

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
L'ARECHERCHE

SCIENTIFIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE
TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé de Mémoire

L'influence de l'instant l'allumage sur les performances et les émissions de moteur à hydrogène

Présentés par :

- BESSEGHIER Mahdjouba
- BOUZIANE Fatima Zohra

Soutenu le : 06/07/2020.....devant le jury :

Mr. KAID Nouredine	MCB	Centre Universitaire Naama	Président
Mr. NAIMA Khatir	MCA	Centre Universitaire Naama	Encadreur
Mr. MEDJAHED	MCB	Centre Universitaire Naama	Examineur

REMERCIEMENTS

Nous remercions dieux miséricorde de nous avoir donné la volonté et le courage pour surmonter toutes les difficultés rencontrées et avoir continuer nos études dans de très bonnes conditions.

Nous tenons d'abord à remercier respectueusement notre encadreur

Mr KHATIR NAIMA pour la confiance, les conseils et l'orientation, et pour la documentation qu'il a mis à notre disposition.

Nos remerciements vont également au Dr. KAID NOUREDDIN, d'avoir accepté de nous faire l'honneur de présider le jury de ce mémoire et

Mr MEDJAHED de bien vouloir l'examiner.

Nous remercions l'ensemble des professeurs de génie mécanique qui ont contribué à assurer notre formation Master.

Nos remerciements également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et la réalisation de ce travail.



Dédicace



Tout cours de combustion qui se respecte contiendra le fameux concept de triangle du feu. Ce dernier précise que toute combustion nécessite une énergie d'activation, un combustible et un comburant et afin de dégager par la suite de l'énergie. Il en va de même pour ce travail qui n'aurait pu être réalisé sans la présence de ces trois éléments essentiels dans la vie d'un être humain...

- ❖ *Cette alchimie n'aurait pas eu lieu sans la bénédiction du bon Dieu qui m'a créée et qui m'a ordonné dans le premier texte du coran d'apprendre.*
- ❖ *Des parents bien instruits est essentiel pour que le oisillon apprenne à bien voler de ses propres ailes. mes frères et mes sœurs sans oublier toute la famille, sur tout « MON PAPA CHERI ».*
- ❖ *toute la famille GUERINIK, mon mari AMINE qui m'a soutenu dans ce travail, mes beaux parents, mes belles sœurs et surtout HANANE qui m'a accompagnée durant toute l'année.*
- ❖ *Et en fin une volonté qui vous motive suffit pour combler le parchemin de cette alchimie.*



BOUZIANE Fatima zohra

Dédicace



Tout cours de combustion qui se respecte contiendra le fameux concept de triangle du feu. Ce dernier précise que toute combustion nécessite une énergie d'activation, un combustible et un comburant et afin de dégager par la suite de l'énergie. Il en va de même pour ce travail qui n'aurait pu être réalisé sans la présence de ces trois éléments essentiels dans la vie d'un être humain...

❖ *Cette alchimie n'aurait pas eu lieu sans la bénédiction du bon Dieu qui m'a créé et qui m'a ordonné dans le premier texte du coran d'apprendre.*

❖ *A ma très chère mère*

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

❖ *Je dédie aussi mes frères et mes sœurs sans oublier toute la famille.*

❖ *Et enfin une volonté qui vous motive suffit pour combler le parchemin de cette alchimie.*



BESSEGHIER Mahdjouba

Abstract

Hydrogen with low spark-energy requirement, wide flammability range and high burning velocity is an important candidate for being used as fuel in spark-ignition engines. It also offers CO₂ and HC free combustion and lean operation resulting in lower NO_x emissions. However, well examined external mixing of hydrogen with intake air causes backfire and knock especially at higher engine loads. In addition, low heating value per unit of volume of hydrogen limits the maximum output power. In this study, attention was paid to full usage of hydrogen advantage employing internal mixing method. Hydrogen was directly injected into cylinder of a single-cylinder test engine using a high-pressure gas injector and effects of injection timing and spark timing on engine performance and NO_x emission were investigated under wide engine loads. The results indicate that direct injection of hydrogen prevents backfire, and that high thermal efficiency and output power can be achieved by hydrogen injection during late compression stroke. Moreover, by further optimization of the injection timing for each engine load, NO_x emission can be reduced under the high engine output conditions. 2006 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Internal combustion engine; Direct-injection SI hydrogen engine; Combustion process; Performance; NO_x emission

Résumé

L'hydrogène avec de faibles besoins en énergie d'étincelle, une large plage d'inflammabilité et une vitesse de combustion élevée est un candidat important pour être utilisé comme carburant dans les moteurs à allumage commandé. Il offre également une combustion sans CO₂ et HC et un fonctionnement pauvre entraînant une réduction des émissions de NO_x. Cependant, un mélange externe bien étudié d'hydrogène avec de l'air d'admission provoque un retour de flamme et un cliquetis, en particulier à des charges de moteur plus élevées. De plus, un faible pouvoir calorifique par unité de volume d'hydrogène limite la puissance de sortie maximale. Dans cette étude, l'attention a été accordée à l'utilisation complète de l'avantage de l'hydrogène en utilisant une méthode de mélange interne. De l'hydrogène a été directement injecté dans le cylindre d'un moteur d'essai monocylindre à l'aide d'un injecteur de gaz à haute pression et les effets du calage de l'injection et du calage des étincelles sur les performances du moteur et les émissions de NO_x ont été étudiés sous de fortes charges. Les résultats indiquent que l'injection directe d'hydrogène empêche le retour de feu et que l'efficacité thermique et la puissance de sortie élevées peuvent être obtenues par injection d'hydrogène pendant la course de compression tardive. De plus, en optimisant davantage le calage de l'injection pour chaque charge du moteur, les émissions de NO_x peuvent être réduites dans les conditions de puissance élevée du moteur. 2006 Association internationale pour l'énergie hydrogène. Publié par Elsevier Ltd. Tous droits réservés.

Mots-clés: moteur à combustion interne; moteur à hydrogène SI à injection directe; processus de combustion ; performance ; émission de NO_x.

ملخص

يعتبر الهيدروجين الذي يتطلب طاقة شرارة منخفضة ومدى قابلية واسعة وسرعة حرق عالية مرشحاً مهماً لاستخدامه كوقود في محركات اشتعال الشرارة. كما أنه يوفر احتراقاً خالياً من احادي أكسيد الكربون وثنائي أكسيد الكربون وتشغيل هزيل مما يؤدي إلى تقليل انبعاثات أكاسيد النيتروجين. ومع ذلك ، فإن الخلط الخارجي المدروس جيداً للهيدروجين مع هواء السحب يسبب عودة للشعلة وطرق خاصة في أحمال المحرك الأعلى. بالإضافة إلى ذلك ، فإن قيمة التسخين المنخفضة لكل وحدة من حجم الهيدروجين تحد من طاقة الإخراج القصوى. في هذه الدراسة ، تم إيلاء الاهتمام للاستخدام الكامل لميزة الهيدروجين باستخدام طريقة الخلط الداخلية. تم حقن الهيدروجين مباشرة في أسطوانة محرك اختبار أحادي الأسطوانة باستخدام حاقن غاز عالي الضغط وتأثيرات توقيت الحقن وتوقيت الشرارة على أداء المحرك وتم فحص انبعاث أكاسيد النيتروجين تحت أحمال المحرك العريضة. تشير النتائج إلى أن الحقن المباشر للهيدروجين يمنع العودة ، وأن الفعالية الحرارية العالية وقوة الخروج يمكن تحقيقها عن طريق حقن الهيدروجين أثناء شوط الانضغاط المتأخر. علاوة على ذلك ، من خلال زيادة تحسين توقيت الحقن لكل حمل محرك ، يمكن تقليل انبعاث أكاسيد النيتروجين في ظل ظروف إنتاج المحرك العالية.

تم النشر بواسطة الرابطة الدولية للطاقة الهيدروجينية Elsevier Lt 2006 جميع الحقوق محفوظة.

الكلمات المفتاحية: محرك الاحتراق الداخلي. محرك هيدروجين SI للحقن المباشر ؛ عملية الاحتراق ؛ الأداء؛ انبعاث أكاسيد النيتروجين.

SOMMAIRE

Remerciement.....	ii
Dédicace.....	iii
Résumé.....	iv
SOMMAIRE.....	vi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAU	xiii
NOMENCLATURE	xiv
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I : Généralité sur les moteurs.....	4
1. Introduction.....	5
2. Moteur à combustion interne (à explosion)	5
2.1. Les cycles de fonctionnement.....	5
2.1.1. Un moteur à quatre temps (ou quatre cycles).....	5
2.1.2. Moteur à deux temps.....	6
3. les types des moteurs MCI.....	6
3.1. Moteurs à essence (à allumage commandé).....	6
3.1.2. Avantages et inconvénients.....	8
3.2. Moteurs Diesel (à allumage par compression).....	8
3.2.2. Avantages et inconvénients.....	9
3.3. Moteurs à gaz naturel.....	10
3.3.1. Avantages et inconvénients.....	10
3.4. Moteur GPL.....	10
3.4.1. Avantages et Inconvénients.....	11
3.5. Moteur hybride.....	11
3.5.1. Les différents types d'hybridation.....	12
3.5.2. Les différents types de montages.....	12
3.5.3. Avantages et inconvénients.....	12
3.6. Moteurs à hydrogène.....	13
3.6.1-Différents types de moteurs à hydrogène.....	13

3.6.1.1-Moteur à hydrogène thermique	13
3.6.1.2. Le rendement du moteur à hydrogène et son consommation.....	13
4. Moteur à hydrogène électrique avec pile à combustible.....	14
4.1. Principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	14
4.2. Différentes types de pile à combustible	15
4.2.1. La pile à membrane échangeuse de protons	15
4.2.2. Pile à oxyde solide.....	15
5. Comparaison entre : Moteur diesel / Moteur à hydrogène.....	17
6. Comparaison des rendements.....	18
CHAPITRE 2 : Introduction Générale.....	19
1. Introduction.....	20
I/ l'hydrogène.....	20
I.1. Les sources de fabrication.....	20
I.2. Hydrogène comme combustible.....	21
I.2.1. Caractéristiques générales.....	21
I.2.2. Propriétés de l'hydrogène.....	22
I.3. Les mélanges Hydrogène/ Hydrocarbures pour les MCI	24
I.4. le stockage hydrogène comme carburant dans les MCI.....	24
II/ Le moteur à hydrogène.....	25
II.1. Evolution de la technologie des moteurs à combustion interne à hydrogène.....	25
II.2. L'allumage	26
II.2.1. Calage d'allumage – ignition timing.....	26
II.2.1.1. Le bon allumage timing	26
II.2.2. Les système d'allumage.....	27
II.2.2.1. Fonction de l'allumage	27
II.2.2.2. Création de l'arc électrique.....	27
II.2.3. Principe de fonctionnement	27

II.2.4. Différents types d'allumage	27
II.2.4. A. L'allumage classique par batterie	28
II.2.4. A.1. Principe de fonctionnement	28
II.2.4. A.2. Les organes de l'allumage	28
II.2.4.B-Allumage électronique	30
II.2.4. B.1. Evolution de système d'allumage électronique.....	30
II.2.4. B.2. Principe de l'allumage électronique	30
II.2.4. C-Allumage commandés par ordinateur.....	31
II.3. Dans le moteur à hydrogène.....	31
II.3.1.Énergie d'allumage	31
II.3.2.Délais d'auto-inflammation.....	31
II.3.3. Les avantages d'hydrogène dans le moteur.....	32
II.3.4.Les inconvénients d'hydrogène dans le moteur	32
CHAPITRE 3 : le code de calcul CFD CONVERGE.....	33
1. Introduction.....	34
2. Description générale du code de simulation CONVERGE.....	34
3. Structure standard de CONVERGE.....	34
4. Les fichiers de sortie et d'entrée dans converge.....	36
5. Conclusion.....	39
CHAPITRE 4 : Modélisation Numérique et Formulation Mathématique.....	40
1. Objectif.....	41
2. Présentation du moteur Yanmar NFD-170.....	41
3. Modélisation géométrique et domaine de calcul.....	43
4. Préparation des calculs par CONVERGE.....	44
4.1. Sélection une expérience à simuler.....	44
4.2. Les conditions aux limites.....	45
4.3. Les conditions initiales.....	45
5. La modélisation physique.....	45
5.1. L'équation de la conversation des espèces chimiques.....	45

5.2. Equation de conservation de la masse.....	46
5.3. Equation de quantité de mouvement.....	46
5.4. L'équation d'état du gaz.....	46
5.5. Modélisation de la turbulence.....	47
5.6. Modélisation de l'allumage.....	48
5.7. Modélisation de la combustion.....	49
5.8. Durée de la combustion.....	50
5.9. Modélisation des émissions.....	50
6. Conclusion.....	52
 CHAPITRE 5 : Discussions et résultats	 53
1. Introduction.....	54
2. Discussion des résultats de simulation.....	54
2.1. Le calage.....	54
2.2. La température, le taux de dégagement de chaleur et le dégagement de chaleur.....	55
2.3. Les radicaux libres H ,O ,OH.....	57
2.4. L'effet sur la consommation de H ₂ ,O ₂ et production de H ₂ O.....	59
3. Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
REFERENCES.....	63

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Les quatre temps d'un moteur à combustion interne	5
Figure 2: Moteur à deux temps.....	6
Figure 3: Moteur à essence.....	7
Figure 4: Cycle théorique de Beau de Rochas pour un moteur à 4 temps.....	7
Figure 5: Moteur diesel.....	8
Figure 6: Représentation du cycle théorique du Diesel	9
Figure 7: Moteur GPL.....	11
Figure 8: Une pile à combustible.....	14
Figure 9 : Principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	15
Figure 10 : Pile à combustible à membrane d'échange de protons.....	16
Figure 11: Pile à combustible à oxyde solide.....	17
Figure 12 : l'hydrogène est le premier élément dans la classification périodique.....	20
Figure 13: Principales origines de l'hydrogène produit dans le monde (2011).....	21
Figure 14 : L'allumage par batterie.....	28
Figure 15 : Allumeur classique.....	28
Figure 16 : La Bobine La bougie d'allumage	29
Figure 17 : Bougie d'allumage.....	29
Figure 18 : La structure standard de converge.....	36
Figure 19 : Projection géométrique du moteur Yanmer NFD-170.....	41
Figure 20 : L'injection du moteur Yanmar NFD-170.....	42
Figure 21 : Modèle géométrique du moteur sous CONVERGE.....	43
Figure 22 : Modèle géométrique de l'injection sous CONVERGE.....	44
Figure 23 : Modèle géométrique de la bougie sous CONVERGE.....	44
Figure 24 : Evolution de la pression dans le cylindre (expérience et simulation converge).....	54
Figure 25 : L'évolution de la température en fonction de l'angle de vilebrequin.....	55
Figure 26 : L'évolution de la température en fonction de l'angle de vilebrequin.....	56

Figure 27 : La quantité de la chaleur dégagée en fonction l'angle de vilebrequin.....	57
Figure 28 : Evolution de H en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin.....	58
Figure 29 : Evolution de H en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin.....	58
Figure 30 : Evolution de OH en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin.....	59
Figure 31 : Evolution de H ₂ en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin.....	60
Figure 32 : Evolution de O ₂ en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin.....	60
Figure 33 : Evolution de H ₂ O en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin.....	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Comparaison entre le moteur diesel et le moteur à hydrogène.....	17
Tableau 2 : Comparaison des rendements énergétiques respectifs de divers modes de propulsion pour les véhicules à moteur (valeurs de consommation y compris la production du carburant.....)	18
Tableau 3: Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène.....	23
Tableau 4: Les fichiers d'entrée.....	38
Tableau 5 : Les fichiers sortis.....	39
Tableau 6 : Caractéristiques géométriques du moteur Yanmar NFD-170.....	42
Tableau 7 : Caractéristiques du système d'injection du moteur Yanmar NFD-170.....	43
Tableau 8 : Caractéristiques de l'expérience sélectionnée.....	44
Tableau 9 : Les conditions initiales.....	45
Tableau 10 : Valeurs des constantes dans les modèles de turbulence.....	48
Tableau 11 : Valeurs l'énergie cinétique la dissipation turbulente.....	48
Tableau 12: Angles début-fin des phases de l'allumage.....	49
Tableau 13 : Les durées de la combustion.....	50

NOMENCLATURE

T	Température [°C]
P	Pression [MPa]
V	volume
ρ	Masse volumique [kg/m ³]
λ	Conductivité thermique [W/mk]
T _f	Température de fusion [°C]
Q _a	chaleur ajouté
Q _r	chaleur rejeté
σ	Contrainte mécanique [MPa]
Φ	Flux de chaleur [W/m].
C _p	Capacité thermique massique à pression constante [J/kg.K].
q	Rapport de chaleur interne [W/m ³].
ΔL	Dilatation due à une variation de température [mm]
α	Coefficient de dilatation thermique [1/K]
L	Longueur caractéristique [mm]
ΔT	Différence de température entre la température initiale et la température du matériau finale [°C] .

