

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلكايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par : BOUREGUEBA Amel

Sujet

Simulation numérique des phénomènes intra-cycle d'un moteur à gaz

Soutenu le 29 / 06 / 2021 , devant le jury composé de :

M. R.SAIM	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. Z.SARI HASSOUNE	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur
M. M.BENRAMDANE	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. H.BOUSBAA	MCA	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire

Remerciement

***Au nom d'Allah le Très Miséricordieux, le Tout
Miséricordieux, à qui on doit tout***

Je voudrais, tout d'abord, exprimer ma profonde gratitude envers le bon Dieu, le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté de parvenir à la fin de mon parcours universitaire.

*Au nom de la vertu du travail, de l'esprit d'élévation de la connaissance, je saisis cette occasion pour adresser mes remerciements à mes encadreurs **M. BENRAMDANE Mohammed** et **M. BOUSBAA Hamza** d'avoir accepté de diriger mon travail, leurs conseils bienveillants, et pour la confiance qu'ils m'ont accordé ce qui m'a encouragé à fournir plus d'efforts pour être à la hauteur de leur attente.*

*Mes remerciements à **M. R. SAIM** d'avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury de ce mémoire et de bien vouloir l'examiner.*

*J'adresse aussi mes vifs remerciements à **M. Z. SARI HASSOUNE** d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à la famille **BOUREGUEBA, SEBOUAI** et **SEMMOUD** pour leur soutien et encouragement, rien n'aurait été possible sans le soutien de nos proches.*

Que toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet par une quelconque forme de contribution.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour son assistance et sa présence dans ma vie, reçoit à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse ALLAH faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent que tu m'as consacré.

*Mes sœurs **Meriem** et **Ibtissem** qui n'ont cessé d'être un exemple de persévérance, de courage et de générosité.*

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes coté.

ملخص

كان اختراع محرك الاحتعال بالشرارة خطوة مهمة في تاريخ محركات الاحتراق الداخلي. في السنوات الأخيرة ، شهدت محركات البنزين تطوراً لا يمكن إنكاره بفضل كفاءتها الاستثنائية. ومع ذلك ، فإنها تنبعث منها ملوثات مثل أكسيد النيتروجين وجزئيات السخام. أصبح تطبيق معايير انبعاث الملوثات أكثر صرامة. في هذا السياق، تم إجراء قدر كبير من العمل البحثي لتحديد مصادر الطاقة البديلة الأكثر ايكولوجية من المنتجات البترولية التقليدية.

يتمتع غاز البترول المسال باهتمام كبير. الاستهلاك العالمي لهذا الاخير في تزايد مستمر بسبب سجله الاقتصادي الموثوق به كوقود نظيف وفعال للمستقبل.

الهدف من هذا العمل هو إتقان أداة محاكاة CFD، للسماح بفهم متعمق لخصائص الاحتراق، وأيضاً، ملاحظة تشكّل الملوثات بتكلفة أقل.

في هذه الدراسة اعتمدنا على كود 2.3CONVERGE لدراسة الظواهر التي تظهر في الأسطوانة أثناء مرحلة الاحتراق على وجه الخصوص. تم استخدام نهج RANS. تم وصف الاحتراق بواسطة نموذج SAGE ، والرش بواسطة نموذج KH-RT ، والاضطراب ، والاشتعال ، وتكوين أكسيد النيتروجين والسخام بواسطة نماذج k -RNG- و Hiroyasu ، و Zeldovich على التوالي.

ستتم مقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها بواسطة رمز الكمبيوتر هذا لمحرك البنزين بالحقن المباشر مع نتائج محرك غاز البترول المسال الذي يعمل بنفس نوع الحقن.

الكلمات المفتاحية: محرك الإشعال بالشرارة ، غاز البترول المسال ، الحقن المباشر ، الاحتراق ، CONVERGE ، V2.3 ، المحاكاة الرقمية.

Abstract

The invention of the spark ignition engine was an important step in the history of internal combustion engines. In recent years, gasoline engines have undergone an undeniable development thanks to their exceptional efficiency. However, they emit pollutants such as NO_x and soot particles. The application of pollutant emission standards is becoming more and more stringent.

In this context, a great deal of research work has been carried out with the aim of identifying alternative energy sources that are greener than conventional petroleum products.

LPG enjoys great interest. Global fuel consumption is steadily growing due to its reliable economic record as a clean and efficient fuel for the future.

The objective of this work is to master a CFD simulation tool, to allow a thorough understanding of the characteristics of combustion and also provides for the formation of pollutants at a lower cost.

In this study, we have based on the CONVERGE code 2.3 to study the phenomena which appear in the cylinder during the combustion phase in particular. The RANS approach is used. Combustion is described by the SAGE model, the spray by the KH-RT model, turbulence, ignition, formation of NO_x and soot by the RNG models k-ε, Hiroyasu, and Zeldovich respectively.

The numerical results obtained by this computer code for a direct injection gasoline engine will be compared with results for an LPG engine operating with the same type of injection.

Keywords: Spark ignition engine, Liquefied Petroleum Gas, direct injection, combustion, CONVERGE V2.3, digital simulation.

Résumé

L'invention du moteur à allumage commandé était un pas important dans l'histoire des moteurs à combustion interne. Ces dernières années, les moteurs à essence ont connu une incontestable évolution grâce à leur rendement exceptionnel. Cependant, ils émettent des polluants tels que les NO_x et les particules des suies. L'application de normes d'émission de polluants devient de plus en plus sévère.

Dans ce contexte, un grand nombre de travaux des recherches ont été mené dans le but d'identifier des sources d'énergie de substitution plus écologiques que les produits pétroliers conventionnels.

Le GPL bénéficie d'un grand intérêt. La consommation mondiale de ce dernier est en croissance continue due à son bilan économique fiable en tant qu'un carburant propre et efficace pour l'avenir.

L'objectif de ce travail est de maîtriser un outil de simulation CFD, pour permettre une compréhension approfondie des caractéristiques de la combustion et prévoit également la formation des polluants à un moindre cout.

Dans cette étude, on a basé sur le code CONVERGE 2.3 pour étudier les phénomènes qui se manifestent dans le cylindre durant la phase de combustion notamment. L'approche RANS est utilisée. La combustion est décrite par le modèle SAGE, le spray par le modèle de KH-RT, la turbulence, l'allumage, la formation des NO_x et des suies par les modèles RNG $k-\varepsilon$, Hiroyasu, et Zeldovich respectivement.

Les résultats numériques obtenus par ce code de calcul pour un moteur essence à injection directe seront comparés avec des résultats d'un moteur GPL fonctionnant avec le même type d'injection.

Mots-clefs : Moteur à allumage commandé, Gaz Pétroliers Liquéfiés, injection directe, combustion, CONVERGE V2.3, simulation numérique.

