |". *ExtruDesign*. 2023 استرجع في 22 مايو، (<https://extrudesign.com/basic-engine-components/>).
- VirtuaL Laps. S d. "Remote Triggered Virtual Lab on Automotive Systems". 22 استرجع في 2023 مايو، (<http://vlabs.iitkgp.ac.in/rtvlas/exp1/index.html>).
- « Définition de bicarburation | Dictionnaire français ». s. d. La langue française. Consulté le 23 mai 2023. <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/bicarburation>.
- Du, Yaodong, Xiumin Yu, Lin Liu, Runzeng Li, Xiongyinan Zuo, et Yao Sun. 2017. « Effect of addition of hydrogen and exhaust gas recirculation on characteristics of hydrogen gasoline engine ». *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (12): 8288-98.
- Elsemary, Ismail MM, Ahmed AA Attia, Kairy H. Elnagar, et Ahmed AM Elaraqy. 2016. « Experimental investigation on performance of single cylinder spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline mixture ». *Applied Thermal Engineering* 106: 850-54.
- Sun, Ping, Ze Liu, Xiumin Yu, Chuanzhao Yao, Zezhou Guo, et Song Yang. 2019. « Experimental study on heat and exergy balance of a dual-fuel combined injection engine with hydrogen and gasoline ». *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (39): 22301-15.
- Yu, Xiumin, Zezhou Guo, Ling He, Wei Dong, Ping Sun, Yaodong Du, Zhe Li, Hang Yang, Sen Wang, et Haiming Wu. 2019. « Experimental study on lean-burn characteristics of an SI engine with hydrogen/gasoline combined injection and EGR ». *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (26): 13988-98