Notions Grecques

σ	Tenseur des contraintes visqueuses
s	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente
λ	Conductivité thermique
μ	Viscosité dynamique
ν	Viscosité cinématique
ρ	Masse volumique
ρ_m	Masse volumique de l'espèce
τ_c	Échelle de temps caractéristique de la réaction chimie
ρ_{tot}	Masse volumique dans la cellule
$\bar{\rho}$	Masse volumique moyen
A	Diffusivité thermique
a_r, b_r	Coefficient empiriques
C_μ	Modèle de turbulence constante
c_{s1}	Constante des modèles $k - s$ et RNG $k - s$
c_{s2}	Constante des modèles $k - s$ et RNG $k - s$
c_{s3}	Constante des modèles $k - s$ et RNG $k - s$
D	Coefficient de diffusion
F	Retard
K	Énergie cinétique
R	Constante des gaz
r	La réaction
S	Le terme source
Sc	Nombre de Schmidt
U	La vitesse [m/s]
Y_m	Fraction de masse des espèces
u_i	Vitesse instantanée. [m/s]
\bar{u}_i	Vitesse Moyenne d'ensemble [m/s]
W_m	Masse moléculaire de l'espèce m

Abréviations

AFR
AOSA

AOSE

CI
CO
CO₂
DF
DI
GN
GNC
GNL
GPL
HC
NO_x
PCI
PES
PMB
PMH
RFSA

RFSE

RGE
T
CFD
MCI
RNG
IC
IVC
EVO
TKE
GNC

Significations et unités

Rapport air carburant
Avance à l'ouverture de la soupape d'admission, [°V]
Avance à l'ouverture de la soupape d'échappement, [°V]
Combustion Interne
Monoxyde de carbone
Dioxyde de carbone
Dual-fuel
Délai d'auto-inflammation, [deg V]
Gaz naturel
Gaz naturel comprimé
Gaz naturel liquéfié
Gaz de pétrole liquéfié
Hydrocarbures imbrulés
Oxydes d'azote
Pouvoir calorifique inférieur, [MJ/kg]
Pourcentage de substitution énergétique, [%]
Point mort bas
Point mort haut
Retard de fermeture de la soupape d'admission, [°V]
Retard de fermeture de la soupape d'admission d'échappement, [°V]
Recirculation des gaz d'échappement
Temps [s]
Computational Fluid Dynamic
Moteur à Combustion Interne
ReNormalization Group
Ignition combustion
Intake valve close
exhaust valve open
Energie cinitique turbulente
Gaz naturel comprimé



Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les polluants automobiles ont des effets immédiats et à long terme sur l'environnement. Les gaz d'échappement des voitures émettent une vaste gamme de gaz et de matières solides, causant le réchauffement planétaire, les pluies acides et nuisant à l'environnement et à la santé humaine. Le bruit des moteurs et les déversements de carburant causent également de la pollution. Les voitures, les camions et les autres moyens de transport sont les principaux responsables de la pollution atmosphérique, mais les propriétaires de voitures peuvent réduire les effets de leur véhicule sur l'environnement. [1]

Les principaux gaz qui contribuent directement à l'effet de serre sont: le dioxyde de carbone (CO₂) avec 31 % des émissions, le protoxyde d'azote (N₂O) avec 0.9 % des émissions totales, les hydrofluorocarbures (HFC) avec 19% des émissions totales et enfin le méthane (CH₄) <0.1 % des émissions totales.

En outre des gaz à effet de serre, on peut considérer le transport routier comme étant le principal responsable des émissions d'oxydes d'azote (NO, NO₂) et de dioxyde de soufre (SO₂). Le monoxyde et le dioxyde d'azote présent dans l'air sont nocifs pour la santé humaine. De plus, l'oxyde d'azote (NO) et le dioxyde de soufre (SO₂), combinés avec de l'eau, évoluent chimiquement dans l'air pour former des acides, conduisant à l'eutrophisation des milieux aquatiques et des sols.

Dans l'atmosphère, le dioxyde d'azote se transforme en acide nitrique, contribuant à la pollution acide de l'air. D'autres émissions des moteurs automobiles, tels que les hydrocarbures imbrûlés (HC), qui proviennent de l'inhibition de la combustion près des parois, sont aussi nocives pour l'homme et notre planète.

En conséquence, les normes pour lutter contre la pollution sont de plus en plus strictes afin de faire face au problème de changement climatique. La recherche et l'industrie automobile doivent ainsi chercher des solutions technologiques pour réduire les émissions polluantes soit au niveau de l'échappement soit au niveau de la combustion.

Dans ce contexte, l'utilisation future de carburants de substitution est la seule solution durable pour protéger le climat et assurer l'approvisionnement énergétique mondial du secteur du transport à long terme.

Objectif du travail :

L'objectif majeur de cette étude est d'étudier l'influence de l'instant d'allumage sur les performances et les émissions de moteur à hydrogène. Pour cela, deux instants ont été choisis : - 11 et -8 degré avant le PMH. Les résultats de notre simulation ont été validés et confrontés aux résultats expérimentaux de référence. [3]

Organisation du travail :

Le premier chapitre décrit les moteurs à combustion interne, on présente les différents types de moteur, le principe de fonctionnement d'un moteur à deux temps et à quatre temps, après nous allons citer les cycles thermodynamique, puis les avantages et les inconvénients de chaque types et une petite comparaison.

Le deuxième chapitre s'intéresse à donner des notions générales sur l'hydrogène et le moteur à hydrogène. Dans ce chapitre, on montre deux parties :

Dans la première partie, nous allons voir c'est quoi l'hydrogène, ses sources de production, l'hydrogène combustible, son mélange avec l'hydrocarbure et son stockage.

Dans la deuxième partie, on va voir l'évolution de ce moteur puis on va voir c'est quoi un allumage commandé, les systèmes d'allumage utilisé, puis l'allumage dans le moteur à hydrogène et les avantages et les inconvénients de ce moteur.

Le troisième chapitre développera la modélisation numérique et formulation mathématique. On y trouve le système d'équation aux dérivées partielles régissant les écoulements réactifs et turbulents. Aussi, on a présenté les modèles physiques et chimiques implanté dans le code.

Le quatrième chapitre, nous avons passé à expliquer le programme de simulation CONVERGE CFD et donne une description du code et son domaine d'utilisation.

Le cinquième chapitre nous comparons les résultats numériques et expérimentaux, l'analyse, l'interprétation et la discussion des résultats.

CHAPITRE 1.

Généralité sur les

MCI.

1. Introduction :

Le moteur est un dispositif qui peut transformer une énergie non-mécanique (chimique, électrique, thermique par exemple) en une énergie mécanique ou travail.

2. Moteur à combustion interne (à explosion) :

Les moteurs à combustion interne sont des machines thermiques émettant de l'énergie utile développée par la combustion de carburant.

La plupart des voitures présentes sur le marché actuel fonctionne avec un moteur thermique (diesel, essence, hydrogène, hybride, GPL), chaque type est différent de l'autre avec son principe de fonctionnement. [4]

2.1. Les cycles de fonctionnement

2.1.1. Un moteur à quatre temps (ou quatre cycles) :

Est un moteur à combustion et explosion basé sur le cycle de Beau de Rochas déposé. Il est toujours le principal type de motorisation des véhicules automobiles terrestres.

Tous les moteurs à combustion interne à quatre temps fonctionnent sur le même principe. Ils ont quatre (4) temps qui sont, voir:

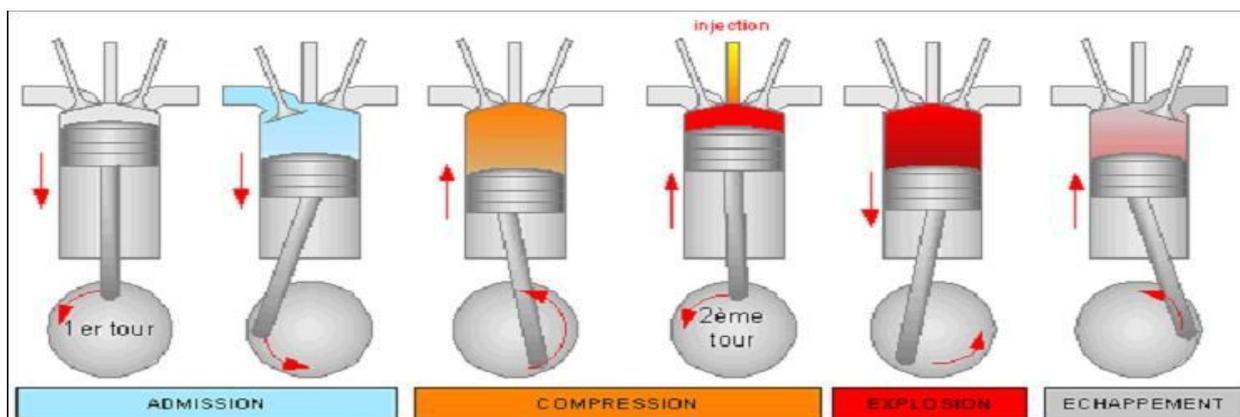


Figure 1: Les quatre temps d'un moteur à combustion interne [2].

Premier temps : Admission de la masse gazeuse pendant la course descendante du piston par l'orifice d'admission (soupape pour les moteurs de plaisance). Le mélange air essence est aspiré.

Chapitre 1 : Généralité sur les MCI

Deuxième temps : Compression de la masse gazeuse durant la montée du piston après fermeture de l'orifice d'admission. En fin de compression (piston en haut), inflammation du mélange gazeux par l'étincelle d'allumage (la bougie).

Troisième temps : Détente ou explosion, les gaz sont portés à une température élevée par combustion, avec l'explosion, la pression augmente entraînant le piston vers le bas par l'effort exercé.

Quatrième temps : Echappement, l'orifice d'échappement (soupape à nouveau) s'ouvre, les gaz brûlés sont refoulés par la course montante du piston.

2.1.2. Moteur à deux temps :

Le cycle des 2 temps intègre les 4 phases du 4 temps, mais sur un seul tour moteur : admission et échappement sont rapides et simultanée entre la fin de détente et le début de la compression.

- Premier temps : Compression avec inflammation des gaz en fin de cycle
- Deuxième temps : Détente et explosion, les gaz sont portés à une température élevée par combustion, avec l'explosion, la pression augmente entraînant le piston vers le bas par l'effort exercé.

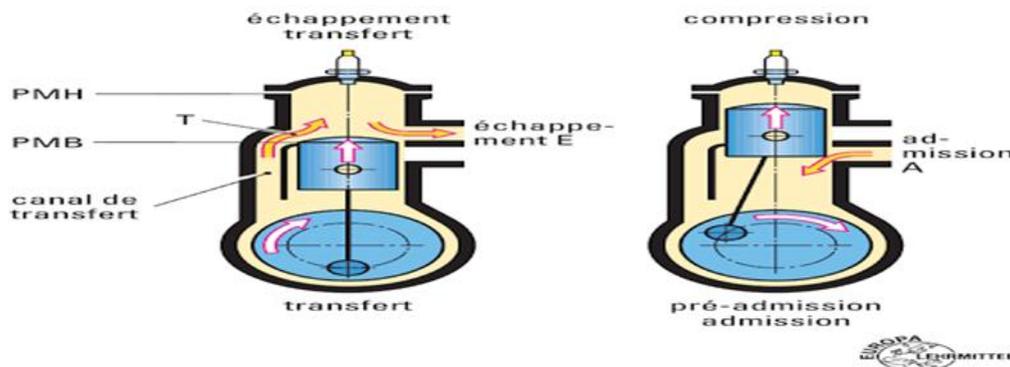


Figure 2:moteur à deux temps.

3. les types des moteurs MCI:

3.1. Moteurs à essence (à allumage commandé) :

Le moteur essence est un moteur à allumage commandé qui utilise l'essence comme un carburant, très improprement appelé « moteur à explosion ». Communément appelé « moteur essence » On appelle aussi le cycle de Beau De Rochas : il s'agit d'un moteur à combustion interne a 2 ou 4 temps.



Figure 3: Moteur à essence.

3.1.1. Cycle théorique de Beau de Rochas (4temps) :

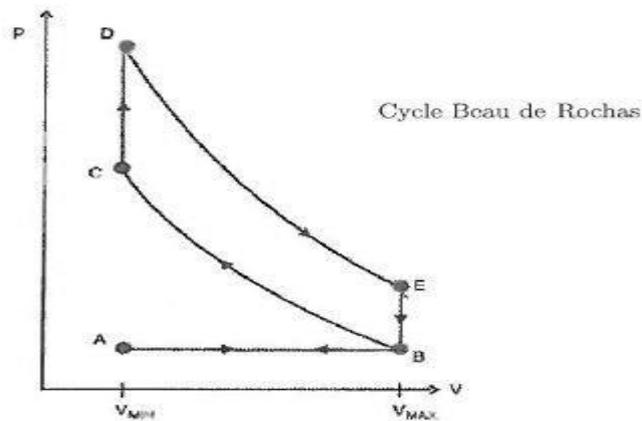


Figure 4: Cycle théorique de Beau de Rochas pour un moteur à 4 temps

Représentation théorique de cycle de beau de Rochas :

B-C : Une compression adiabatique ($Q_{BC}=0$).

C-D : Une transformation isochore ($V=cts$).

D-E : Une détente adiabatique ($Q_{DE}=0$).

E-B : Une transformation isochore ($V=cts$)

3.1.2. Avantages et inconvénients:

➤ Avantages de moteur essence :

- La facilité d'utilisation et de maintenance de ce type de moteur explique également son succès. Aussi, ces moteurs ne sont pas délicats et fonctionnent sans problème avec divers carburants.
- Le moteur essence est relativement plus silencieux qu'un moteur diesel.
- Le moteur à allumage commandé est plus vif lorsqu'il est froid par rapport à un moteur diesel, car l'allumage se fait par l'intermédiaire d'une bougie. Le démarrage à froid est meilleur pour un moteur à explosion essence.

➤ Inconvénients de moteur essence :

- La combustion entraîne le rejet de gaz potentiellement polluants (CO₂, HC, CO, NO₂).
- Les moteurs à explosion utilisent généralement un carburant d'origine fossile. Cette source d'énergie n'est pas renouvelable, donc son prix ne va cesser d'augmenter.

3.2. Moteurs Diesel (à allumage par compression) :

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



Figure 5: Moteur diesel.

3.2.1. Cycle théorique diesel:

Le cycle diesel théorique est considéré comme étant celui des moteurs à allumage par compression.

Le cycle est composé de quatre (4) transformations représentées sur la figure ci-dessous :

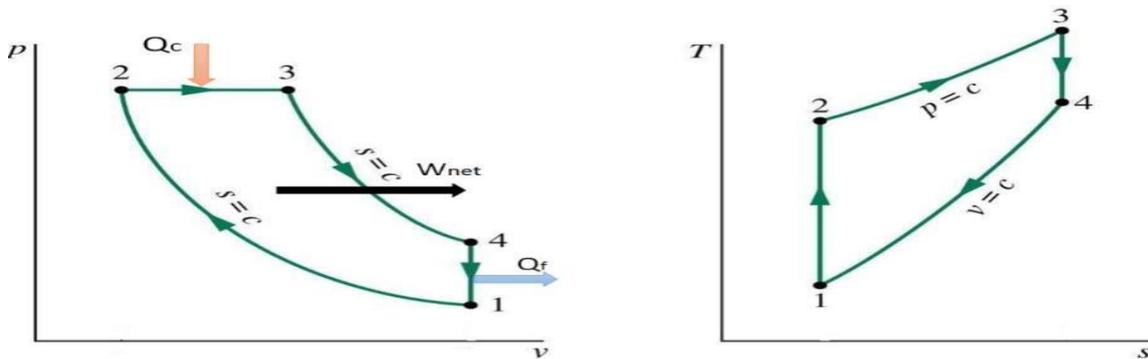


Figure 6: Représentation du cycle théorique du Diesel [5].

Les transformations sont :

1-2 Compression adiabatique de l'air ($Q_{12}=0$).

2-3 transformation isobare ($P=cst$).

3-4 détente adiabatique ($Q_{34}=0$).

4-1 transformation isochores ($V=cst$).

3.2.2. Avantages et inconvénients:

➤ Avantages de moteur diesel :

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

➤ Inconvénient de moteur diesel :

- De fortes contraintes thermiques et mécaniques sont exercées sur les composants mécaniques du moteur, d'où la nécessité de les sur dimensionner.

Chapitre 1 : Généralité sur les MCI

- Le coût d'entretien est environ 20 % plus élevé que celui d'un moteur à essence.
- L'étanchéité entre le cylindre et le piston est plus difficile à réaliser.
- Le moteur est plus bruyant. [7]

3.3. Moteurs à gaz naturel :

Les moteurs fonctionnant avec ce type de carburant émettent beaucoup moins de polluants que ceux qui utilisent les combustibles traditionnels tels que l'essence, majoritairement à l'effet de serre. En outre, les moteurs au gaz naturel émettent moins d'agents polluants acidifiants que les carburants conventionnels.

3.3.1. Avantages et inconvénients :

➤ avantages de moteur à gaz naturel :

- Couple disponible à bas régime plus élevé qu'à l'essence.
- Bruits de fonctionnement atténués.
- Démarrages en richesse stœchiométrique possibles.
- Indice d'octane élevé.

➤ Inconvénients de moteur à gaz naturel :

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

3.4. Moteur GPL :

Le GPL (gaz de pétrole liquéfié) est une adaptation du moteur à essence, qui devient alors à bicarburation. Deux réservoirs alimentent le bloc, l'un au sans plomb, l'autre au gaz.

Ce mélange de gaz butane et propane à parts égales ayant un indice d'octane élevé possède des propriétés proches de celles de l'essence malgré un pouvoir calorifiques supérieur à la même masse d'essence, le moteur alimenté en GPL devient plus gourmand et légèrement moins toxique.



Figure 7: Moteur GPL.

3.4.1. Avantages et Inconvénients:

➤ Avantages de moteur GPL :

- Bonus écologique à l'achat.
- Le GPL est plus respectueux de l'environnement.
- Bicarburant (GPL et essence).
- Le coût du GPL est moins cher que l'essence (Le GPL, le carburant le moins cher du marché).

➤ Inconvénients de moteur GPL :

- Baisse de la performance de 5% comparé à celle de l'essence.
- La roue de secours se substitue au réservoir de GPL (sauf si on monte une citerne).
- Poids de réservoir de GPL.
- Ces motorisations sont moins agréables à utiliser car elles engendrent une perte de puissance de 5 à 10% (comparé à l'essence).

3.5. Moteur hybride :

Les véhicules hybrides sont équipés de deux moteurs: un thermique et un électrique afin de réduire au maximum la consommation de carburant. S'ils disposent quasiment tous d'un moteur à combustion interne principale et d'un moteur électrique complémentaire. [8]

3.5.1. Les différents types d'hybridation:

On peut distinguer différents types de voitures hybrides en fonction de l'importance de leur système électrique :

- a) Start & Stop
- b) Mild-hybrid
- c) Full-hybrid

3.5.2. Les différents types de montages:

Il existe différentes architectures utilisées pour le montage des moteurs électriques et thermique sur une voiture hybride. On peut distinguer 3 montages qui sont:

- Le montage série.
- Le montage en parallèle.
- Le montage série-parallèle.