Table des matières

Introduction générale.....	2
Chapitre 1 Moteurs à allumage commandé	
1.1. Introduction	6
1.2. Description du moteur à essence	6
1.3. Historique du moteur à allumage commandé.....	7
1.4. Structure du moteur	9
1.5. Combustible utilisé.....	10
1.6. Classification des moteurs à allumage commandé.....	10
1.6.1. Selon le nombre de temps	10
1.6.2. Selon le type d'injection	11
1.6.3. Selon l'alimentation en air.....	13
1.6.4. Selon le mode de refroidissement.....	13
1.6.5. Selon le mode de lubrification.....	14
1.6.6. Selon la caractéristique géométrique	14
1.7. Principe de fonctionnement.....	14
1.7.1. Cycle 4 temps	14
1.7.2. Cycle à 2 temps.....	16
1.8. Chronologie de combustion	18
1.8.1. Diagramme théorique (diagramme idéal).....	18
1.8.2. Cycle réel.....	19
1.9. Systèmes d'alimentation	24
1.9.1. Principe de fonctionnement	24
1.9.2. Alimentation en air	25
1.9.3. Alimentation en carburant	26
1.10. Constitution de système d'alimentation en carburant	31
1.10.1. Circuit complet	31
1.10.2. Différents montages.....	32
1.10.3. Éléments constitutifs.....	32
1.11. Système d'allumage	35
1.11.1. Différents types d'allumage	36

1.12. Systèmes annexes	38
1.12.1. Système de graissage	38
1.12.2. Système de refroidissement	40
1.13. Émissions polluantes	43
1.13.1. Présentation des polluants automobiles	43
1.13.2. Formation des polluants.....	44
1.13.3. Réglementation et mesures	46
1.14. Nouvelles voies envisagées pour la réduction de la consommation des carburants et des émissions de polluants.....	47
1.14.1. Amélioration de la combustion dans les moteurs	47
1.14.2. Systèmes de post-traitement des gaz d'échappement.....	49
1.14.3. Reformulation des carburants	51
1.15. Biocarburants	52
1.15.1. Enjeux et perspectives	52
1.15.2. Définition et catégories.....	52
1.16. Conclusion.....	54

Chapitre 2 Conversion d'un moteur essence au GPL

2.1. Introduction	56
2.2. Historique des GPL	56
2.3. Gaz Pétrolier Liquéfié	57
2.4. Composition des GPL	58
2.5. Origine du GPL	58
2.6. Propriétés des GPL.....	58
2.7. Utilisation du GPL	61
2.8. Avantages et inconvénients techniques des GPL.....	62
2.9. Stockage de GPL.....	63
2.9.1. Différents types de stockage des GPL	63
2.10. Risques inhérents à l'utilisation du GPL.....	68
2.10.1. Risques dus à la vaporisation	68
2.10.2. Risques dus aux fuites.....	68

2.10.3. Risques dus à un échauffement	69
2.11. Situation Algérienne de GPL	69
2.11.1. Industrie du GPL en Algérie	69
2.11.2. Offre nationale de GPL	69
2.12. Installation GPL	70
2.12.1. Principe de fonctionnement	72
2.13. Sécurité maximale pour les véhicules GPL.....	73
2.13.1. Réservoir GPL ultra résistant.....	74
2.13.2. Accessoires de sécurité sur les véhicules GPL	74
2.14. Bicarburant essence-GPL.....	74
2.14.1. Composition du système	74
2.14.2. Mode d'injection.....	75
2.14.3. Avantages et inconvénients de la bicarburant.....	75
2.15. Conclusion :.....	77

Chapitre 3

Formulations Mathématiques et code de calcul CFD

CONVERGE

3.1. Introduction	80
3.2. Équations de l'aérothermochimie turbulente	80
3.2.1. Équation de continuité de l'espèce chimique m	80
3.2.2. Equation de conservation de la masse	81
3.2.3. Equation de quantité de mouvement	81
3.2.4. Équation de conservation de l'énergie.....	82
3.3. Approche de RANS.....	82
3.4. Les sous modèles physiques.....	84
3.4.1. Modèle de Turbulence k-ε.....	84
3.4.2. Modélisation du spray	85
3.5. Équations de la phase liquide	86
3.5.1. Modèles d'atomisation	86

4.4.2. Conditions aux limites	115
4.4.3. Choix des modèles de simulation	115
4.4.4. Temps de calcul	116
4.5. Résultats et discussions	116
4.5.1. Evolution de Pression	116
4.5.2. Evolution du taux de dégagement de chaleur	117
4.5.3. Evolution de la température	118
4.5.4. Evolution de la quantité de combustible	119
4.5.5. Emissions du cycle	120
4.6. Contours	123
4.6.1. Evolution du Jet (la quantité du carburant injecté)	123
4.7. Conclusion :	132
Conclusion générale	134
Références	137

Liste des figures

Figure 1.1 : Représentation des éléments principaux constituant un moteur à essence.....	9
Figure 1.2 : Principe de fonctionnement d'un moteur 2 temps	11
Figure 1.3 : Carburation par carburateur	12
Figure 1.4 : Systèmes d'alimentation dans MCI essence	13
Figure 1.5 : Types de la disposition des cylindres	14
Figure 1.6 : Cycle à 4 temps.....	16
Figure 1.7 : Cycle à 2 temps.....	17
Figure 1.8 : Diagramme de beau de rochas	18
Figure 1.9 : Diagramme réel avant réglage	20
Figure 1.10 : Schéma représentant la distribution des soupapes	22
Figure 1.11 : Diagramme réel après réglage	22
Figure 1.12 : Diagramme de pression en fonction de l'angle de vilebrequin	23
Figure 1.13 : Processus de formation du mélange dans les moteurs à essence.....	25
Figure 1.14 : Système d'alimentation en carburant.....	27
Figure 1.15 : Architecture d'un moteur à injection indirecte.....	28
Figure 1.16 : Architecture d'un moteur à injection directe essence.....	29
Figure 1.17 : Circuit d'injection monopoint (Bosch Mono-Jetronic)	30
Figure 1.18 : Circuit d'injection multipoint (Bosch LH-Jetronic)	30
Figure 1.19 : Système d'alimentation d'un moteur	31
Figure 1.20 : Différents montages d'injection	32
Figure 1.21 : Pompe immergée	32
Figure 1.22 : Filtre à carburant.....	33
Figure 1.23 : Régulateur de pression.....	34
Figure 1.24 : Mise en situation d'un injecteur	35
Figure 1.25 : Allumage par batterie	36
Figure 1.26 : Système d'allumage électronique.....	38
Figure 1.27 : Circuit de graissage.....	40
Figure 1.28 : Circuit de refroidissement à eau d'un moteur	42
Figure 1.29 : Circuit de refroidissement à air.....	43
Figure 1.30 : Évolution des émissions de polluants en fonction de la richesse du mélange [Degobert,1992]	45

Figure 1.31 : Catalyseurs d'oxydation	49
Figure 1.32 : Schéma d'un système SCR (source : panorama IFP 2005)	50
Figure 1.33 : Emplacement des filtres à particules dans un moteur.....	51
Figure 2.1 : Accessoires d'une sphère.....	65
Figure 2.2 : Sphère sous talus.....	66
Figure 2.3 : Sphère sous talus.....	66
Figure 2.4 : Réservoir cylindrique sous talus	67
Figure 2.5 : Sphère réfrigérée calorifugée.....	68
Figure 2.6 : Schéma d'implantation d'un kit GPL	71
Figure 2.7 : Kit de conversion GPL-C de type BRC	71
Figure 2.8 : Kit de conversion GPL-C de type LANDIRENZO	72
Figure 2.9 : Schéma de principe d'un système d'alimentation GPL.....	73
Figure 3.1 : Schéma de principe du modèle KH-RT	88
Figure 3.2 : Cadre conceptuel dans lequel s'inscrit la simulation numérique: Réalité et les résultats de simulation	97
Figure 3.3 : Structure standard de converge.....	100
Figure 3.4 : Raffinement du maillage	101
Figure 3.5 : Schéma de fichiers d'entrée, des données et de sortie (input, data, and output files)	102
Figure 4.1 : Boucle de modélisation.....	108
Figure 4.2 : Vue 3D du moteur	109
Figure 4.3 : Vues 3D des valves.....	111
Figure 4.4 : Profil de distribution des soupapes	112
Figure 4.5 : Vue 3D de la bougie d'étincelle	113
Figure 4.6 : Maillage du domaine de calcul	114
Figure 4.7 : Configuration adoptée pour imposer les conditions aux limites à l'entrée des collecteurs d'admissions et à la sortie des collecteurs d'échappements	115
Figure 4.8 : Evolution de la pression en fonction de l'angle de vilebrequin.....	116
Figure 4.9 : Evolution du taux de chaleur en fonction de l'angle de vilebrequin	117
Figure 4.10 : Evolution de la température en fonction de l'angle de vilebrequin.....	118
Figure 4.11 : Evolution de la température en fonction de l'angle de vilebrequin.....	119
Figure 4.12 : Evolution des NOx en fonction de l'angle de vilebrequin.....	120
Figure 4.13 : Evolution des suies en fonction de l'angle de vilebrequin	121
Figure 4.14 : Evolution CO en fonction de l'angle de vilebrequin	122

Figure 4.15 : Evolution CO2 en fonction de l'angle de vilebrequin	123
Figure 4.16 : Contours de spray à -170°V	124
Figure 4.17 : Contours de spray à -165°V	124
Figure 4.18 : Contours de spray à -160°V	125
Figure 4.19 : Contours de spray à -150°V	125
Figure 4.20 : Contours de spray à -140°V	126
Figure 4.21 : Contours de spray à -130°V	126
Figure 4.22 : Contours de spray à -120°V	127
Figure 4.23 : Contours de spray à -100°V	127
Figure 4.24 : Contours de spray à -220°V	128
Figure 4.25 : Contours de spray à -216°V	128
Figure 4.26 : Contours de spray à -210°V	129
Figure 4.27 : Contours de spray à -200°V	129
Figure 4.28 : Contours de spray à -180°V	130
Figure 4.29 : Contours de spray à -170°V	130
Figure 4.30 : Contours de spray à -160°V	131
Figure 4.31 : Contours de spray à -150°V	131

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Avances et retards à l'ouverture et à la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement	23
Tableau 2.1 : Composition des GPL	58
Tableau 2.2 : Propriétés des GPL.....	61
Tableau 3.1 : Valeurs des constantes dans les modèles RNG k- ϵ	85
Tableau 3.2 : Code CFD.....	98
Tableau 3.3 : Fichiers d'entrées	103
Tableau 3.4 : Fichiers de sortie	104
Tableau 4.1 : Description des caractéristiques géométriques du moteur étudié	109
Tableau 4.2 : Description des caractéristiques du système d'injection du moteur étudié.....	110
Tableau 4.3 : Soupapes d'admissions et d'échappements.....	111
Tableau 4.4 : Spécifications Système d'allumage.....	112
Tableau 4.5 : Conditions initiales.....	113
Tableau 4.6 : Conditions aux limites.....	114
Tableau 4.7 : Choix des modèles	114

Nomenclature

A_{so}	Facteur d'échelle
b_{crit}	Paramètre d'impact critique de collision
B_d	Nombre de transport de Spalding
C_μ	Modèle de turbulence constante
C_p	Chaleur spécifique du fluide [J.kg.k ⁻¹]
$c_{\varepsilon 1}$	Constante des modèles k-ε et RNG k-ε
$c_{\varepsilon 2}$	Constante des modèles k-ε et RNG k-ε
$c_{\varepsilon 3}$	Constante des modèles k-ε et RNG k-ε
C_2	Constante des modèles k-ε et RNG k-ε
C_1	Chaleur spécifique du liquide [J.kg.k ⁻¹]
D_s	Diamètre des particules de suie nominale [m]
D_t	Diffusion turbulent
D	Coefficient de diffusion
E_{chem}	L'énergie d'activation [J/Kg]
F	Fonction de distribution de probabilité des gouttelettes
h_m	L'enthalpie de l'espèce [j/kg]
K	La conductivité [Kg .m ⁻¹ s ⁻¹]
k_t	Conductivité turbulent [Kg .m ⁻¹ s ⁻¹]
L_b	Longueur du noyau liquide [m]
m, x_m	Symbole chimique pour les espèces m
M_{wc}	Poids moléculaire du carbone [kg]
M_s	Masse de suie [kg]
\dot{M}_{sf}	Taux de masse de formation de suie
\dot{M}_{so}	Taux d'oxydation de masse de suie
M_{form}	Masse des espèces de formation de suie [kg]
M_{mix}	Poids moléculaire du mélange [kg]

M_m	La masse d'espèce m dans la cellule [kg]
M_{tot}	La masse totale dans la cellule [kg]
$N_{p,soot}$	Nombre total de particules de suie
P_{O_2}	Pression partielle d'oxygène dans les atmosphères [$N.m^{-2}$]
Pr_m	Nombre de Prandtl moléculaire
P_{gas}	La pression du gaz [$N.m^{-2}$]
P_v	Tension de vapeur à la température des gouttelettes de courant [$N.m^{-2}$]
P_v	Tension de vapeur à la température des gouttelettes de courant [$N.m^{-2}$]
P	La pression [$N.m^{-2}$]
Pr_t	Nombre de Prandtl turbulent
R	Constante des gaz [$J. mol^{-1}.K^{-1}$]
r	La réaction
r_1	Rayons du collecteur [m]
r_2	Rayons de gouttelettes [m]
R_{total}	Vitesse de réaction nette [m/s]
S	Le terme source
S_c	Nombre de Schmidt
\dot{S}^s	Terme source due au spray
\dot{S}^c	Terme source due à la chimie
Sh_d	Le nombre de Sherwood
t	Temps [s]
T_d	La température de la goutte [K]
T_f	La température du fluide [K]
T_w	La température de la paroi [K]
U_τ	La vitesse de cisaillement [m/s]
U	La vitesse [m/s]
u_i	Vitesse instantanée. [m/s]
\bar{u}_i	Vitesse Moyenne d'ensemble [m/s]