3.5.3. Avantages et inconvénients:

➤ Avantages de moteur hybride :

- Permet également de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluants.
- L'avantage de l'hybride sur l'électrique pur est son autonomie, non limité par les batteries.
- Le temps de recharge moindre.

➤ Inconvénients de moteur hybride :

- Les accumulateurs électrochimiques des véhicules hybrides n'auraient pas une durée de vie aussi longue que le véhicule lui-même: il faudrait donc changer ceux-ci une ou plusieurs fois avant le recyclage total du véhicule, ce qui entraînerait un surcoût de maintenance et une obligation importante de recyclage pour le fabricant.
- Faible capacité de la batterie, qui ne permet pas de rouler en mode 100% électrique sur plus d'une dizaine de kilomètres.

3.6. Moteurs à hydrogène :

Le moteur à combustion interne peut sans importante modification fonctionner à l'hydrogène pour produire de l'énergie mécanique en émettant seulement la vapeur d'eau et une petite quantité d'oxydes d'azote. Par conséquent, le moteur à combustion interne à hydrogène pourrait contribuer à relever les deux principaux défis qui nous préoccupent: réduire les émissions de gaz à effet de serre et remédier à l'épuisement des hydrocarbures.

3.6.1. Différents types de moteurs à hydrogène :

Il existe deux sortes de moteur à hydrogène:

- Moteur à hydrogène thermique (moteur à explosion).
- Moteur à hydrogène électrique avec pile à combustible.

3.6.1.1. Moteur à hydrogène thermique :

Le moteur à hydrogène thermique est un moteur à combustion interne (moteur à explosion), permet de convertir l'énergie chimique entre le dihydrogène H_2 et le dioxygène O_2 en énergie mécanique. Cette combustion est théoriquement très propre, puisqu'elle ne génère que de la vapeur d'eau pure H_2O et NO_x (d'oxyde d'azote) et de la chaleur. Il fonctionne suivant un cycle à quatre temps.

3.6.1.2. Le rendement du moteur à hydrogène et son consommation : [6]

Un des plus gros point fort de la voiture à hydrogène est son rendement énergétique, c'est la raison prédominante pour laquelle on cherche à développer ce moteur.

Le rendement du moteur à hydrogène est plus élevé (80%).

Pour la consommation

Toyota Mirai est la première voiture à hydrogène, avec :

Une puissance de moteur 113 kW (154ch).

Consommation cycle mixte 0,76 kg /100 km

Consommation cycle urbain 0,69 kg /100 km

Consommation cycle mixte extra-urbain 0,8 kg /100 km

4. Moteur à hydrogène électrique avec pile à combustible :

Une pile à combustible est une pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène), couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air.

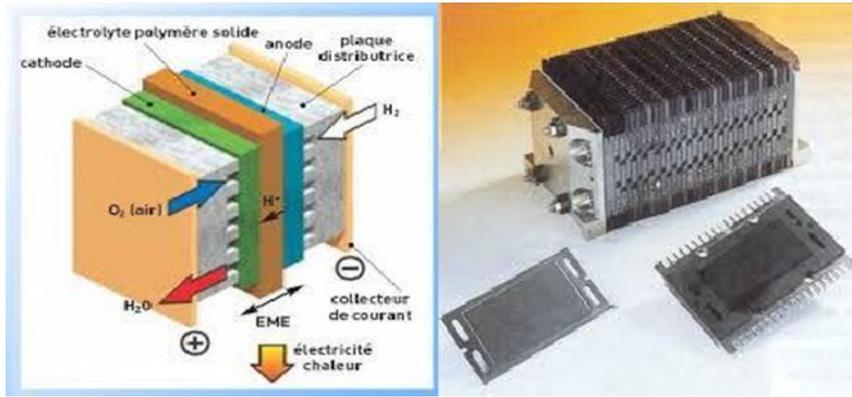


Figure 8: Une pile à combustible.

4.1. Principe de fonctionnement de la pile à combustible :

L'hydrogène stocké dans le réservoir est envoyé vers une pile à combustible, où il rencontre l'oxygène capté dans l'atmosphère. Ce mélange génère de l'électricité qui fait tourner le moteur.

Une cellule élémentaire est constituée de 2 éléments:

- ✓ Deux électrodes.
- ✓ Un électrolyte.

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. Anode, on amène le combustible (l'hydrogène). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène).

Une pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8V selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur.

Leur température de fonctionnement varie de 60 à 200°C selon les modèles. L'eau est généralement évacuée sous forme de vapeur avec l'excédent de dioxygène.

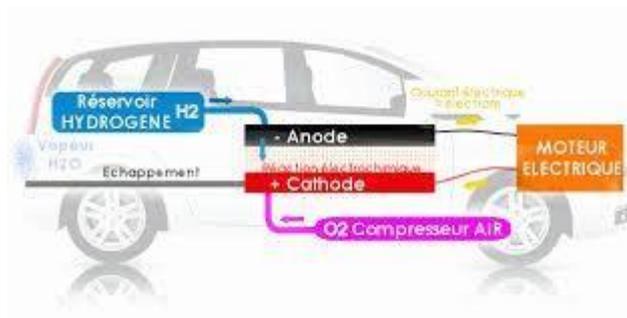


Figure 9 : Principe de fonctionnement de la pile à combustible.

4.2. Différentes types de pile à combustible : [8]

Il existe plusieurs types de piles à combustible dont les plus connues sont :

- La pile à membrane échangeuse de protons.
- La pile à oxyde solide.

4.2.1. La pile à membrane échangeuse de protons :

Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons comporte :

- Deux plaques bipolaires : une pour distribuer l'hydrogène, une autre pour distribuer l'oxygène et évacuer l'eau.
- Deux électrodes : une anode et une cathode pour faire circuler le courant électrique (électrons).
- Une membrane échangeuse de protons faisant fonction d'électrolyte : elle bloque le passage des électrons et laisse passer les ions H^+ .
- Des catalyseurs (platine) : qui accélèrent les réactions entre les gaz.

L'hydrogène (provenant d'une électrolyse ou d'un reformage d'hydrocarbures) entre par la plaque bipolaire à gauche. Arrivé à l'anode, le dihydrogène (H_2) se dissocie (oxydation) en ions H^+ et en électrons selon : $2H_2 = 4H^+ + 4e^-$

Les ions traversent alors la membrane, mais les électrons, bloqués, sont contraints d'emprunter un circuit extérieur, ce qui va générer un courant électrique.

A la cathode, les ions hydrogène, les électrons, et du dioxygène (pur ou provenant de l'air) se rencontrent pour former de l'eau selon la réaction : $4e^- + O_2 = 2H_2O$

L'eau et le dioxygène passent par la plaque bipolaire droite.

Cette réaction va produire également de la chaleur pouvant être récupérée.

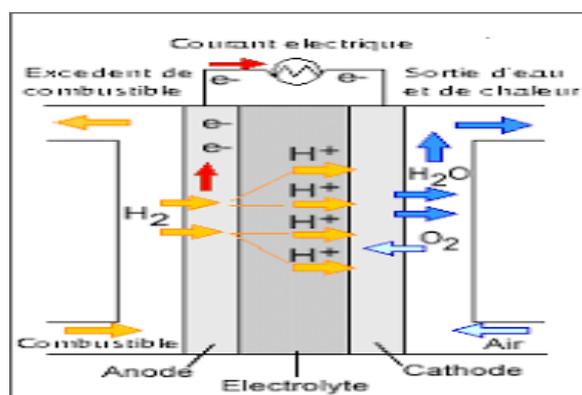


Figure 10 : Pile à combustible à membrane d'échange de protons.

4.2.2. Pile à oxyde solide :

Le principe est similaire. La seule différence est que la membrane échangeuse de protons est remplacée par une autre membrane appelée "membrane à oxyde solide". Les molécules dans la pile à combustible ne vont alors pas réagir de la même façon :

- Dans un premier temps, le dihydrogène entre par la plaque bipolaire à gauche, et arrive sur l'anode.
- Là, le dihydrogène se dissocie : $2H_2 = 2H + 4e^-$ (jusqu'à-là, aucun changement).
- Les électrons (e^-) empruntent un circuit extérieur, mais les ions H^+ (protons), au lieu de traverser la membrane, restent sur l'électrode.
- Après avoir traversé les dipôles, les électrons rejoignent la cathode chargée en dioxygène. Chaque molécule de dioxygène va fixer quatre électrons pour donner deux atomes doublement négatifs d'oxygène selon : $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$
- Les ions O^{2-} traversent la membrane et se combinent avec les protons H^+ pour former de l'eau. Mais ce type de pile n'est pas plus performant que la pile à membrane échangeuse de protons, elle ne fonctionne qu'à très haute température (autour de 600 à 800 °C) et sa fabrication coûte plus cher pour des piles de faible puissance. Elles sont donc réservées à des applications spécifiques nécessitant une forte puissance. [9]

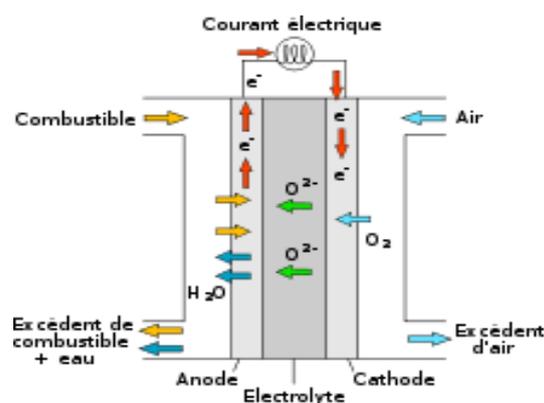


Figure 11: Pile à combustible à oxyde solide

4. Comparaison entre : Moteur diesel / Moteur à hydrogène : [10]

	Moteur à hydrogène / diesel
Principe de fonctionnement	Le moteur à hydrogène utilise l'hydrogène comme un carburant, et l'autre utilise le diesel aussi comme un carburant
Rendement	Le moteur à hydrogène a un rendement plus élevé (rendement explosif) que le moteur diesel.
consommation	La consommation cycle mixte est 0,76 kg /100 km pour une véhicule fonctionne avec l'hydrogène. La consommation moyenne en combustible est voisine de 190 g/ch pour le moteur diesel.
coût de carburant	Le hydrogène est très cher par rapport le diesel.
La pollution	Quand on parle sur la pollution, le moteur à hydrogène ne produit pas la pollution parce qu'il ne dégage pas les gaz d'échappement comme le moteur diesel, il dégage juste le vapeur d'eau (H_2O), alors le diesel est polluant par rapport le moteur à hydrogène.

Tableau 1 : Comparaison entre le moteur diesel et le moteur à hydrogène

5. Comparaison des rendements :

	Rendement de la production du carburant	Rendement d'un moteur à explosion	Rendement d'une cellule PEM	Rendement du système de propulsion
Essence* : extraction, raffinage et transport	85 %	20 %		17 %
Diesel* : extraction, raffinage et transport	89 %	23 %		21 %
Gaz naturel : utilisation directe	89 %	20 %		18 %
Méthanol de gaz naturel : utilisation directe	67 %	20 %		13 %
Propulsion hybride **	85 %	35 %		30 %
Hydrogène : électrolyse + compression	46 %		43 %	20 %
Hydrogène : gaz naturel + compression	67 %		43 %	29 %

Tableau 2 : Comparaison des rendements énergétiques respectifs de divers modes de propulsion.

Pour les véhicules à moteur (valeurs de consommation y compris la production du carburant) [12].

CHAPITRE 2.

Introduction

Générale.

Chapitre 2 : Introduction générale

1. Introduction :

L'injection à hydrogène existe depuis les années 1970 et consiste à injecter de l'hydrogène dans un moteur à combustion interne modifié. Cela permet d'obtenir une combustion plus propre, avec plus de puissance et moins d'émissions.

I/ l'hydrogène:

L'hydrogène est un gaz connu depuis fort longtemps. En effet les alchimistes l'appelaient l'«air inflammable» et l'obtenaient par traitement de la limaille de fer avec de l'acide sulfurique. Ses propriétés furent précisées par Cavendish en 1766. C'est Lavoisier qui lui donna son nom en 1783 en constatant que sa combustion avec l'oxygène donnait de l'eau. [13]

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn						
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Figure 12 : l'hydrogène est le premier élément dans la classification périodique.

I.1. Les sources de fabrication :

Sur Terre, l'hydrogène est associé dans la nature a beaucoup d'autres éléments : surtout à du carbone pour former le méthane (CH_4) et à de l'oxygène pour constituer l'eau (H_2O). Pour obtenir de l'hydrogène pur pour les besoins industriels, il convient donc de le séparer des éléments chimiques auxquels il est lié.

→Le procédé le plus courant de fabrication de l'hydrogène est le reformage (conversion de molécules à l'aide de réactions chimiques) du gaz naturel par de la vapeur d'eau surchauffée. On parle alors de vaporeformage. En présence de cette vapeur d'eau et de chaleur, les atomes carbonés (C) du méthane (CH_4) se dissocient. Après deux réactions successives, ils se reforment séparément pour obtenir, d'un côté, du dihydrogène (H_2) et, de l'autre, du dioxyde de carbone (CO_2). Cette opération nécessite donc le recours au gaz naturel.

Chapitre 2 : Introduction générale

→ Les principales voies de production à partir des hydrocarbures retenues au stade industriel passent par la production de syngaz, ou gaz de synthèse, qui est un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone ($H_2 + CO$).

→ Un autre procédé est la gazéification du charbon de bois, composé principalement de carbone et d'eau. Brûlé dans un réacteur à très haute température (entre 1 200 et 1 500 °C), le bois libère des gaz qui vont alors se séparer et se reformer pour obtenir, d'un côté, du dihydrogène (H_2) et, de l'autre, du monoxyde de carbone (CO).

→ L'hydrogène peut aussi être fabriqué à partir de l'électricité, par l'électrolyse de l'eau. Elle consiste, à l'aide d'un courant électrique, à décomposer l'eau (H_2O), en dioxygène (O_2), d'un côté, et en dihydrogène (H_2) de l'autre. [14]

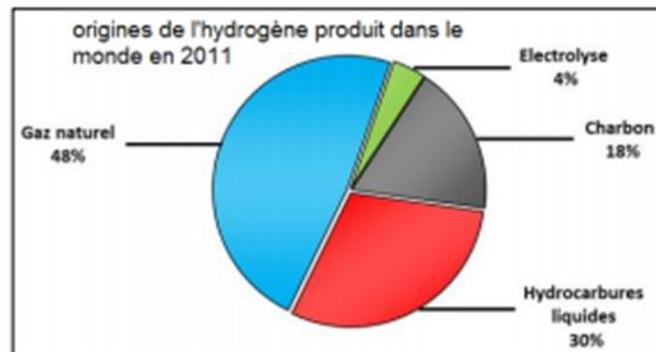


Figure 13: Principales origines de l'hydrogène produit dans le monde (2011).

► Si 96% de l'hydrogène sont produits à partir d'énergie fossile, 48% le sont par vaporeformage avec du gaz naturel, contre 30% avec les hydrocarbures liquides (naphta) et 18% avec du charbon. Quant à la production par électrolyse, 5 fois plus coûteuse, elle représente les 4% restants.

I.2. Hydrogène comme combustible :

I.2.1. Caractéristiques générales :

- Il est le seul combustible non carboné, donc non producteur de CO_2 au cours de sa combustion.
- Il est très abondant sur terre, sous forme atomique (eau, hydrocarbures, ...) et rare à l'état naturel sous forme moléculaire,
- Il est inodore, ce qui est un facteur de risque,
- Sa flamme est incolore, (invisible donc non détectable visuellement) et (la chaleur ne rayonne pas, donc a moins de risque d'enflammer d'autres objets ou surface à proximité),

Chapitre 2 : Introduction générale

- Il n'est pas toxique. [15]

I.2.2. Propriétés de l'hydrogène :

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple; son isotope le plus commun est constitué seulement d'un proton et d'un électron. L'hydrogène est ainsi le plus léger atome existant. Comme il ne possède qu'un électron, il ne peut former qu'une liaison covalente: c'est un atome univalent. C'est le constituant essentiel de notre univers mais il n'existe pas à l'état libre. Le dihydrogène H₂ est la forme moléculaire de l'élément hydrogène, qui existe à l'état gazeux aux conditions normales de température et de pression. Les molécules comportent deux atomes d'hydrogène. Il est également appelé « molécule d'hydrogène ».

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10 800 kJ/Nm ³ 119 930 kJ/kg (gaz naturel 50 020 kJ/kg) 3.00 kWh/Nm ³ 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12 770 kJ/Nm ³ 141 860 kJ/kg 3.55 kWh/Nm ³ 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1.34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273K	0.08988 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Densité liquide à 20.3K	70.79 kg/m ³
Chaleur spécifique (C _p)	14 266 J/kg.K (293K)
Chaleur spécifique (C _v)	10 300 J/kg.K
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/(m.K)
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante du gaz	4 124.5 J/kg.K
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20.268K
Température critique	33.30K
Température d'auto inflammation 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 (μJ)	20 (gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³ de gaz)	2.02 (gaz naturel 7.03)
Surpression de détonation (mélange stœchiométrique)	14.7 bars (gaz naturel 16.8 bars)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /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 stœchiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

Tableau 3: Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène. [13]

Chapitre 2 : Introduction générale

Plusieurs données numériques sont rassemblées dans le tableau ci-après.

- Le pouvoir calorifique massique de l'hydrogène est le plus élevé de tous les combustibles existants : cela explique l'intérêt que lui portent les énergéticiens.

- La gamme de concentration mini et maxi pour permettre son inflammation dans l'air est beaucoup plus large que pour le gaz naturel, mais en contrepartie les conditions pour que ces concentrations soient atteintes sont beaucoup plus difficiles à obtenir, du fait de la forte diffusion de l'hydrogène, beaucoup plus léger que l'air contrairement au gaz naturel. De la même façon et pour les mêmes raisons, la gamme de concentration pour la détonation est plus large qu'avec le gaz naturel, mais les conditions de détonation sont plus difficiles à obtenir.