\acute{u}	Vitesse Fluctuant [m/s]
v_{coll}	Fréquence de collision [Hz]
$v'_{m,r}$	Coefficients stœchiométriques des réactifs
$v''_{m,r}$	Coefficients stœchiométriques des produits
V_{I2}	Vitesse relative entre le collecteur et les gouttelettes de colis [m/s]
X	Proportion d'un des sites
Y_m	Fraction de masse des espèces
γ^*	La fraction de masse de vapeur à la surface de la goutte
Y^*_1	La fraction massique de vapeur
Y	La distance au mur le plus proche [m]
y^+	Distance adimensionnelle normale à la paroi [m]

Nombres sans dimension

W_e	Nombre de Weber
Z	Nombre de Ohnesorge
Re_l	Nombre de Reynolds
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Nu	Nombre de Schmidt
Sh	Nombre de Sherwood

Abréviations

AOA	Avance à l'Ouverture de l'Admission
AOE	Avance à l'Ouverture de l'Echappement
RFA	Retard de Fermeture de l'Admission
RFE	Retard de Fermeture de l'Echappement
EGR	Exhaust Gas Recirculation
GMV	General Mesh Viewer
GNV	Gaz Naturel Véhicule
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
KH	Kelvin-Helmholtz
MCI	Moteur à Combustion Interne
PMB	Point Mort Bas
PMH	Point Mort Haut
RNG	ReNormalization Group
RT	Rayleigh-Taylor

Notations Grecques

ρ	Masse volumique [kg . m ⁻³]
ρ_m	Masse volumique des espèces m [kg . m ⁻³]
σ_{ij}	Tenseur des contraintes de Reynolds [N/m ⁻²]
μ	Viscosité [kg .m ⁻¹ .s ⁻¹]
E	Dissipation turbulente [m ² .s ⁻³]
ρ_{tot}	Masse volumique dans la cellule [kg. m ⁻³]
μ_t	Viscosité turbulente [kg .m ⁻¹ .s ⁻¹]
Λ	Longueur d'onde [m]
Ω	Taux d'accroissement
$\bar{\rho}$	Masse volumique moyen [kg. m ⁻³]
ρ_l	Masse volumique de liquide [kg. m ⁻³]
ρ_g	Masse volumique de gaz [kg. m ⁻³]
μ_{air}	La viscosité de l'air [kg .m ⁻¹ .s ⁻¹]
μ_m	Viscosité d'espèce [kg .m ⁻¹ .s ⁻¹]
ρ_m^*	Valeur d'équilibre thermodynamique local [kg. m ⁻³]
τ_c	Temps caractéristique pour atteindre l'équilibre [s]
τ_{chem}	Temps chimique-cinétique [s]
τ_{turb}	Temps de mélange turbulent [s]

Introduction générale

Introduction générale

Depuis son invention au 19^{ème} siècle, le moteur à combustion interne a eu un impact phénoménal sur le transport et, ainsi, sur notre style de vie. Depuis lors il a tout entraîné à partir des petites voitures jusqu'aux grands Bateaux. Bien qu'il existe diverses solutions alternatives pour la production de la puissance mécanique en mesure d'utilisation à des fins de génération d'électricité et de transport routier et maritime, la position du moteur à combustion interne demeure intacte.

Les carburants conventionnels issus des hydrocarbures dans le secteur du transport automobile mondial tels que l'essence, le carburant Diesel, le gaz naturel et le gaz du pétrole liquéfié sont actuellement surexploités, avec une demande énergétique mondiale qui ne cesse de croître, ce que fait de ce secteur, le plus énergétivore et le plus émetteur de gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique.

Devant la croissance des soucis vis-à-vis des réserves limitées en énergie fossile et les règlements rigoureux en matière de respect de l'environnement, la recherche pour l'amélioration des performances du moteur à combustion interne, et la réduction des émissions est devenue l'aspect le plus important chez la communauté scientifique qui s'intéresse à la combustion et au développement de ces moteurs. Les situations difficiles (dernières guerres, chocs pétroliers) et la prise de conscience du caractère forcément limité des ressources pétrolières ont été à la base l'inspirateur de nombreux travaux de recherche sur les combustibles. Plus récemment, la pression sur la réduction des émissions polluantes a renforcé l'intérêt de ces recherches.

Dans ce contexte, tous les types de moteurs sont étudiés: les moteurs à combustion interne¹, les moteurs hybrides ou électriques et les piles à combustibles. Aujourd'hui encore les moteurs à combustion interne sont privilégiés par les constructeurs automobiles. Ils présentent d'abord l'avantage d'être nettement moins onéreux par rapport aux moteurs de technologie alternative, tout en assurant de meilleures prestations (performances, autonomie, agrément, fiabilité). De plus, ils sont capables de brûler de nombreux carburants moyennant de faibles adaptations (essence, gazole, GPL, gaz naturel, huiles végétales), ce qui assure partiellement l'après pétrole. Enfin, de nombreuses voies d'amélioration connues restent encore à exploiter. Actuellement, le développement des moteurs automobiles doit répondre à une volonté de réduction de la consommation du carburant et à des normes de plus en plus

sévères concernant l'émission des gaz polluants. Les efforts pour diminuer la consommation spécifique des véhicules et la quantité de polluants qu'ils émettent s'orientent aujourd'hui dans trois directions principales:

- Amélioration de la combustion proprement dite par la conception de nouveaux moteurs plus performants, en utilisant les méthodes CFD combinées à des essais expérimentaux et des modèles de cinétique chimique (downsizing, système d'injection, nouveaux modes de combustion...);
- Amélioration des techniques de post-traitement des gaz émis à la sortie du moteur: pot catalytique, filtres à particules (La catalyse trois voies, la réduction catalytique sélective (SCR) et le piège à NOx, filtre à particules);
- Utilisation des carburants alternatifs comme les à gaz naturel qui occupent une bonne position, due à la structure moléculaire du gaz naturel, les gaz d'échappement de ces moteurs contiennent de faibles quantités de suies, et environ 25% de moins de CO₂ en comparaison avec un moteur diesel du même rendement thermique.

Durant la dernière vingtaine d'années, une nouvelle énergie a réussi à se frayer un chemin à côté du pétrole et du gaz naturel ; il s'agit des gaz de pétrole liquéfiés (GPL). Grâce à leurs atouts d'énergie propre et transportable, les GPL ont réussi à pénétrer des secteurs aussi divers que la pétrochimie, l'agriculture, l'industrie et l'automobile (GPL/c).

Le GPL s'est imposé essentiellement grâce à ses caractéristiques propres, sa souplesse d'utilisation, en tant que combustible dans de nombreuses applications, le coût raisonnable que présente son stockage et son transport, sa sécurité d'approvisionnement, son prix compétitif, et d'autres avantages d'un point de vue écologique. L'atout majeur du propane est la réduction importante considérée comme l'une des préoccupations prioritaires de l'heure à travers le monde, la destruction de la couche d'ozone, l'utilisation du propane pourrait réduire à néant les émissions de dioxyde de soufre, 60% celles de dioxyde de carbone et 50% celles des dioxydes d'azote.

Objectif de l'étude

Notre effort se concentrera sur l'étude de la combustion dans un moteur à allumage commandé et un moteur GPL à injection directe. Nous présentons l'aspect d'un écoulement pleinement tridimensionnel, en utilisant le code de simulation CONVERGE.

Organisation du travail

Ce travail est constitué de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une description détaillée sur les moteurs à combustion interne à allumage commandé, le déroulement de la combustion, le système d'injection et la formation des polluants et quelques solutions technologiques de réduction de ces derniers.
- Le deuxième chapitre, on a parlé du GPL, ses propriétés, ses avantages et inconvénients, son stockage et aussi de la bicarburation essence-GPL et l'installation de ce système.
- Le troisième chapitre présente les formulations mathématiques. On y trouve le système d'équations aux dérivées partielles régissant les écoulements réactifs et turbulents. Aussi, les modèles physiques et chimiques implantés dans le code depuis l'injection du combustible jusqu'à la formation des différents polluants : les modèles de spray, de combustion, de turbulence, de transfert de chaleur, de chimie, de formation de HC, CO, CO₂, NO_x...etc.

Ensuite, une description du code de calcul numérique CONVERGE, et son domaine d'utilisation.

- Le quatrième chapitre présente la géométrie du banc d'essais, la validation des résultats obtenus puis commentés et visuellement récapitulés concernant l'écoulement,

Chapitre 1:
Moteurs à allumage commandé

Chapitre 1 Moteurs à allumage commandé

1.1. Introduction

La machine à vapeur alternative a été le premier moteur thermique appliqué. Créée par Denis Papin (1679), elle a été développée progressivement au cours du 18^e siècle (Thomas Newcomen 1712, James Watt 1784) et a rendu possible la première phase d'industrialisation au cours du 19^e siècle. La création de la turbine à vapeur se situe vers la fin du 19^e siècle (Charles Parsons 1884 pour la turbine à réaction, Auguste Râteau 1901 pour la turbine multicellulaire à action). La première réalisation d'un moteur à explosion est due à Étienne Lenoir (Moteur à gaz sans compression préalable 1860). L'invention des principes du moteur à explosion, tel qu'il existe aujourd'hui, peut être attribuée à Beau de Rochas (1862) et la première réalisation à Nikolaus Otto (1876) ; celle du diesel revient évidemment à Rudolf Diesel (1892). Les premières réalisations, essentiellement orientées vers l'automobile, s'inspirent largement de la machine à vapeur (dimensionnement, mécanismes de distribution) telle que celle de Delamare-Deboutteville (1883) ; les réalisations ultérieures s'en sont distinguées assez rapidement. Les applications préindustrielles automobiles se sont concrétisées dans la dernière décennie du 19^e siècle (précurseurs G. Daimler, C. Benz, W. Maybach ; en France R. Panhard et E. Levassor). Le seul moteur rotatif ayant atteint le stade de développement industriel a été conçu par Félix Wankel (1929) et a été mis au point avec l'aide du constructeur automobile NSU au cours des années 1960. La turbine à gaz, dont certains auteurs font remonter le principe à l'antiquité, doit attendre le début du 20^e siècle pour voir éclore ses premières réalisations (Armangeaud et Le Male). La Seconde Guerre mondiale a accéléré le développement des propulseurs aéronautiques à réaction utilisant la turbine à gaz [1].

1.2. Description du moteur à essence

Le moteur à allumage commandé (AC) est l'un des membres éminents de la grande famille des moteurs alternatifs à combustion interne, c'est-à-dire des moteurs qui produisent du travail par action directe sur un piston de la pression provenant de l'inflammation d'un mélange combustible, avec transformation du mouvement alternatif en rotation par l'intermédiaire d'un système bielle-manivelle. Le terme « allumage commandé » vient de ce que l'inflammation est initiée au moyen d'une étincelle, généralement d'origine électrique, en un moment bien déterminé du cycle. L'alimentation avec des mélanges homogènes d'air et de vapeur de carburant est indispensable pour assurer un bon allumage, ce qui impose des

carburants de bonne volatilité, telles les essences de pétrole, d'où son appellation, plus familière, de « moteur à essence ». Son omniprésence dans le domaine de la traction routière, et particulièrement dans celui de l'automobile, est à l'origine de sa grande popularité ; rares sont les propulseurs capables actuellement de le concurrencer dans cette utilisation [2].

Le moteur à allumage commandé est relativement plus léger et plus vif dans les bas régimes et lorsqu'il est froid, car l'allumage se fait par l'intermédiaire d'une bougie. Il est relativement plus silencieux, puisque l'explosion du mélange air-carburant dans un moteur Diesel, à la suite de l'auto-inflammation, provoque une onde de choc importante dont le bruit ressemble à une sorte de claquement. Généralement, la mise en marche du moteur à allumage commandé est plus rapide aux bas régimes, car l'allumage est réalisé par une étincelle produite par la bougie. Les régimes moteurs étant de surcroît plus élevés, les véhicules de sport et les voitures de luxe sont généralement munis de moteurs à allumage commandé.

Il est cependant plus facile d'obtenir une puissance plus importante, mais à haut régime seulement à cause d'un faible couple à bas régime.

Néanmoins, le rendement thermodynamique théorique du moteur à essence est sensiblement inférieur que celui du moteur Diesel, elle dépasse rarement 30 %. La différence tient essentiellement aux taux de compression : plus le taux de compression est élevé, meilleur est le rendement, car le carburant est brûlé plus complètement.

La consommation de carburant est plus élevée dans les moteurs à allumage commandé, non seulement à cause de la question du rendement déjà évoquée, mais aussi à cause de la valeur énergétique plus faible de l'essence. À puissance égale, un moteur à essence aura un régime de rotation supérieur et, en contrepartie, un couple inférieur à bas régime. Les voitures à essence, même dotées d'un pot catalytique produisent beaucoup plus de CO₂ que les diesels [3].