I.3. Les mélanges Hydrogène/ Hydrocarbures pour les MCI :

L'hydrogène peut être utilisé avantageusement comme additif combustible ou comburant d'appoint mélangé aux carburants issus des hydrocarbures. C'est ce qu'on appelle l'enrichissement du carburant par hydrogène. En effet, l'amélioration de la combustion du mélange hydrogène hydrocarbures est due essentiellement à la faible limite d'énergie d'allumage et à la grande vitesse de combustion de l'hydrogène. Cela contribue à la réduction de l'effet des anomalies de la combustion tout en améliorant les performances et l'économie du carburant et en réduisant aussi les émissions polluantes. Pour ce qui de la puissance du moteur, l'hydrogène augmente la densité énergétique du mélange aux limites pauvres avec l'augmentation du rapport hydrogène-carbone et augmente ainsi le couple à pleine charge. [11]

I.4. le stockage hydrogène dans les MCI :

La faible densité de l'hydrogène gazeux rend le stockage simultané de ce dernier avec un combustible liquide dans un même réservoir impossible. En effet l'hydrogène se concentre au-dessus du carburant liquide ce qui écarte toute possibilité de formation du mélange. En outre, les combustibles liquides sont stockés à des pressions relativement faibles laissant peu de place à l'ajout d'hydrogène. D'autre part, le point d'ébullition de l'hydrogène liquide provoquerait le gel des autres carburants, ce qui exclut toute possibilité de stockage dans un même réservoir. Néanmoins, l'hydrogène peut être utilisé en conjonction avec les combustibles liquides denses comme l'essence, l'alcool ou le diesel à condition que chacun soit stocké séparément et mélangé à l'état gazeux immédiatement avant l'allumage. Dans ces cas, les réservoirs doivent être dimensionnés pour s'insérer dans les espaces non utilisés sur le véhicule. Toutefois, il est aussi difficile d'utiliser l'hydrogène en conjonction avec d'autres combustibles qui ont également besoin

de systèmes de stockage volumineux, tels que le propane. [16]

II/ Le moteur à hydrogène:

II.1. Evolution de la technologie des moteurs à combustion interne à Hydrogène :

Dans la première génération de MCI à allumage commandé à hydrogène, un carburateur à gaz du type venturi a été utilisé. Avec ce type de moteur, un grand volume de mélange combustible-air est introduit dans le collecteur d'admission. Pour éviter les retours de flamme, le moteur devait fonctionner en mélange pauvre, ce qui se traduisait par une faible puissance.

Pour la deuxième génération, les technologies des moteurs à essence à allumage commandé ont été adaptées aux moteurs à hydrogène: port d'injection séquentielle multipoint et contrôle électronique du moteur. Une stratégie d'injection tardive d'hydrogène est utilisée, de sorte que l'air admis refroidit le collecteur d'admission ainsi que la chambre de combustion avant l'injection d'hydrogène. Cependant même avec une injection tardive le mélange stœchiométrique n'est pas toujours possible et la puissance est inférieure à celle d'un moteur à essence correspondant.

Pour la troisième génération, à des charges élevées, le mélange est maintenu stœchiométrique. Une recirculation des gaz d'échappement est utilisée pour éviter les retours de flamme. A ce mélange stœchiométrique un catalyseur peut être employé pour diminuer les émissions de NOx. Avec un turbo ou un compresseur et échangeur air/air (intercooler) une puissance similaire ou supérieure à celle d'un moteur à essence est obtenue.

Enfin, pour la quatrième génération, la recherche se focalise sur l'injection directe de l'hydrogène dans les moteurs à allumage commandé. La puissance d'un véhicule alimenté en hydrogène par injection directe est supérieure de: • 20% par rapport à celui alimenté par de l'essence utilisant la même technologie. [14]

II.2. L'allumage :

II.2.1. Calage d'allumage – ignition timing :

Le moment de l'allumage se réfère à la synchronisation, par rapport à la position du piston de courant et de l'angle vilebrequin, de la libération d'une étincelle dans la chambre de combustion vers la fin de la course de compression .

Chapitre 2 : Introduction générale

La nécessité d'avancer (ou retarder) le moment de l'étincelle est parce que le carburant ne brûle pas complètement l'instant les feux d'allumage, les gaz de combustion prennent une période de temps pour développer et angulaire ou la vitesse de rotation du moteur peut allonger ou raccourcir la laps de temps dans lequel la combustion et l'expansion se produisent. Dans une grande majorité des cas, l'angle sera décrit comme un certain angle avancé avant le point mort haut (PMH).

Vers l'étincelle PMH signifie que l'étincelle est mis sous tension avant le point où la chambre de combustion atteint sa taille minimale, puisque le but de la course de puissance du moteur est à la force de la chambre de combustion à se développer. Sparks survenant après le point mort haut (PMH) sont généralement contre-productif (production étincelle perdue, arrière-feu, cliquetis, etc.) à moins qu'il est nécessaire d'une étincelle supplémentaire ou continue avant la course d'échappement.

II.2.1.1. Le bon allumage timing :

Réglage du bon allumage timing est crucial dans la performance d'un moteur. Étincelles se produisent trop tôt ou trop tard dans le cycle du moteur sont souvent responsables de vibrations excessives et même endommager le moteur. Le calage de l'allumage affecte de nombreuses variables, y compris la longévité du moteur, l'économie de carburant et la puissance du moteur. De nombreuses variables influent également sur ce que le temps « meilleur » est. Les moteurs modernes qui sont contrôlés en temps réel par une unité de commande du moteur utilisent un ordinateur pour contrôler la synchronisation tout au long du moteur RPM et la plage de charge. Anciens moteurs qui utilisent mécaniques allumage distributeurs reposent sur l'inertie (en utilisant des poids et des ressorts de rotation) et dépression du collecteur afin de régler le calage de l'allumage à travers RPM et la plage de charge du moteur.

Les premières voitures nécessaires au conducteur de régler la synchronisation via les commandes en fonction des conditions de conduite, mais cela est maintenant automatisé.

Il y a beaucoup de facteurs qui influent sur le calendrier d'allumage approprié pour un moteur donné. Ceux-ci comprennent la synchronisation de la soupape d'admission (s) ou injecteur de carburant (s), le type de système d'allumage utilisé, le type et l'état des bougies d'allumage, le contenu et les impuretés du carburant, le carburant température et la pression, la vitesse du moteur et la charge, l'air et la température du moteur, la pression de suralimentation ou la prise de pression d'air, les composants utilisés dans le système d'allumage, et les paramètres des composants du système d'allumage. En règle générale, les principales modifications ou mises à niveau moteur, il faudra une modification des paramètres de calage de l'allumage du moteur.

II.2.2. Les système d'allumage :

II.2.2.1.Fonction de l'allumage :

La fonction de l'allumage est de produire un apport de chaleur dont l'énergie soit suffisante pour déclencher l'inflammation du mélange gazeux en fin de compression. Cette inflammation est obtenue par la création d'un arc électrique.

II.2.2.2.Création de l'arc électrique :

La tension minimale nécessaire à l'amorçage de l'arc est d'environ 15 000 V, pour obtenir une telle tension on fait appel à un transformateur de tension : la bobine d'allumage.

II.2.3. Principe de fonctionnement :

Le courant circule dans le bobinage primaire et crée un champ magnétique dans l'enroulement secondaire. Lorsque le rupteur est fermé, C'est la phase induction.

A l'ouverture du rupteur, le courant primaire est brusquement coupé, ceci provoque une variation rapide du champ magnétique et la création d'un courant induit à haute tension dans l'enroulement secondaire. L'enroulement secondaire est lié à la bougie qui déclenche l'étincelle désirée.

Le condensateur placé en dérivation du rupteur absorbe le courant de self induit dans le primaire lors de la coupure et évite la détérioration des contacts du rupteur.

II.2.4. Différents types d'allumage :

On rencontre trois systèmes d'allumage :

- L'allumage autonome par volant magnétique.
- L'allumage par batterie.
- Allumage commandés par ordinateur.

Pour chacun de ces systèmes deux solutions technologiques sont utilisées pour l'ouverture du circuit primaire :

- Ouverture par rupteur mécanique : allumage classique.
- Ouverture par interrupteur électronique : allumage électronique.

II.2.4 .A-L 'allumage classique par batterie :

Les voitures d'un peu moins de 12 ans sont fabriquées avec ce système d'allumage.

Chapitre 2 : Introduction générale

L'allumage par batterie est encore utilisé à l'heure actuelle, mais il est de plus en plus remplacé par l'allumage électronique plus performant et plus fiable.

II.2.4. A.1. Principe de fonctionnement :

L'allumage commandé classique par rupteur, bobine haute tension et batterie se présente sous la forme de la figure ci-dessous. Un enroulement primaire est couplé électro magnétiquement, pour constituer un transformateur de tension appelé bobine, à un enroulement secondaire placé dans un circuit haute tension comportant un entrefer d'éclatement porté généralement par une bougie.

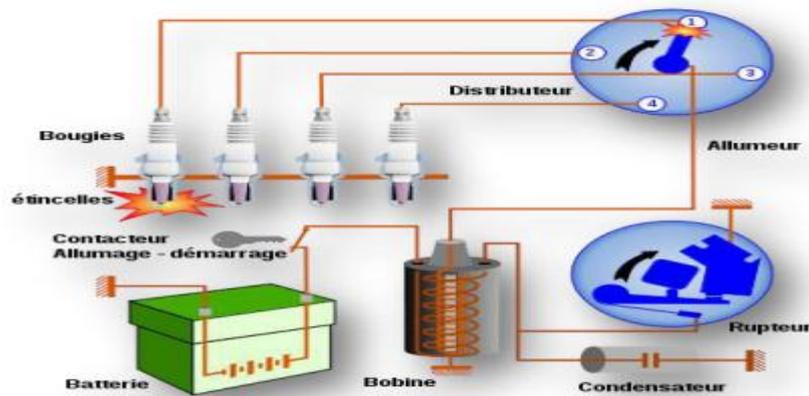


Figure 14 : L'allumage par batterie

II.2.4.A.2. Les organes de l'allumage :

La source d'électricité étant la batterie accumulateur, le dispositif d'allumage classique mécanique est constituée de trois organes distincts : L'allumeur :→ Il se compose de quatre parties essentielles : l'entraînement, le circuit basse tension, les systèmes d'avance centrifuge et à dépression, le circuit haute tension. Mécaniquement à partir de l'arbre à cames du moteur. Le mouvement de rotation de l'arbre de l'allumeur est réalisé.

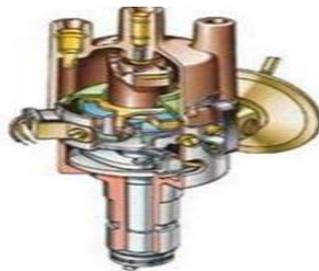


Figure 15 : Allumeur classique

Chapitre 2 : Introduction générale

La bobine :

→ La bobine possède à transformateur-élevateur de tension comprenant un noyau magnétique en tôles feuilletées autour duquel on trouve l'enroulement secondaire et l'enroulement primaire. La bobine la plus répandue a la forme d'une boîte cylindrique en tôle emboutie.



Figure 16 : la Bobine La bougie d'allumage.

→ La bougie est produit l'étincelle dans la chambre de combustion. La haute tension est amenée par l'électrode centrale, l'arc se produit au passage du courant entre les deux électrodes (écartement des électrodes : 0.5 à 1 mm). La bougie doit être parfaitement isolante et doit évacuer rapidement la chaleur afin d'éviter les phénomènes d'auto-allumage.

Le degré thermique de la bougie caractérise sa capacité de transférer la chaleur du bec de l'isolateur au système de refroidissement du moteur. La bougie « chaude » transmet la chaleur moins rapidement. Son long bec d'isolateur oblige les calories de la pointe à parcourir un long chemin avant d'atteindre la partie de l'isolateur en contact avec le culot, puis la culasse. La bougie « froide » transmet la chaleur plus rapidement grâce à son bec court.



Figure 17 : Bougie d'allumage.

L'allumage classique présente quelques inconvénients essentiellement liés à la rupture mécanique du circuit primaire :

- Intensité primaire limitée pour éviter la détérioration des contacts.
- Problème de rebondissement du linguet mobile à haute vitesse.
- Déréglage du point d'avance lors de l'usure des contacts.

Chapitre 2 : Introduction générale

La solution à ces inconvénients est de remplacer le rupteur mécanique par un rupteur électronique commandé par un très faible courant permettant un courant primaire plus important.

II.2.4.B-Allumage électronique :

II.2.4.B.1. Evolution de système d'allumage électronique :

Depuis 1950, il existe différentes générations précédentes au système d'allumage électronique tel que conçu aujourd'hui.

Première génération du système d'allumage électronique

La toute première invention fut l'introduction d'un transistor de puissance que l'on retrouvait entre le rupteur et la bobine dans l'objectif de diminuer les étincelles sur le rupteur. Comme on a lu précédemment, le rupteur s'usait rapidement avec le système classique d'allumage. Ainsi, on tentait de cette façon, de le conserver en meilleur état. Effectivement, on a constaté que le rupteur était moins agressé.

On vit ensuite poindre le système d'allumage à décharge de condensateur. Le stockage de l'énergie se fait préalablement dans un condensateur avant que la tension soit envoyée dans la bobine. Tout le système s'est alors vu amélioré au niveau de la performance, par l'augmentation du courant sur les bougies, la durée de l'étincelle ainsi que la combustion.

Deuxième génération du système d'allumage électronique

Malheureusement, les efforts lors de la deuxième génération du système électronique n'ont pas été un succès. Il s'agissait d'utiliser un capteur électronique pour remplacer des vis platinées (rupteur).

Troisième génération du système d'allumage électronique

C'est ici que l'on vit apparaître le système électronique complet bien que son invention datait de 1970. Il fut appliqué à l'ensemble des moteurs (voitures, motos, bateaux) dans le courant des années 80.

II.2.4.B.2. Principe de l'allumage électronique :

Le système comprend :

- Une bobine d'allumage dont les caractéristiques sont :
 - Intensité primaire augmentée.
 - Rapport du nombre de spires augmenté d'où l'obtention d'une tension secondaire d'environ 50 000 V (meilleur étincelle).
- Un distributeur identique à celui d'un allumage classique.
- Un boîtier électronique qui amplifie le courant, en fonction des paramètres de vitesse et de charge, le point d'allumage.
- Un capteur de position et de vitesse qui provoque la commande du boîtier électronique et lui fournit le paramètre vitesse de rotation.
- Un capteur de dépression qui fournit le paramètre charge du moteur au boîtier électronique. Un tel système ne présente plus de pièces mécaniques en contact et ne nécessite aucun réglage.

II.2.4.C.1 Allumage commandés par ordinateur :

Les nouveaux moteurs utilisent généralement des systèmes informatisés d'allumage . L'ordinateur a une carte de synchronisation (table de recherche) avec des valeurs d'avance d'allumage pour toutes les combinaisons de vitesse du moteur et la charge du moteur. L'ordinateur envoie un signal à la bobine d'allumage à l'heure indiquée sur la carte de synchronisation afin de tirer la bougie d'allumage. La plupart des ordinateurs de fabricants d'équipement d'origine ne peuvent pas être modifiés afin de changer la courbe d'avance temporelle est impossible. Les changements globaux de synchronisation sont encore possibles, en fonction de la conception du moteur. Après - vente des unités de contrôle du moteur permettent au tuner d'apporter des modifications à la carte de synchronisation. Cela permet au moment d'être avancée ou retardée en fonction de diverses applications du moteur.

II.3. Dans le moteur à hydrogène :

II.3.1.Énergie d'allumage :

L'hydrogène est facilement inflammable. L'énergie minimale que l'on doit fournir pour allumer un mélange est de 0.019 MJ pour une concentration stochiométrique du mélange d'air et d'hydrogène.

Chapitre 2 : Introduction générale

La concentration stochiométrique d'un tel mélange est d'environ 28 vol.% H₂ dans l'air. L'énergie d'allumage varie en fonction de la concentration d'hydrogène [17]

II.3.2. Délais d'auto-inflammation :

Le délai d'auto-inflammation correspond au temps séparant la levée de l'aiguille de l'injecteur (c'est-à-dire de l'injection des premières gouttelettes de gazole) et le début de la combustion, il s'exprime en millisecondes ou en degrés de rotation vilebrequin. Le délai d'auto-inflammation est le temps nécessaire pour un mélange hydrocarbure/oxygène porté à certaines température et pression, de s'enflammer d'une manière indépendante sans apport extérieur d'une étincelle. Le délai d'auto-inflammation d'un carburant est influencé à la fois par les conditions de fonctionnement et d'injection et par les caractéristiques du carburant. Les dispositifs expérimentaux utilisés pour étudier les effets de ces différents paramètres sont variés. Des travaux ont en effet été réalisés sur des tubes à choc ou dans des machines à compression rapide. [18]

II.3.3. Les avantages de moteur à hydrogène : [20]

- La faible énergie d'allumage de l'hydrogène contribue à l'apparition des gaz chauds et des points chauds dans le cylindre, qui peuvent servir de sources d'allumages prématurés au cours de la course d'admission
- le moteur à hydrogène est plus efficace et à haut régime, c'est le moteur thermique qui prend le dessus.
- L'hydrogène qui est incolore, inodore, insipide et non corrosif à l'avantage d'être particulièrement énergétique: 1kg d'hydrogène libère environ trois fois plus d'énergie qu'un Kg d'essence
- Lorsqu'il est brûlé, son principal produit de combustion est l'eau

II.3.4. Les inconvénients de moteur à hydrogène :

- L'hydrogène peut s'enflammer ou exploser au contact de l'air.
- il n'en existe pratiquement pas à l'état pur, c'est-à-dire sous forme de dihydrogène. Ce dernier n'est pas disponible sous forme brute.
- Du fait de sa légèreté, l'hydrogène, à poids égal, occupe un volume beaucoup plus important qu'un autre gaz.

CHAPITRE 3.
Le code de calcul
CFD CONVERGE.

1. Introduction :

La résolution des équations présentées, nécessite l'utilisation de l'outil informatique « les codes de simulation ». En 2008 un groupe d'ingénieurs se sépara du laboratoire de Los Alamos (USA) pour fonder un autre laboratoire appelé CONVERGENT Science basé à Middleton, Wisconsin ou un code de simulation 3D nommé «CONVERGE» à vue le jour.

Le code CONVERGE est un outil de simulation numérique des écoulements réactifs, instationnaire en 3D orienté vers la modélisation des moteurs à combustion interne.

2. Description générale du code de simulation CONVERGE :

Pour réaliser des calculs de combustion d'un jet est confronter les résultats à des données expérimentales, nous avons utilisé le code de calcul « CONVERGE ».

En effet, ce code est bien connu par le monde industriel et universitaire. Il est structuré en modules permettant une prise en main rapide. Bien qu'il soit spécifiquement conçu pour exécuter des calculs sur des moteurs à combustion interne, la modularité du code permet des modifications faciles pour résoudre une variété de problèmes aérodynamiques impliquant des réactions chimiques. Les équations de conservation de masse, d'espèces chimiques, de quantité de mouvement, d'énergie interne spécifique, d'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation sont résolues par l'approche des volumes finis. Pour plus d'informations sur le code CONVERGE, le lecteur peut consulter les références originales de *Richards, K. J. et al. [21]*.

2. Structure standard de CONVERGE :

CONVERGE simule des écoulements très variés avec des configurations plus ou moins complexes. Il est composé comme tout code de type CFD de trois modules qui sont :

- le pré-processeur « **pre-processing** ».
- le solveur "CONVERGE".
- le post-processeur "post-processing".

- ***Pré-processeur (Génération de maillage)***

CONVERGE est un logiciel de construction de modèles physiques et de maillages. Il permet de créer la géométrie ou de l'importer à partir d'un autre logiciel de CAO (Solid Works, Solid Concept, etc.) sous format de fichier "STL". Il dispose d'une boîte à outils complète pour réaliser ou importer

Chapitre 3: Le code de calcul CFD

une géométrie, effectuer des modifications géométriques, générer des maillages plus ou moins complexes conformément à la géométrie, de contrôler leur qualité ainsi que définir les conditions aux limites du domaine de calcul. Ensuite, CONVERGE importe un fichier sous format '.dat' noté (surface.dat) ce dernier s'exporte vers le code de calcul afin d'effectuer les simulations numériques

- **Solveur (CONVERGE)**

Programme principal de calcul, ce module résout l'ensemble des équations discrétisées.

- **Post-processing**

Ce module produit les fichiers des résultats. Le Post-processeur permet de visualiser les différents résultats des champs dynamiques (champs de vitesse, lignes de courant, champs de turbulence, contours de la surface, etc.) et scalaires (contours de température, contours des concentrations d'espèces chimiques, etc.). De même, ce module permet d'exporter les résultats sous des différentes formes (GMV, Tecplot, ...), pour représenter des graphes par d'autres logiciels.

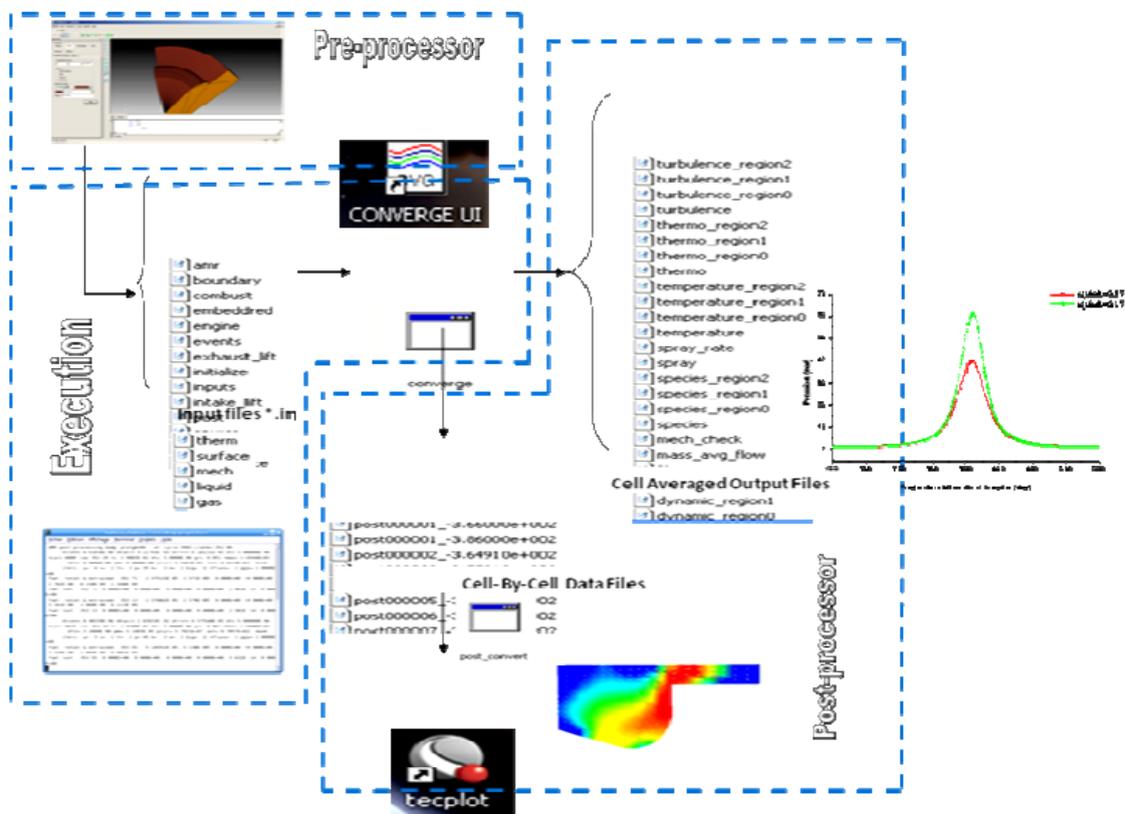


Figure 18 : La structure standard de Converse.

3. Les fichiers de sortie et d'entrée dans converge : [22,23]

Les fichiers d'entrée (*.in) contiennent des données géométriques, de conditions limites, et tandis que les entrées numériques des fichiers de données (*.dat) contiennent des propriétés thermodynamiques et des données de réaction chimique. Au début de la simulation, le (*.in) et (*.dat) sont lus par converge. Pendant la simulation, output, post, et les fichiers de restart sont présents.

a. Descriptions des fichiers d'entrée :

Converge est conçu pour être exécuté à partir de la ligne de commande. Toutes les entrées sont alimentées à l'aide du code par une série de fichiers d'entrée qui sont toutes au format texte ASCII lisible par l'utilisateur. Les fichiers d'entrée peuvent être créés ou modifiés par ne importe quel éditeur de texte simple.

Il existe deux types différents de fichiers d'entrée nécessaires qui se différencient par leur suffixe: *.in et *.dat.

Tous les fichiers d'entrée doivent résider dans le répertoire à partir duquel Converge est exécuté. Si tous les fichiers nécessaires ne sont pas trouvés, le code sera annulé. Un résumé des fichiers d'entrée peut être trouvé dans le tableau (6) ci-dessous. Notez que seule l'entrée des fichiers inputs.in, boundary.in, surface.dat, initialize.in, mech.dat et therm.dat sont nécessaires pour une simulation, les fichiers d'entrée restants ne sont requis que quand un modèle ou caractéristique particulière est activé.

Nom de fichier	Descriptions
inputs.in	Commande numérique et simulation, par exemple, les critères de convergence, et les facteurs détente, contrôler le pas de temps, après avoir tapé la fréquence, etc. Ce fichier contient les médias pour allumer et éteindre sous-modèles comme spray, la combustion, la turbulence.
boundary.in	Conditions aux limites, conformément aux limites identifiants utilisés dans surface.dat
initialize.in	Spécification des conditions initiales.

Chapitre 3: Le code de calcul CFD

embedded.in	Informations sur où, quand, et comment l'intégration est à ajouter à la grille.
combust.in	Modèle de combustion et des émissions.
turbulence.in	Sélection de quel modèle de turbulence à exécuter ainsi que les paramètres du modèle et les modèles muraux.
spray.in	Configuration et entrées pour les modèles de phase discrets.
events.in	Informations sur la connexion et la déconnexion régions.
engine.in	Entrées spécifiques à une simulation de moteur
source.in	Entrées pour les sources. (pour déterminer le temps d'allumage).
amr.in	Entrées de contrôle de raffinement adaptatif de maillage.
post.in	Le fichier post.in contient les noms des variables qui seront écrites sur les fichiers de poste. Les fichiers de poste peuvent ensuite être convertis en GMV, ou le format de la colonne du texte.
surface.dat	Spécification de surface triangulée et l'affectation limite.
therm.dat	NASA données formatées pour le calcul des propriétés thermodynamiques de l'espèce dans la simulation.
mech.dat	Eléments, espèces, et de réactions données pour la simulation.
gas.dat	Propriétés pour le gaz qui ne peut être calculé qu'à partir des données dans therm.dat

Tableau 4 : Les fichiers d'entrées.

b. Description des fichiers de sortie :

i. Fichiers Echo (*.echo) :

Les fichiers (*.echo) sont placés dans le répertoire à partir duquel converge est exécuté. Autorisation d'écriture pour le répertoire doivent être fixé de telle sorte que ces fichiers peuvent être

Chapitre 3: Le code de calcul CFD

créés. Lorsque converge est ré exécuté dans le même répertoire, les fichiers (*.echo) seront écrasés sans demander à l'utilisateur.

ii. Fichiers out (*.out) :

Les fichiers (*.out) sont placés dans le même répertoire que l'entrée et les fichiers d'écho à partir de l'exécution de converge. Il est important de noter que lorsque converge est ré exécuté, les fichiers (*.out) seront écrasés les fichiers existants (*.out) dans le même répertoire sans demander à l'utilisateur. Un résumé des différents types des fichiers de sortie est indiqué au tableau (7) ci-dessous.

Nom de fichier	Descriptions
thermo.out	Données thermodynamiques et de dégagement de chaleur.
emissions.out	Information sur les émissions pour la simulation.
spray.out	L'évolution du jet.
species.out	Somme de la masse des espèces dans le domaine.
temperature.out	Informations sur fraction de la masse des températures supérieures fixes.
turbulence.out	La moyenne et l'écart type de la quantité de turbulence dans le domaine.
mass_avg_flow.out	Débit massique et débit massique pondérés données thermiques moyennes dans les limites des entrées et de sorties.
area_avg_flow.out	Débit massique et surface pondérés données thermiques moyennes dans les limites des entrées et de sortie.

Tableau 5 : Les fichiers de sortie.

5. Conclusion :

Ce chapitre a décrit succinctement le code CFD Converge. Une présentation utile des trois étapes de calcul a été élaborée. Les détails concernant les données d'entrée, de sortie et celles nécessaires au bon déroulement des calculs ont été présentés. L'étude de ce chapitre a été nécessaire à la préparation concrète des procédés de la simulation d'un cycle de moteur à instant d'allumage fonctionnant à l'hydrogène.

CHAPITRE 4.

Modélisation Numérique et Formulation Mathématique

1. Objectif :

L'objectif des calculs suivants est de déterminer les performances, les caractéristiques de combustion et les émissions par simulation numérique à l'aide du code CFD CONVERGE 2.4. Après la sélection d'un MCI existant fonctionnant à l'hydrogène, les démarches de préparation (pré-processing) sont détaillées dans ce chapitre, calculs et résultats (processing, post-processing) dans le chapitre suivant.

2. Présentation du Moteur Yanmar NFD-170 :

On a choisi le moteur Yanmar NFD-170 qui est un moteur expérimental ce qui nous permet de valider les résultats de notre étude numérique.

Le moteur est à l'origine un MCI à allumage par compression mono cylindre convertit en un MCI à allumage commandé en ajoutant une bougie NGK C7HA pour le besoin de l'utilisation de l'hydrogène comme carburant. Le Yanmar NFD-170 un moteur monocylindre à quatre temps à aspiration naturelle SI d'un diamètre d'alésage de 102 mm et d'une course de 105 mm la figure (19). le piston à tête plate a été utilisé pour former l'espace de combustion en forme de disque, et le taux de compression a été fixé à 11,5 :1 Les caractéristiques géométriques sont présentées dans le tableau (6). [24]

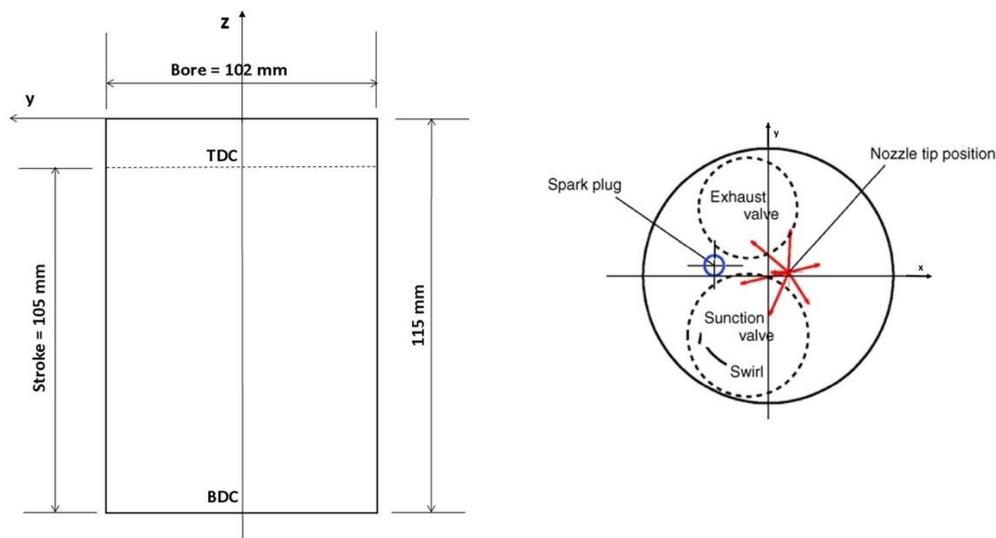


Figure 19 : Projection géométrique du moteur Yanmar NFD-170

Alésage [mm]	102
Course [mm]	105
Cylindrée [cc]	858
Longueur de bielle [mm]	165
Taux de compression	11,5 :1
Swirl	2,6
IVO [CAD]	0
IVC [CAD]	220
EVO [CAD]	490
EVC [CAD]	20

Tableau 6: Caractéristiques géométriques du moteur Yanmar NFD-170

L'introduction des carburants testés dans la chambre de combustion est réalisée par l'intermédiaire d'un système d'injection (pompe d'injection et injecteur) la figure 16. Le débit d'hydrogène a été préalablement mesuré par un régulateur de débit massique (Oval, F-123S). L'injecteur de gaz comporte sept buses à trous d'un diamètre de 0,52 mm. Le tableau (7) regroupe les principales spécifications de système d'injection du carburant. [24]

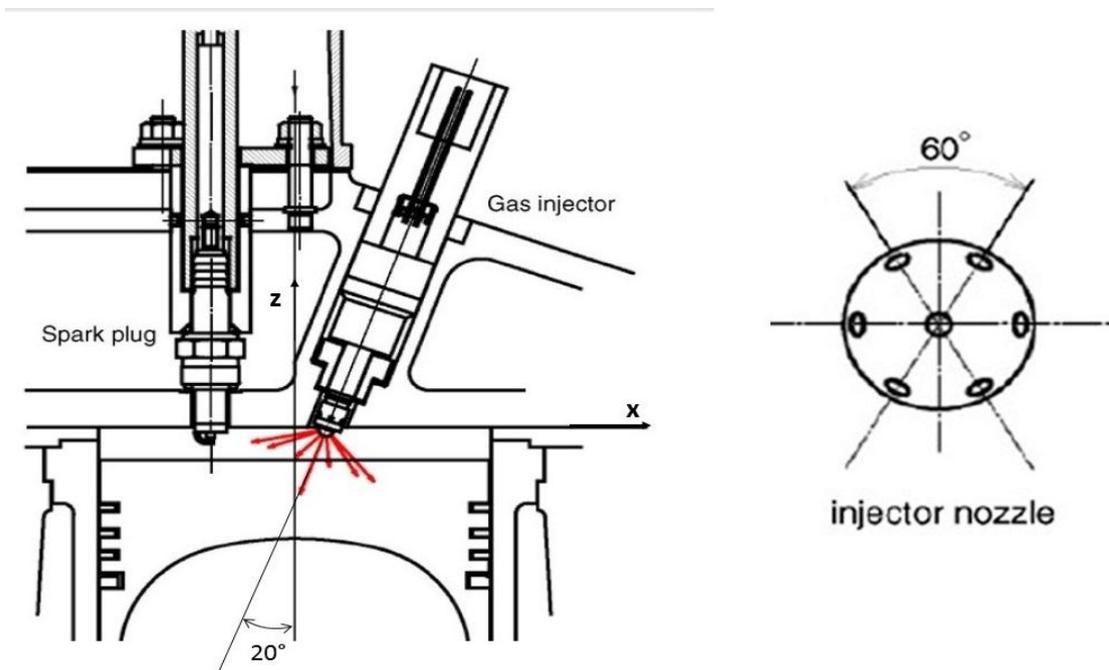


Figure 20 : L'injecteur du moteur Yanmar NFD-170

Carburant	hydrogène
Température de carburant[k]	300
Pression de l'injection [Mpa]	8
Angle entre les jets	20
Durée de l'injection	69
Diamètre du trou d'injection [mm]	0,52

Figure 7 : Caractéristiques du système d'injection du moteur Yanmar NFD-170

3. Modélisation géométrique et domaine de calcul :

Le moteur est réalisé sous SOLIDWORKS en format stéréo lithographie(STL), les composants du moteur sont dimensionnés par projection. La génération du maillage est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée, en terme de précision et de temps de calcul. Le maillage est choisi par la sélection des dimensions de $dx_i = 4$ mm de la cellule cubique initiale « base grid ». Dans la simulation il y a deux étapes qui nécessitent un raffinement bien étudié; l'injection et la combustion et pour cela l'option « Fixed Embedding » est introduite pour les deux étapes et l'option « AMR » pour l'étape de combustion seulement.