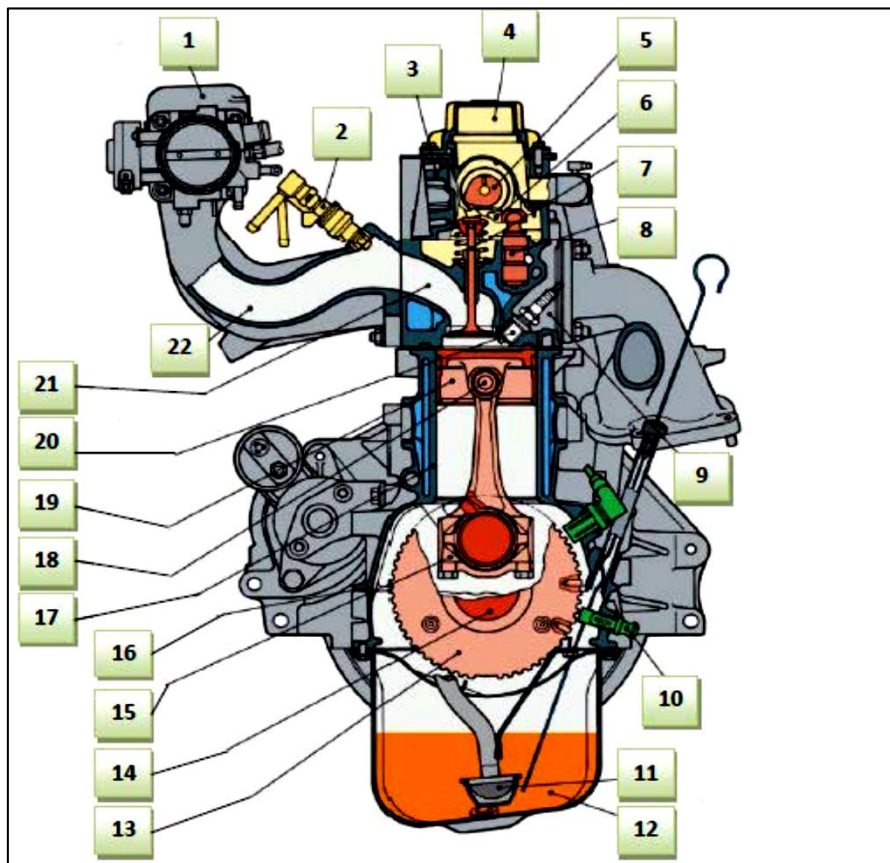
1.3. Historique du moteur à allumage commandé

La réalisation de la fonction de formation du mélange dans les moteurs à allumage commandé, depuis leur invention dans les années 1860 par Otto et Lenoir, a été dominée pendant un siècle par la solution carburée. Un carburateur créait le mélange air-combustible à partir de la dépression créée au col d'un venturi sur la veine d'air où débouchait l'alimentation en combustible. Les inconvénients évidents de cette solution (difficulté de contrôle, éloignement de la chambre, nécessité d'un papillon des gaz) ont fait rêver les concepteurs à la possibilité d'introduire le combustible directement dans la chambre de combustion. Le premier dispositif d'injection fut appliqué par Bosch en 1937 sur des moteurs d'avions puis

d'autres systèmes furent développés par Gutbrod pour des moteurs d'automobiles deux temps en 1952, puis quatre temps notamment sur la Mercedes 300SL en 1956. Entre temps, de nombreuses tentatives sans industrialisation furent menées aussi bien en injection directe qu'indirecte, par les marques Jalbert, Citroën, Junkers, Deckel, Simms et Bendix, Bosch et Scintilla. Mais le surcoût induit par la solution injection n'était compensé par aucun argument valable selon les critères de l'époque. En effet, sans normes antipollution et sans crise pétrolière, les contraintes de prix et de fiabilité l'emportent. Car toute réalisation technologique efficace d'injection d'essence doit tenir compte des facteurs dosage et pulvérisation. En particulier, pour la pulvérisation, les dimensions de l'orifice d'injection doivent être aussi réduites que possible et la pression d'injection élevée. Obtenir cette pression élevée est délicat avec l'essence car ce combustible a une faible viscosité et constitue un très mauvais lubrifiant. Or le principe des pompes usuelles est de refouler avec un piston un certain volume de combustible à travers un clapet maintenu par un ressort exerçant un effort opposé au sens de refoulement et taré à la valeur de pression souhaitée pour l'injection. Ce système n'est efficace que si les fuites entre le piston et la chemise sont faibles, ce qui est obtenu avec des jeux de fonctionnement très faibles. S'il n'y a pas de lubrification, il y a un risque de grippage et de déperdition d'énergie que l'on minimise avec des états de surface impeccables et des matériaux de haute dureté. Ainsi, sauf dans le domaine particulier du moteur de compétition où les reprises rapides et le surplus de puissance donnèrent à l'injection une voie d'épanouissement, le prix et la fiabilité étaient prohibitifs.

L'injection d'essence entra donc dans le domaine public par le haut de gamme, les voitures à hautes performances telles que Mercedes avec les systèmes Bosch en Europe et Corvette avec Rochester aux États-Unis. En parallèle, des systèmes « exotiques » furent brevetés qui parfois donnèrent lieu à de petites productions, comme Puche en Allemagne dans les années 1950, avec le premier système d'injection de pré mélange. Pendant les années 1960, les systèmes d'injection indirecte mécanique commencèrent à s'implanter sur les voitures de série : Kugelfischer équipa les Peugeot 404IE puis 504 ainsi que la Lancia Flavia, les BMW 5201 et les Ford Capri 2600 Sport, tandis que Lucas développait l'injection des Triumph 2000 et Maserati 3500GT [4].

1.4. Structure du moteur



Repère	Nom de l'organe	Repère	Nom de l'organe
1	Boîtier papillon	12	Carter d'huile
2	Injecteur	13	Volant moteur
3	Culasse	14	Vilebrequin
4	Couvre culasse	15	Bielle
5	Arbre à cames	16	Bloc moteur
6	Levier oscillant	17	Chemise
7	Soupape	18	Axe de piston
8	Poussoir hydraulique	19	Piston
9	Chapelle échappement	20	Bougie d'allumage
10	Capteur de régime	21	Chapelle d'admission
11	Tamis à huile	22	Collecteur d'admission

Figure 1.1 : Représentation des éléments principaux constituant un moteur à essence [5]

1.5. Combustible utilisé

Les essences utilisées dans le moteur à allumage commandé par étincelle doivent présenter des propriétés physiques (masse volumique, pression de vapeur) qui permettent leur pulvérisation dans l'air (par injection) avant son introduction dans la chambre de combustion. Le moteur à essence exige que le carburant introduit dans la chambre de combustion ait un pouvoir antidétonant élevé exprimé par l'indice d'octane. Cette caractéristique conditionne certaines particularités du moteur (taux de compression, avance à l'allumage) qui, elles-mêmes, agissent directement sur les performances du moteur (consommation de carburant, puissance spécifique). Des carburants plus simples et plus propres peuvent être utilisés dans des moteurs à allumage commandé comme le gaz naturel véhicule GNV et le gaz de pétrole liquéfié GPL qui sont d'origine pétrolière et les biocarburants issus de la biomasse comme l'éthanol [6].

1.6. Classification des moteurs à allumage commandé

1.6.1. Selon le nombre de temps

➤ Moteurs 4 temps (2 tours/cycle)

Pendant l'admission, le piston descend et permet au mélange d'air et de carburant d'être aspirés dans le cylindre via la soupape d'admission.

Lors de la compression, la soupape d'admission se ferme, le piston remonte, comprimant ainsi le mélange admis.

Au moment de la combustion, le mélange air-carburant est enflammé par une bougie d'allumage, aux environs du deuxième point mort haut (remontée complète du piston). La pression des gaz portés à haute température force le piston à descendre, provoquant une détente des gaz. Ce mouvement est le seul temps moteur du cycle (produisant de l'énergie directement utilisable).

A l'échappement, les gaz brûlés sont évacués via la soupape d'échappement poussée par la remontée du piston [7].

➤ Moteur 2 temps (1 tour/cycle)

On peut fabriquer des moteurs à allumage commandé ou des moteurs d'auto d'inflammation à deux temps mais le rendement du moteur à deux temps soit essence ou diesel est plus faible et la puissance est inférieure à la moitié de celle d'un moteur à quatre temps de taille comparable.

Le cycle d'un moteur deux temps est constitué de deux mouvements linéaires du piston au lieu de quatre lors d'un cycle de Beau de Rochas, bien que les quatre mêmes opérations (admission, compression, combustion/détente et échappement) soient toujours effectuées. Ainsi, on a un cycle moteur par tour au lieu d'un tous les deux tours.

Les deux étapes sont les suivantes :

- Admission/compression
- Combustion-détente/échappement (balayage des gaz)

Lors de la détente, le piston (5) est au point mort haut. La bougie initie la combustion et le piston descend en comprimant en même temps le mélange présent dans le carter, sous le piston. C'est la partie motrice du cycle, le reste du parcours sera dû à l'inertie créée par cette détente. Lors de cette descente du piston, l'entrée (6) du mélange dans le carter se ferme.

A l'échappement, le piston arrivé au point mort bas débouche les lumières d'échappement (2) et d'arrivée de mélange dans le cylindre (3) le mélange pénètre dans le cylindre et chasse les gaz de la combustion (zone 1). Il s'agit de l'étape d'admission - échappement.

Au moment de la compression, le piston remonte et comprime le mélange dans le cylindre. Il rebouche l'échappement (2) et l'entrée de mélange dans le cylindre (3), tout en créant une dépression dans le carter (4) qui va permettre l'admission du mélange air-essence par la lumière d'arrivée (6) dont l'entrée a été libérée par le positionnement du piston proche du point mort haut.

Une fois arrivé à nouveau au point mort haut, le cycle peut recommencer à partir du premier point [7].

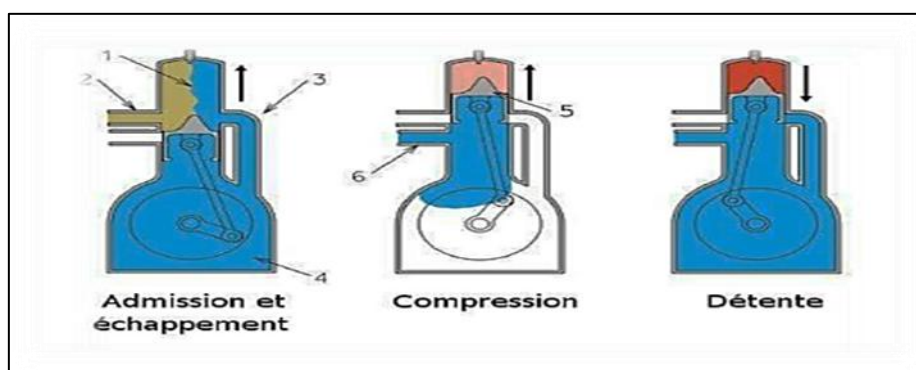


Figure 1.2 : Principe de fonctionnement d'un moteur 2 temps [7]

1.6.2. Selon le type d'injection

Il existe de nombreux types d'injection classés suivant plusieurs catégories. On cite les plus importants.

Pour traiter le mélange d'un moteur à essence en a deux systèmes :

➤ **Par carburation** : le mélange air- essence est traité au carburateur ensuite il est injecté dans le cylindre.

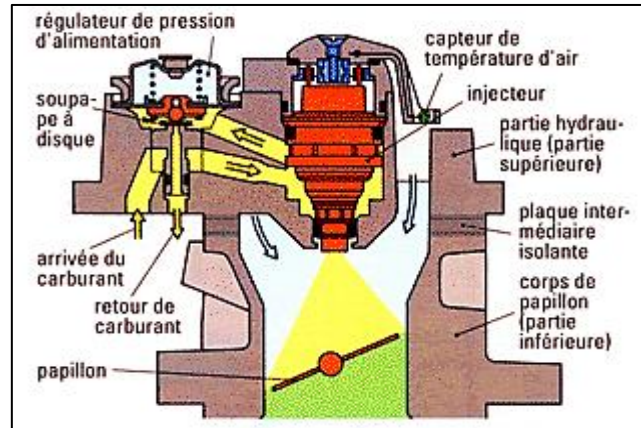
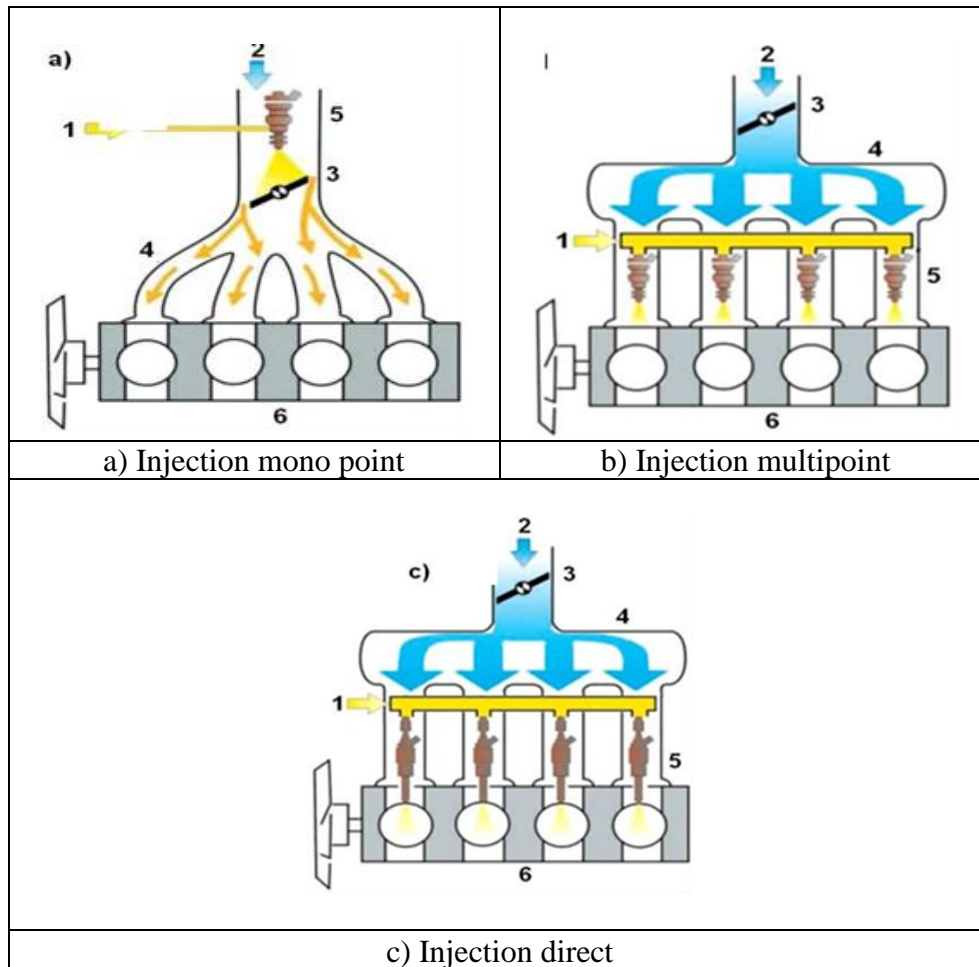