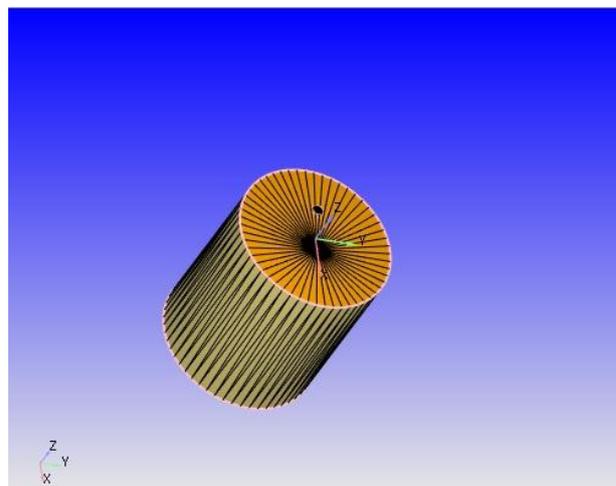


Figure 21 : Modèle géométrique du moteur sous CONVERGE

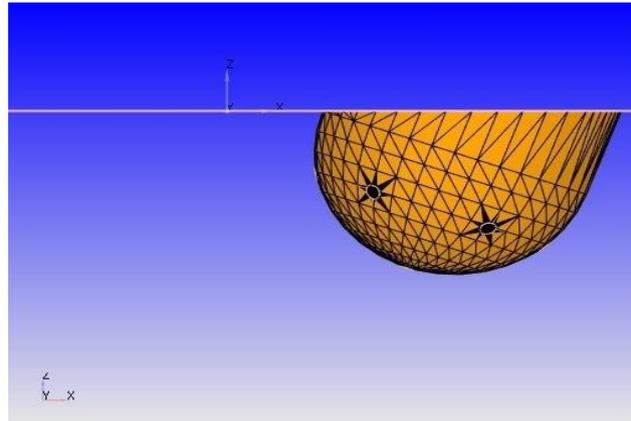


Figure 22 : Modèle géométrique de l'injecteur sous CONVERGE

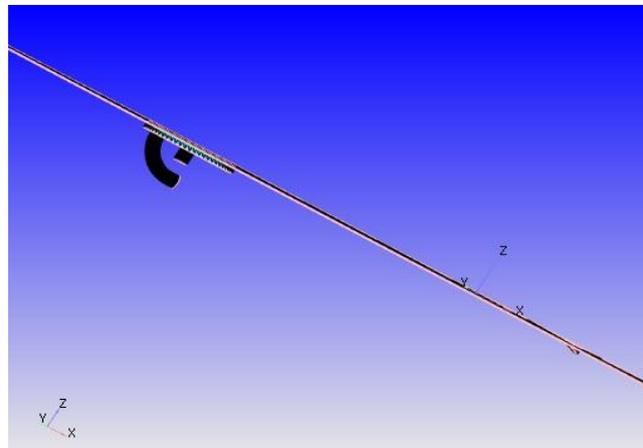


Figure 23 : Modèle géométrique de la bougie sous CONVERGE

4. Préparation des calculs par CONVERGE :

4.1. Sélection une expérience à simuler :

Mohammadi et al [24]. Réalisèrent plusieurs expériences sous des conditions différentes. On a choisi une expérience concernant l'injection directe de l'hydrogène au début de la phase de compression. La fermeture et l'ouverture des soupapes d'admission et d'échappement sont

$$\theta = \text{IVC} = 220^\circ \text{ à } \theta = \text{EVO} = 490^\circ.$$

Vitesse de rotation [tr/min]	1200
Masse de l'hydrogène injectée [milligramme]	13,5
Richesse	0,5
Durée de l'injection	69°
Angle début injection de H2 (SOI)	230°
Angle de l'action d'allumage (Ignition)	349°

Tableau 8 : Caractéristiques de l'expériences sélectionnée

La simulation numérique par le code CONVERGE nécessite que toutes les variables soient initialisées avant le démarrage du calcul.

Les conditions d'affichage dans le fichier (input.in).

Spécifications de moteur diamètre, course, vitesse, (engine.in).

Les conditions aux limites température (boundary.in).

Les conditions initiales pression, température, fraction massiques de gaz (initailize.in).

4.2. Les conditions aux limites :

Le système de refroidissement du moteur est réglé de façon que la température de l'eau ne dépasse pas 80°C. [24]

On admet que la température des frontières « piston », « liner » et « head » soit maintenue autour de 353°K. Pour « sp » et « sp electrode » qui sont des frontières spéciales, la température est maintenue à 550°K et 600°K respectivement selon un exemple de simulation d'un MCI à essence sous CONVERGE. [25]

4.3. Les conditions initiales :

Pression [KPa]	127
Température [°K]	409
Gaz : Air	Fraction massique O ₂ : 0,23
	Fraction massique N ₂ : 0,77

Tableau 9 : les conditions initiales

5. La modélisation physique :

La modélisation mathématique d'un écoulement turbulent avec ou sans réaction chimique est classiquement menée à l'aide de la résolution des équations aux dérivées partielles non linéaires et couplées. Ces équations expriment les principes de conservation de masse, de quantité de mouvement et des espèces Chimiques dans un volume élémentaire de fluide.

5.1. L'équations de transport des espèces chimiques :

L'équation de la conservation des espèces peut s'écrire comme suit

$$\partial \rho_m / \partial t + \partial \rho_m u_j / \partial x_j = \partial / \partial x_j (\rho D Y_m / \partial x_j) + S_m \quad (4.1)$$

Avec

$$Y_m = M_m / M_{tot} = \rho_m / \rho_{tot} \quad (4.2)$$

$$\rho_m = Y_m \rho \quad (4.3)$$

$$D = \nu / S_c \quad (4.4)$$

5.2. Equation de conservation de la masse :

Pour toutes les espèces on obtient l'équation de masse totale

$$\partial \rho / \partial t + \partial \rho u_i / \partial x_i = \dot{\rho}^s \quad (4.5)$$

Où ρ est la masse volumique moyenne en phase gazeuse, u_i est la vitesse moyenne des gaz et S est le terme source. [26]

5.3. Equation de quantité de mouvement :

L'équation de quantité de mouvement est définie comme suit

$$\partial \rho u_i / \partial t + \partial \rho u_i u_j / \partial x_j = -\partial \rho / \partial x_i + \partial \sigma_{ij} / \partial x_i + S_i \quad (4.6)$$

5.4. L'équation d'état du gaz :

Afin d'introduire une équation d'état $f(P,T,V) = 0$ pour les gaz dans le cylindre, l'équation est définie comme suit

$$P = R.T/V - b - (a/V. (V - b)) \quad (4.7)$$

Avec

R constant des gaz parfaits

$$R = 8,314\text{J/mole K} \quad (4.8)$$

$$b = \beta B_{rk} \cdot V_c \quad (4.9)$$

$$a = \alpha_{rk} \cdot a = \alpha_{rk} \cdot \sqrt{T_c} \cdot P_c \cdot V_c^2 / \sqrt{T} \quad (4.10)$$

$$\alpha_{rk} = 0 \quad (4.11)$$

$$\beta_{rk} = 0.008664 \quad (4.12)$$

P_c, V_c et T_c les valeurs critiques

$$P_c, V_c = R \cdot T_c \quad (4.13)$$

Pour l'air

$$P_c = 3,77\text{MPa} \quad (4.14)$$

$$T_c = 133\text{K} \quad (4.15)$$

5.5. Modélisation de la turbulence :

La turbulence est un écoulement caractérisé par la diffusion, le chaos, la rotation la dissipation a un nombre de Reynolds élevé. La première des approches de modélisation de la turbulence est la méthode RANS (Reynolds Averaged Navier -Stokes équations) ou la moyenne de Reynolds des équations de Navier Stokes, où les différentes variables d'état instantanées peuvent être décomposées en une composante moyenne et une composante fluctuante. Il existe plusieurs modèles RANS ($k - \varepsilon$, RNG{ $k - \varepsilon$ }, Realizable $k - \varepsilon$, Standard $k - \omega$ 1998...) On sélectionnions le modèle de turbulence RNG{ $k - \varepsilon$ } Un nouveau modèle, fondé sur les méthodes utilisant le groupe de renormalisation est apparu ces dernières années. Appelé modèle RNG{ $k - \varepsilon$ }(Yakhot et Orszag 1986), il utilise une théorie différente des techniques statistiques classiques. La taille des échelles turbulentes est prise en compte pour déterminer la part de l'énergie qui sera transportée et celle qui sera dissipée. Les petites

échelles de turbulence qui dissipent toute leur énergie sont modélisées alors que les grandes échelles de turbulence sont étudiées précisément. Cette modélisation aboutit à des équations très proches de celles du modèle k - standard. La principale différence vient des constantes qui ne sont plus déterminées expérimentalement mais calculées théoriquement.

constant	C_{s1}	C_{s2}	C_{s3}	C_s	P_{rk}	P_{rc}	η_0	β	C_u
Standard $k - \varepsilon$	1.44	1.92	-1.0	1.5	1.0	1.3	-	-	0.09
RGN $k - \varepsilon$	1.42	1.68	-	1.5	0.719	0.719	4.38	0.012	0.0845

Tableau 10 : Valeurs des constantes dans les modèles de turbulence ($k - \varepsilon$ et RGN $k - \varepsilon$)

Le modèle RGN $k - \varepsilon$ qui décrit la turbulence. C'est un modèle très répandu dans les simulations des MCI et nécessite les valeurs initiales de l'énergie cinétique turbulente K (TKE) et la dissipation turbulente. [27][28][29][30]

Pour la valeur de l'énergie cinétique turbulente K , le manuel de CONVERGE STUDIO v2.4 [28] propose $K = 3/2 u_i^2 I^2$ avec u_i les composants de vecteur vitesse et I une intensité variant entre 0,01 et 0,1.

Pour la valeur de la dissipation turbulente ε , le manuel de CONVERGE STUDIO v2.4 [31] propose

$\varepsilon = C_\eta \frac{K^{3/2}}{l}$ avec $C_\eta = 0.0845$ une constante du modèle de turbulence ($k - \varepsilon$), K : l'énergie cinétique turbulente (TKE) et l : l'échelle caractéristique de la turbulence.

Et on trouve finalement les valeurs suivantes.

TKE[m2/s2]	1.65375
EPS[m2/s3]	66.6618425

Tableau 11 : Valeurs l'énergie cinétique la dissipation turbulente

5.6. Modélisation de l'allumage :

Une étincelle ne peut passer d'une électrode de bougie à l'autre que si une tension suffisamment élevée est appliquée. Dans une décharge d'étincelle typique, le potentiel électrique aux bornes de l'écartement des électrodes est augmenté jusqu'à ce que le mélange intermédiaire se décompose. Ce qui favorise l'ionisation des atomes du gaz entre les électrodes de la bougie formant une étincelle.

Cette phase est appelée « breakdown » est suivie par la phase « arc » elle est caractérisée par le développement de la zone en plasma causé par les transferts thermiques et la diffusion, cela favorise l'inflammation du gaz et la propagation de la flamme. Enfin la phase « glow » C'est la phase finale de l'allumage, son détail est lié au système d'allumage. L'allumage est modélisé comme des sources d'énergies d'après Converge, deux sources d'énergie doivent être sélectionnées; une pour la phase « breakdown » et l'autre pour les deux phases « arc » et « glow » ensemble. La durée de la source d'énergie « breakdown » est très petite devant la durée de la source d'énergie « arc/glow » (0,2° devant 4° pour une vitesse de rotation 3000 tr/min) selon l'exemple du manuel théorique CONVERGE v2.4 Les deux sources d'énergie ont chacune une valeur de 0,025 Joule. Elles sont modélisées géométriquement comme une forme de type « line » composée de 10 points entre les électrodes de la bougie dans l'onglet « shape ». [25]

	SOI=230°	
	Breakdown	arc/glow
θ_j	349°	349°
$(\theta_j)_{end}$	349.2°	353°

Tableau 12 : Angles début-fin des phases de l'allumage

5.7. Modélisation de la combustion :

Le modèle de combustion SAGE, qui est proposé avec le CONVERGE a été choisi comme modèle de combustion pour notre étude. L'avantage du modèle SAGE est qu'il comprend une chimie détaillée pour les applications de combustion. Grâce à la cinétique chimique détaillée, le modèle SAGE peut simuler la combustion avec un ensemble de CHEMKIN au format des fichiers d'entrée; CHEMKIN est

le format standard pour définir les mécanismes chimiques. Dans le modèle de combustion SAGE, le mécanisme de réaction chimique est basé sur un ensemble des réactions qui décrivent en détail la réaction chimique globale. La combustion de l'hydrogène est une réaction très particulière, qui n'implique que de l'hydrogène gazeux et de l'oxygène. Le remplacement de l'azote dans l'air avec l'argon conduit à une nouvelle voie de réaction pour la réaction chimique du mélange gazeux.

Mais le nombre d'espèces et de réactions chimiques impliqués dans cette réaction est très faible, c'est-à-dire 10 espèces et 23 réactions. La combustion de différents combustibles peut être modélisée en changeant le mécanisme pour chaque carburant. Le SAGE à détail est capable de calculer la vitesse de réaction de chaque réaction élémentaire, et le logiciel CFD résout les équations de transport. SAGE, AMR et un mécanisme précis peuvent être utilisés pour modéliser de nombreux régimes de combustion. Dans SAGE, le coefficient de taux d'intérêt à terme est exprimé par le coefficient d'Arrhenius

$$k_{fr} = A_r T^{b_r} e^{(-E_r/RT)} \quad (4.16)$$

Où A_r est le facteur pré-exponentiel, b_r est l'exposant de température, E_r est l'énergie d'activation pour chaque réaction chimique participant à la combustion et R est la constante gazeuse universelle.

5.8. Durée de la combustion :

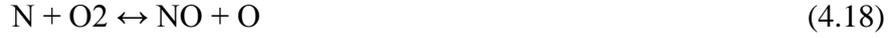
Selon un tutorat de simulation d'un MCI à essence sous CONVERGE utilisant SAGE comme modèle de combustion, l'angle (θ_c) start de début des calculs des paramètres de combustion (modèle SAGE) est avancée de 2° de l'angle θ_j de l'allumage pour une vitesse de rotation 3000 tr/min. Supposons que la durée est invariante donc pour une vitesse de rotation 1200 tr/min, on trouve que l'angle (θ_c) start est avancée de $0,8^\circ$ de l'angle θ_j . Dans les résultats expérimentaux de Mohammadi et al [24]. Les diagrammes du taux de dégagement de la chaleur (HRR) montrent que la valeur du HRR est pratiquement nulle après $\theta=420^\circ$ ce qui est considéré comme l'angle de la fin de calcul des paramètres de combustion (θ_c) end. La durée de la combustion τ_c est la différence entre (θ_c) end et (θ_c) start.

SOI	θ_j	(θ_c) start	(θ_c) end	τ_c
230	349°	348.2°	420°	71.8°

Tableau 13: Les durées de la combustion.

5.9. Modélisation des émissions :

Le modèle Zeldovich amélioré est choisi pour prédire la production de NOx. Cette théorie permet de résoudre les trois réactions suivantes : [32]



Les constantes de vitesse des réactions sont donnés par :

$$k_{R1,f} = 7.6 \times 10^3 \times e^{(-38000/T)} \quad (4.20)$$

$$k_{R1,r} = 1.6 \times 10^3 \quad (4.21)$$

$$k_{R2,r} = 6.4 \times 10^9 \times T \times e^{(-3150/T)} \quad (4.22)$$

$$k_{R2,f} = 1.5 \times 10^9 \times T \times e^{(-19500/T)} \quad (4.23)$$

$$k_{R3,r} = 4.1 \times 10^{13} \quad (4.24)$$

$$k_{R3,f} = 2.0 \times 10^{14} \times e^{(-23650/T)} \quad (4.25)$$

Où l'indice "f" désigne une réaction vers l'avant et l'indice "R" désigne un revers réaction.

En outre, les unités des constantes de vitesse dans l'équation sont cm³/mol.s.

Le taux de formation de NO peut être écrit comme

$$\begin{aligned} d[NO]/dt = & k_{R1,f}[O][N_2] - k_{R1,r}[NO][N] + k_{R2,f}[N][O_2] \\ & - k_{R2,r}[NO][O] + k_{R3,f}[N][OH] - k_{R3,r}[NO][H] \end{aligned} \quad (4.26)$$

Où par exemple, désigne la concentration d'espèces de [NO] en cm³ en moles.

La vitesse de formation de [N] peut être écrite comme

$$\begin{aligned} d[NO]/dt = & k_{R1,f}[O][N_2] - k_{R1,r}[NO][N] + k_{R2,f}[N][O_2] \\ & + k_{R2,r}[NO][O] - k_{R3,f}[N][OH] - k_{R3,r}[NO][H] \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$d[NO]/dt = 2R_1[1 - ([NO]/[NO]_e)^2]/1 + ([NO]/[NO]_e)R' \quad (4.28)$$

D'où

$$R' = R_1/R_2 + R_3 \quad (4.29)$$

ET

$$R_1 = k_{R1,r}[NO]_e[N]_e \quad (4.30)$$

$$R_2 = k_{R2,f}[N]_e[O_2]_e \quad (4.31)$$

$$R_3 = k_{R3,f}[N]_e[OH]_e \quad (4.32)$$

Où l'indice (e) est utilisé pour désigner la concentration de l'espèce d'équilibre. Après la sélection de ce mécanisme dans CONVERGE, il faut ajouter l'espèce « NOX » comme une espèce passive, à noter également qu'il faut ajouter les espèces CO et CO₂ puisque le solveur ne fonctionne pas sans ces derniers lorsque le EZM est sélectionné.

6. Conclusion :

Finalement, le but de ce chapitre est de donner un aperçu sur la génération des géométries 3D, la sélection du moteur, l'élaboration du domaine de calcul, la définition des conditions initiales et aux limites, la description de la modélisation physique avec la description des sous modèles de turbulence, de combustion et d'émissions des NO_x a été présentée. Et de mettre en évidence les paramètres nécessaires pour de bons résultats; par la mise en application du code de calcul converge V 2.4.

CHAPITRE 5.

Résultats et discussions

1. Introduction :

Ce chapitre présente les résultats atteints par nos simulations numériques effectuée à l'aide du code de calcul CONVERGE CFD. Pour valider les résultats numériques on se réfère au calage de la courbe de pression, tout en considérant le moteur à moyenne charge. Ensuite, on exposera les résultats numériques accompagnés des discussions et des interprétations. Les résultats seront comparés avec les données expérimentales.

2. Discussion des résultats de simulation :

2.1. Le calage :

La figure (24) montre l'adaptation du code CONVERGE aux mesures expérimentales de la pression cylindre. Un bon accord est obtenu entre les données expérimentales et la simulation numérique.

La figure (24) montre que la pression moyenne de -11° APMH est supérieur à celle de -8 est c'est à cause de l'augmentation de délais d'allumage.

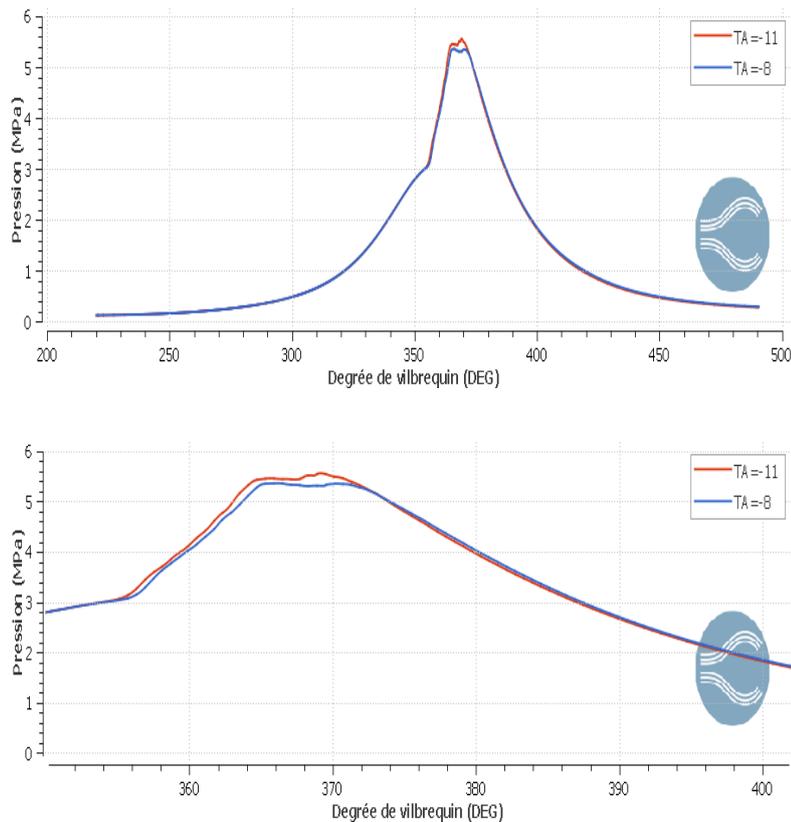


Figure 24 : Evolution de la pression dans le cylindre (expérience et simulation Converge)

2.2. La température, le taux de dégagement de chaleur et Le dégagement de chaleur :

La figure (25) montre l'évolution de la température en fonction de l'angle de vilebrequin. Sur la figure on voit clairement que la température augmente dans la phase de la combustion non-contrôlée du fait de la combustion d'une grande masse de carburant qui est déjà bien placée dans une zone de bonne formation de mélange. Ceci résulte d'un dégagement d'une grande quantité de chaleur. La figure (25) montre que la température moyenne que la combustion de -11 est avancée et elle est supérieure de -8. Ceci est dû à l'avance de l'allumage qui augmente le délai d'allumage est par conséquent augmente le pic de pression et température.

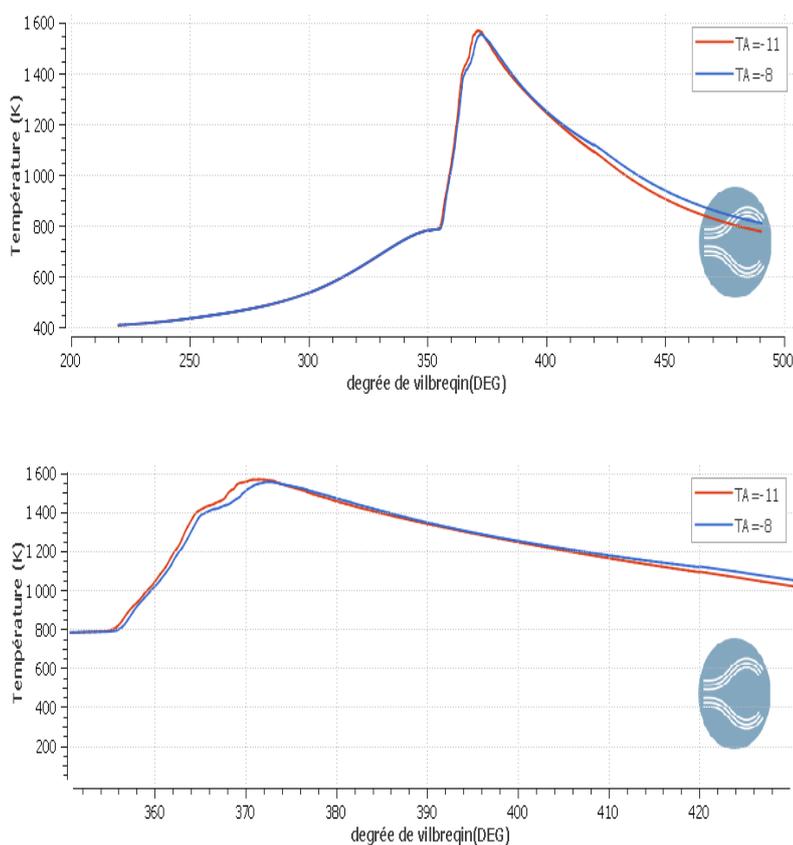


Figure 25 : L'évolution de la température en fonction de l'angle de vilebrequin.

L'évolution du taux de dégagement de chaleur est subdivisée en trois phases: le délai d'allumage, qui est la période entre le début de l'injection de carburant et le début de la combustion. C'est la période de retard physique. Dans la deuxième phase, la combustion du carburant qui est mélangé

Chapitre 5 : Résultats et discussions

avec de l'air dans les limites d'inflammabilité pendant la période de retard d'allumage se produit rapidement dans quelques degrés d'angle de vilebrequin. Lorsque ce mélange brûlant est ajouté au carburant qui devient prêt à brûler et brûle pendant ces phases, le taux de dégagement de chaleur élevé résulte. La dernière partie consiste à mélanger une combustion contrôlée. La vitesse de combustion est contrôlée par le processus de mélange vapeur-air carburant. Dans cette phase, le taux de dégagement de chaleur n'atteint pas un autre pic, il diminue lorsque cette phase avance. Le taux de dégagement de chaleur et le dégagement de chaleur intégrale de -11° APMH est supérieur à celui de -8° PMH à cause de la durée de combustion et le délai d'allumage plus long.

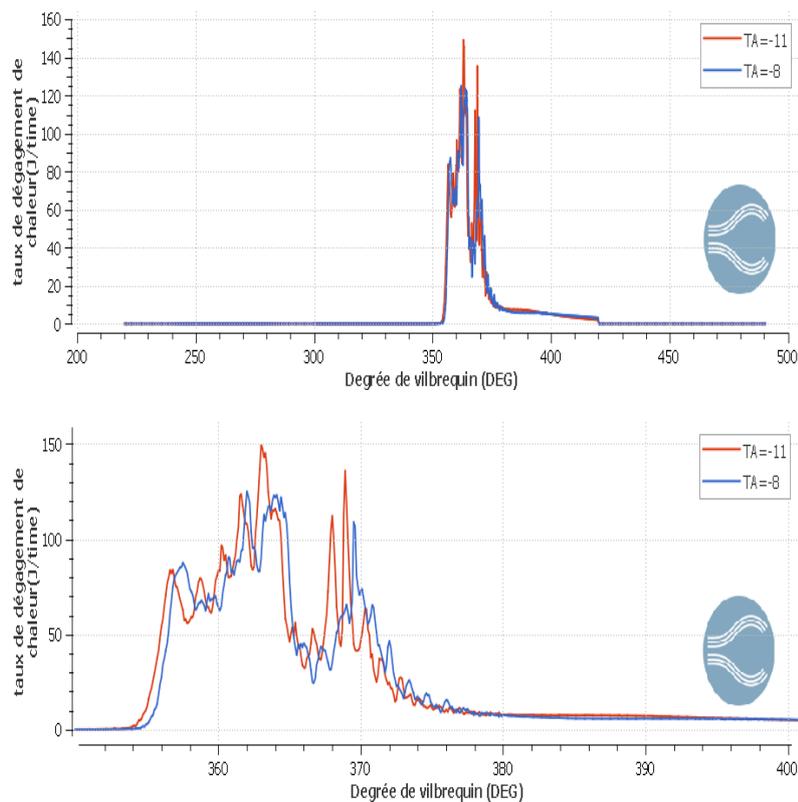


Figure 26 : Taux de chaleur dégagée en fonction de l'angle de vilebrequin

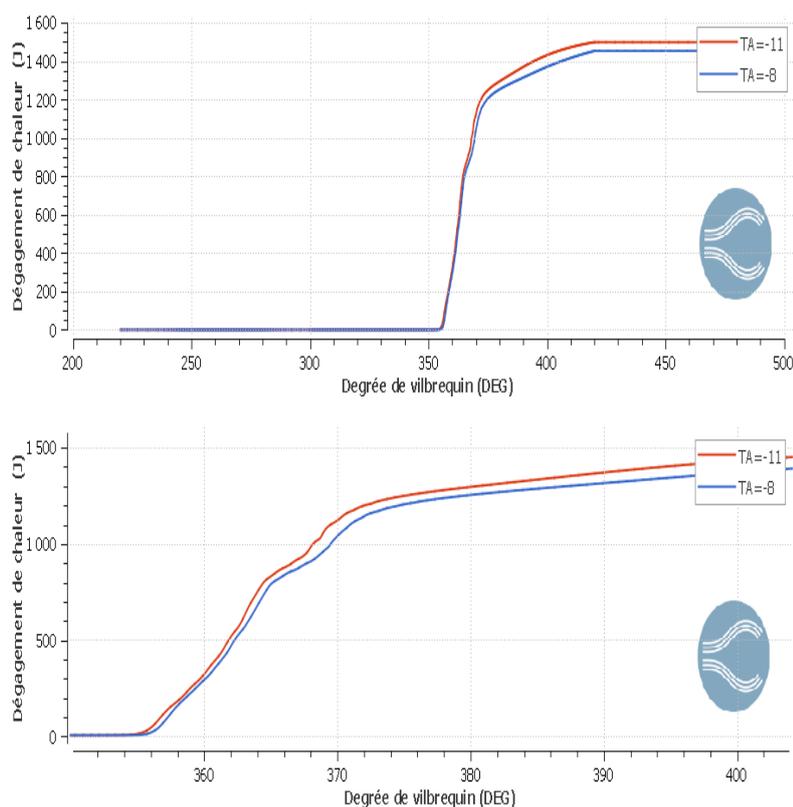
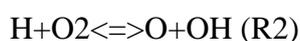


Figure 27 : La quantité de la chaleur dégagée en fonction l'angle de vilebrequin

2.3. Les radicaux libres H, O, OH :

Le taux de production de H, O et OH est illustré à la figure(28) ;(29) et (30). Le taux de production de H, O et OH augmente à mesure que l'hydrogène est ajouté, ce qui favorisera la combustion. Les réactions dominantes qui contribuent à H, O et OH peuvent être identifiées à partir du taux de production [33]. La réaction principale formant H, O et OH sont les suivantes :



L'augmentation de la fraction de taupe H₂ augmente le taux de réaction des réactions chimiques ci-dessous qui produisent plus de H et favorisent le taux de réaction des réactions chimiques précédentes. Le taux de production de ces radicaux libres expliquera plus tard l'effet de l'ajout d'hydrogène sur le début de la combustion et donc la durée de combustion. On constate que la production des radicaux libres est supérieur pour le cas de AT= -8° APMH (avant le point mort haut). Ceci est due au fait que l'instant d'allumage -8 APMH donne largement de temps à l'hydrogène de se désassocier et produire plus de radicaux libre.

Chapitre 5 : Résultats et discussions

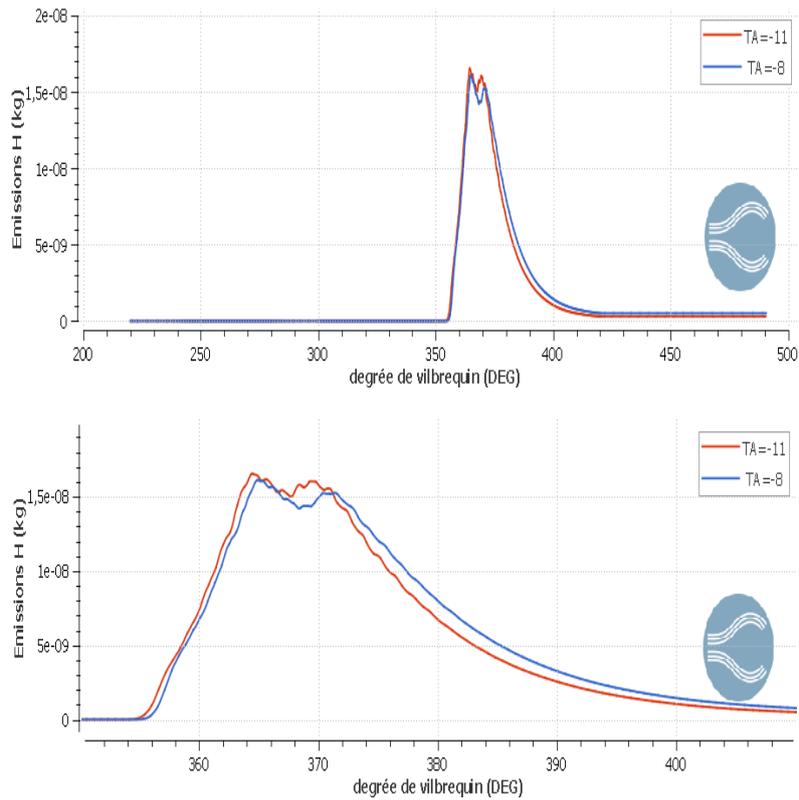


Figure 28 : Evolution de H en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin

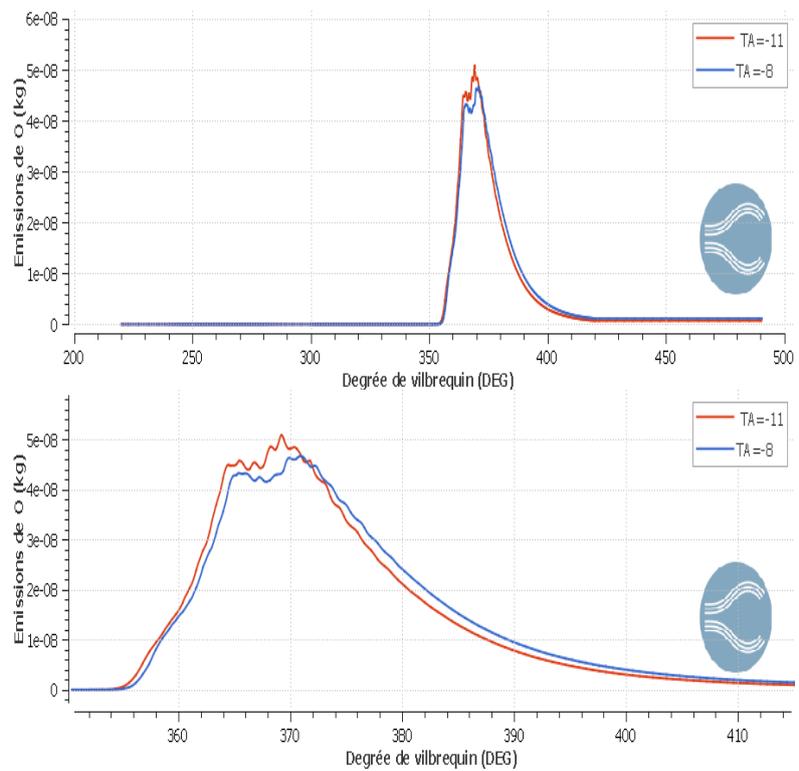


Figure 29 : Evolution de O en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin

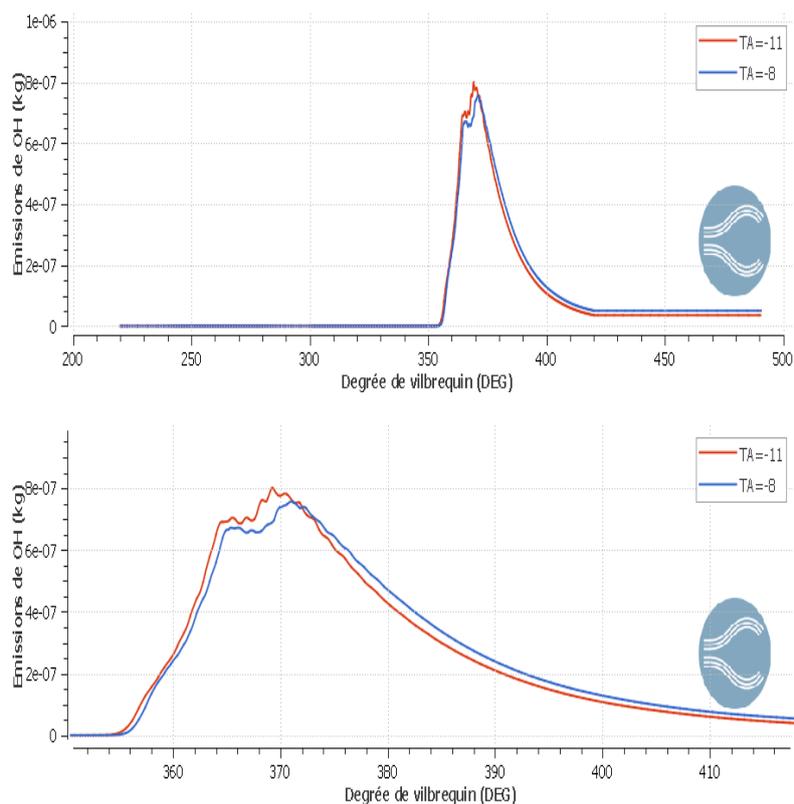


Figure 30 : Evolution de OH en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin

2.4. L'effet sur la consommation de H₂, O₂ et production de H₂O :

Les figures (31), (32), (33) montrent l'évolution de consommation de H₂, O₂ et production de H₂O respectivement. On constate que L'hydrogène se consomme à partir de l'angle de vilebrequin en parallèle avec la consommation de O₂. L'activation de l'allumage déclenche le processus de décomposition de H₂ et O₂. Ce mécanisme de collision entre les radicaux libres fini par produire l'H₂O à la fin de combustion et à l'équilibre. Les figures (H₂, O₂ H₂O) montre clairement le la consommation de H₂ et O₂ dans le cas de -11 °APMH est plus que -11 °APMH. Toutefois, on remarque que la même quantité de H₂O a été produite.

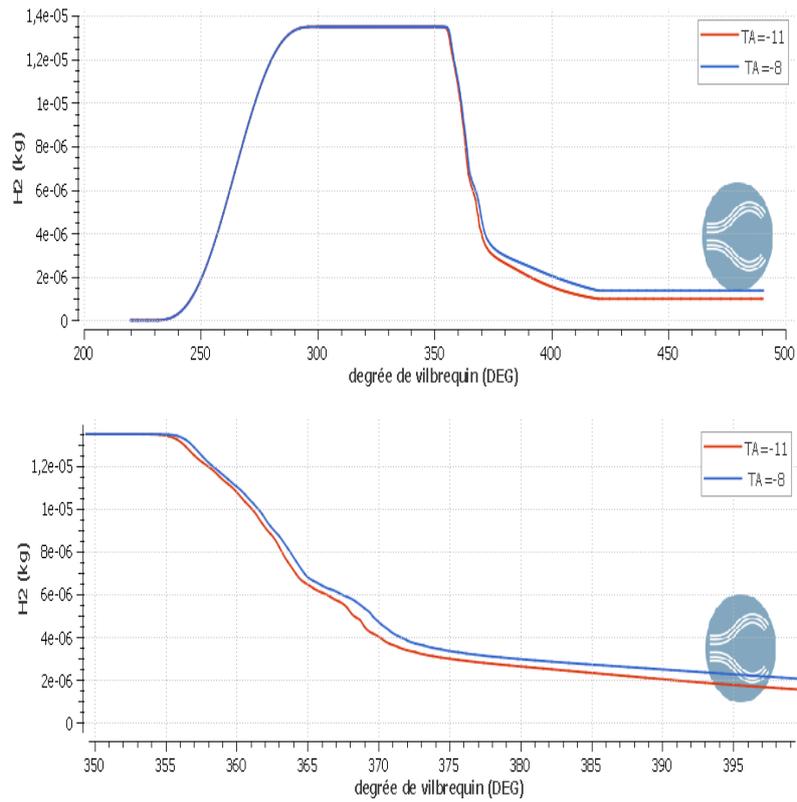


Figure 31 : Evolution de H₂ en (kg) en fonction de l'angle du viblequin

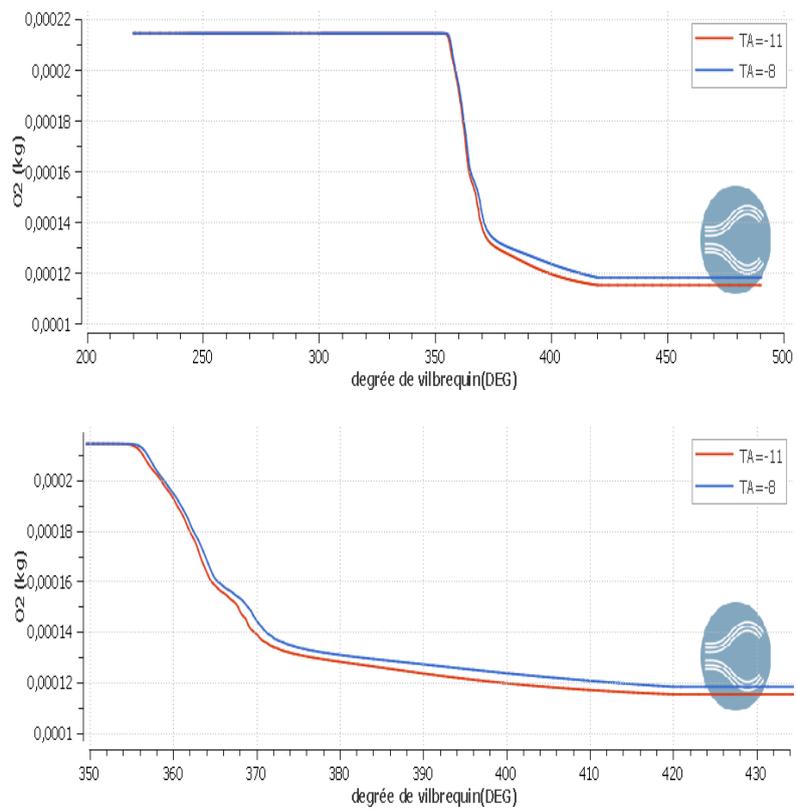


Figure 32 : Evolution de O₂ en (kg) en fonction de l'angle du viblequin

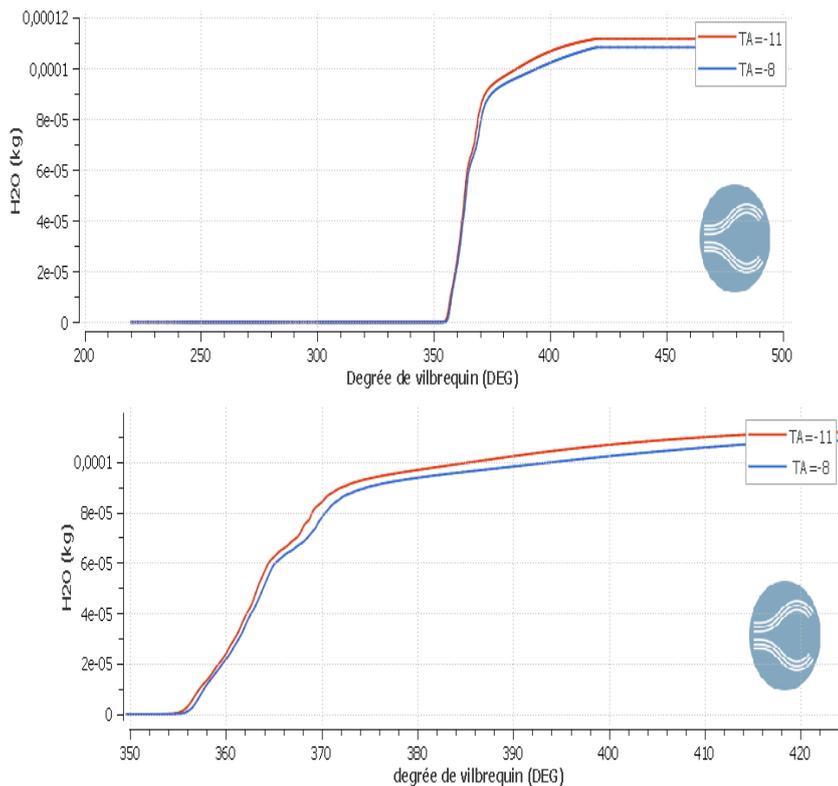


Figure 33 : Evolution de H_2O en (kg) en fonction de l'angle du vilebrequin

3. Conclusion :

Les performances du moteur à hydrogène sont liées au délai d'allumage comme nous l'avons vu déjà précédemment, il y avait une amélioration de la performance du moteur à des instants d'allumage, ce qui donnait l'impression qu'un mélange d'air et carburant nécessite plus de temps pour former un mélange approprié afin d'avoir une bonne combustion de pré-mélange pour atteindre une pression optimale, mais le problème qui se pose c'est la chute du taux de chaleur dégagée après le pic. En plus des taux d'émission élevés aux instants d'allumage, ce qui les rend inefficaces et inutiles pour le moteur. L'objectif majeur de ce chapitre est de caler et de valider les résultats numériques de la combustion dans un moteur à hydrogène ; en utilisant un code de calcul CONVERGE ; les résultats étaient en bon accord avec les données expérimentales.

CONCLUSION GENERALE :

Les mesures d'expérimentales souvent utilisée pour analyser les écoulements turbulents sont coûteuses alors que la simulation qui est la résolution numérique des équations de la dynamique des fluides (CFD), nous permet de visualiser les résultats d'un écoulement sur un simple écran d'ordinateur, en relevant des variables telles que la vitesse, la pression et la température et bien d'autres. L'énorme progrès apporté aux outils de simulation et le développement de modèle récents de combustion rend l'association entre l'approche numérique et le travail expérimental de plus en plus indispensable.

Concernant les travaux numériques, les codes de simulation deviennent un outil indispensable pour l'étude des phénomènes physiques très complexes dont les écoulements chimiquement réactifs pour la validation des résultats expérimentaux et faire des améliorations et des développements.

Ce travail préparé dans le cadre du mémoire de fin d'étude de master en énergétique génie mécanique nous a permis d'avancer dans le domaine de la simulation numérique à l'aide du code de calcul CONVERGE CFD traitant la simulation de la combustion dans les moteurs à hydrogène.

Les principaux objectifs de ce travail de mémoire sont atteints, notamment une maîtrise avancée du code de calcul «CONVERGE CFD ».suit à quoi Les différents résultats trouvés promettent d'analyser les performances (pression, taux de chaleur, et la température), ensuite d'analyser les radicaux libres (des H, O , OH, O₂,H₂ et H₂O). Ces outils sont numériques et permettent de simuler la combustion et décrire les phénomènes durant cette opération. Les conclusions sont que la simulation numérique avec ce code permet d'obtenir des bons résultats. Par contre une meilleure connaissance de l'influence de l'instant d'allumage sur les performances du moteur, qui passe par une bonne compréhension du délai d'allumage, pourrait être bénéfique pour la prédiction de ces résultats. L'étude sur la variation de l'instant d'allumage est alors menée en utilisant le programme CONVERGE CFD. Une validation du code, celui-ci est effectuée de façon à vérifier qu'il est capable de donner correctement les résultats exacts dans ce moteur. Le programme offre de bons résultats qui peuvent être utilisés pour des études prochaines. Enfin, dans la dernière partie, le code qui a été validé et utilisé. L'étude consiste à étudier l'influence de la variation de l'instant d'allumage sur les émissions et la performance du moteur.

Références bibliographiques :

- [1]- amrouche f, et al., toward hydrogen enriched natural gas “hcng” fuel on the algerian road, international journal of hydrogen energy (2010), doi:10.1016/j.ijhydene.2010.07.042
- [2] World energy : Development Perspectives Until 2010/ Translation from English by MIREK Commission ; under Redaction of Y.N. Starshi nov. – M. : Energia, 1980. -256 p. Guy Negre and Cyril Negre . Patent USA N°6305171B1 F01K 7/34. Method and Device for Additional Thermal Heating for Motor Vehicle Equipped Compressed Air Injection , Publ. 23.10.2001.
- [3] A. Mohammadi et al. / International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 296–304
- [4]- ma. Escalante soberanis, am. Fernandez. A review on the technical adaptations for internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures. International journal of hydrogen energy (2009), doi:10.1016/ j.ijhydene.2009.09.070.
- [5]- college of the desert. Hydrogen fuel cell engines and related technologies: rev 0, december 2001.
- [6]- fethia amrouche et coll., an overview of alternative road fuel: hydrogen compressed natural gas for internal combustion engines. Premier congrès international sur les matériaux et l’environnement «cime 2010» , alger, du 05 au 07 octobre 2010.
- [7]- akansu so, dulger a, kahraman n, veziroglu tn. Internal combustion engines fuelled by natural gas hydrogen mixtures. International journal hydrogen energy 2004;29:1527e39.
- [8]- fethia amrouche et coll., hydrogen-enriched natural gas: valid opportunity for dealing with sustainable development in maghreb countries transportation sector. 1st international symposium on environment friendly energies in electrical applications (efeea’10), ghardaia, 2-4 november, 2010, algeria.
- [9]- Projet de fin d’études pour l’obtention du diplôme de master en : domaine : science et technologie filière : genie mecanique spécialité : mecanique et energetique thème *etude des performances mecaniques et énergetiques d’un moteur d’automobile à hydrogène* présenté le: 16-06-2019.
- [10]- thèse de doctorat en sciences spécialité : physique option: physique des matériaux par: mohammedi lazhar thème « etude *ab-initio* des propriétés structurales et électroniques des hydrures métalliques tife-h : restitution totale et partielle de l’hydrogène »Soutenue publiquement le 14/11/2015.
- [11]- Nuno bento « la transition vers une économie de l’hydrogène : infrastructures et changement technique. Economies et finances ». Université pierre mendès-france - grenoble ii, 2010. Français.
- [12]- Thèse présentée à l’université du québec à trois-rivières comme exigence du doctorat en ingénierie par Rachid maamri « modélisation et expérimentation des moteurs a combustion fonctionnant avec différents carburants de substitution et mélanges » octobre 2014.

- [13]- Faculté de technologie département de génie électrique et électronique filière génie industriel option productique spécialité ingénierie de production thème du projet de fin d'étude « réalisation d'un générateur d'hydrogène » pour l'obtention du diplôme de master en productique par mehdaoui younes kabouch mohamed.
- [14]- « Modélisation de la combustion d'un moteur à essence master » 2ème année mnpm Année 2010/2011.
- [15]- Faculté de génie mécanique département de génie mécanique *polycopie « Moteurs à Combustion Interne, Combustion et Éléments de Carburant »* Polycopié destiné aux étudiants de Licence et Master LMD Options : *Energétique Installations Thermiques et Turbomachines Construction Mécanique* PRESENTE PAR Dr. Mohamed BENCHERIF (Maître de Conférences B) ANNEE 2018.
- [16]- Rouler à l'hydrogène Informations fournies par : Félix REUTIMANN, section Trafic, division Protection de l'air, OFEFP.
- [17]- Université de Montréal « contrôle du retour de flamme dans le prémélangeur des turbines à gaz » philippe versailles département de génie mécanique école polytechnique de Montréal mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées (génie mécanique) décembre 2010.
- [18]- Fatma Zohra Aklouche. Etude caractéristique et développement de la combustion des moteurs Diesel en mode Dual-Fuel : optimisation de l'injection du combustible pilote. Thermique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2018. Français.
- [19]- Jean van der Poll, Tidde Westerdijk. Contribution à l'étude des flammes d'hydrocarbures. Propane et acétylène. J. Phys. Radium, 1940.
- [20]- Mémoire sur « les carburants de remplacement en Amérique du Nord » par Louis-David Malo août 1999.
- [21]- Richards, K., P. Senecal, and E. Pomraning, A Three Dimensional Computational Fluid Dynamics Program for Transient or Steady State Flow With Complex Geometries, 2008, CONVERGE (Version 1.3).
- [22]- K.J. Richards, P.K. Senecal, and E. Pomraning, A Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Program for Transient or Steady State Flows with Complex Geometries, CONVERGE (Version 1.3), Convergent Science, Inc., Middleton, WI. (2008).
- [23]- K.J. Richards, P.K. Senecal, and E. Pomraning, A Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Program for Transient or Steady State Flow with Complex Geometries, CONVERGE (Version 1.4.1), Convergent Science, Inc., Middleton, WI. (2012).
- [24]- CONVERGE 2.4 Manual, 2018 Convergent Science, 17/10/2018
- [25]- C. M. Rhie and W. L. Chow, numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, Vol. 21, N. 11, 1983

[26]- R. Aglave, CFD simulation of combustion Using Automatically Reduced Reaction Mechanisms : A Case for Diesel Engine, these de doctorat, Uni- versity of Heidelberg 2007.

[27]- C. Correa, Combustion Simulations in Diesel Engines using Reduced Reaction Mechanism, thèse de doctorat, University of heidelberg 2000.

[28]- M. Christensen., The Effect of In-Cylinder Flow and Turbulence on HCCI Operation. SAE Paper 2002 -01-2864, 2002

[29]- Yakhot, V. Orszag, S.A, Thangam, S. Gatski, T.BSpeziale, C.G.

(1992), "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", Physics of Fluids A, Vol. 4, No. 7, pp1510-1520.

[30]- Yakhot, V. and Smith, L. M., (1992). "The Renormalization Group the epsilon-expansion and Derivation of Turbulence Models", J. Sci. Comput., 7, 35.

[31]- Ali Mohammadi et al, Masahiro shioji, Yasuyuki Nakai Wataru Ishikura Eizo Tabo , the performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine Journal hydrogen energy 2007 ;32 :296–304.

[32]- Liu J, Wang H, Ouyang M. Kinetic modeling study of hydrogen addition to premixed dimethyl ether-oxygenargon flames. Int J Hydrogen Energy 2011; 36 :15860e7. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.024>

[33]- Jinhua Wang, Zuohua Huang, Chenglong Tang, Haiyan Miao , Xibin Wang. Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane–air mixtures combustion. International journal of Hydrogen Energy, vol. 34, n. 2, pp. 1084-1096, 2009.