Figure 1.3 : Carburation par carburateur [6]

➤ **Par injection** : on injecte l'essence et on introduit l'air par une tubulure d'admission à forte section. Il existe deux type d'injection soit monopoint ou multipoint et dans ce dernier il y a le multipoint direct et indirect [7].



Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Source de fuel	4	Collecteur
2	Admission d'air	5	Injecteur
3	Papillon	6	MCI

Figure 1.4 : Systèmes d'alimentation dans MCI essence [6]

1.6.3. Selon l'alimentation en air

- Moteurs à aspiration naturelle, dit aspiration atmosphérique.
- Moteurs suralimentés : turbocompresseur, TGV,....

1.6.4. Selon le mode de refroidissement

- Refroidissement par eau
- Refroidissement par air

1.6.5. Selon le mode de lubrification

- Carter au huile ou sec

1.6.6. Selon la caractéristique géométrique

- Nombre de cylindres : monocylindre ou n cylindres.
- Système de distribution : nombre des soupapes, type de l'arbre à came (tête ou latérale)
- Distribution des cylindres : en ligne, V, U, X, opposés... [7].

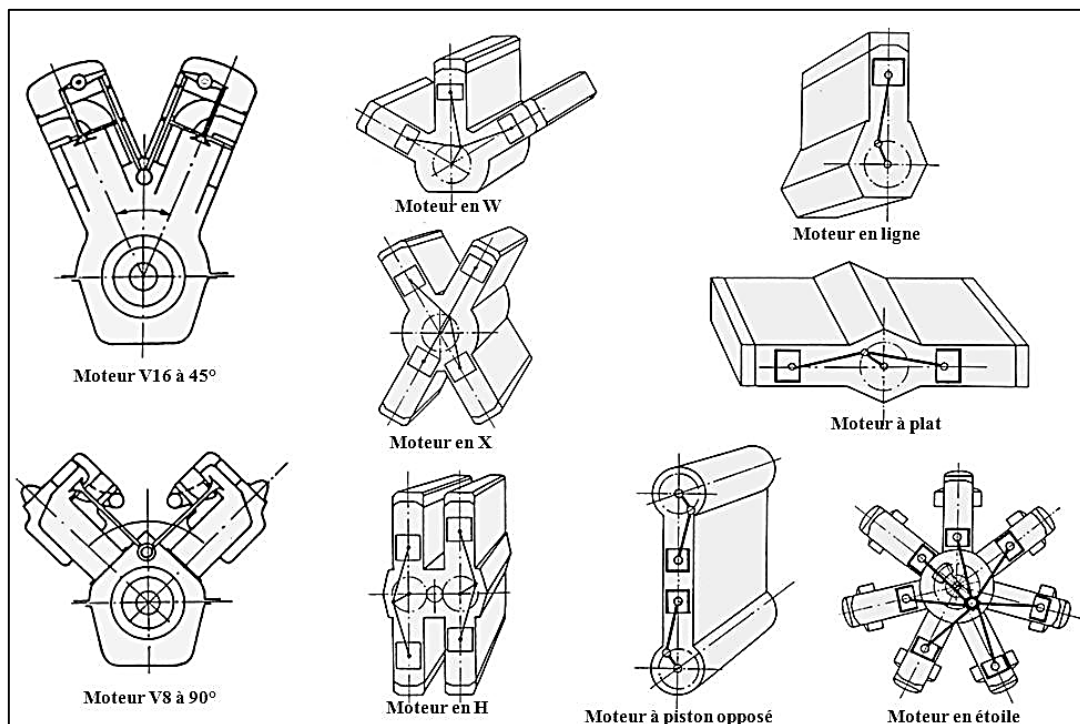


Figure 1.5 : Types de la disposition des cylindres [8]

1.7. Principe de fonctionnement

1.7.1. Cycle 4 temps

La grande majorité des moteurs AC fonctionne selon le cycle à 4 temps, qui dure 2 tours de moteur et dont les phases caractéristique sont les suivantes (figure 1.6).

➤ Temps 1 : Admission

Elle se produit alors que le piston descend du PMH au PMB, créant ainsi une dépression dans le cylindre et l'aspiration du mélange carburé ou de l'air dans le cas particulier des moteurs à injection directe. Les vitesses des gaz sont plutôt élevées (la vitesse du son peut être atteinte au passage des soupapes) et l'inertie des masses gazeuses ne peut pas être négligée. De ce fait

et aussi parce qu'il y a des pertes de charge sur le circuit d'admission (papillon, soupapes...), le remplissage des cylindres ne se réalise pas complètement : le remplissage naturel d'un moteur est inférieur à l'unité. Pour améliorer ce taux, les inerties des masses gazeuses sont prises en compte en avançant l'ouverture de la soupape d'admission avant le PMH (AOA = avance ouverture admission). Ces décalages sont de quelques degrés et leur importance dépend de la gamme du régime de fonctionnement du moteur : ils sont plus élevés pour les hauts régimes.

La tendance moderne est de promouvoir des distributions variables en calage et en ouverture, actionnées au moyen de commandes magnétiques ou hydrauliques, de manière à pouvoir bénéficier d'un remplissage optimal sur toute la gamme des régimes. De tels systèmes existent déjà en série et sont présentés comme une des clés ouvrant la voie vers les moteurs à faible consommation et pollution zéro.

Un calage d'admission bien adapté peut entraîner une légère suralimentation du moteur en un point de régime tandis que l'accroissement du nombre de soupapes par cylindre améliore le remplissage à tout régime. La suralimentation par compresseur permet des accroissements plus substantiels du remplissage avec des pressions d'admission largement supérieures à l'atmosphère.

Quelle que soit la pression à l'entrée du circuit d'admission, la quantité de mélange admis dépend de l'ouverture du papillon, qui détermine aussi la pression régnant en amont des soupapes. Dans un moteur AC la charge du moteur est donc en rapport (fortement non linéaire) avec la pression d'admission, appelée habituellement « dépression admission » puisqu'elle est le plus souvent inférieure à la pression atmosphérique [2].

➤ **Temps 2 : Compression-allumage**

Les soupapes étant fermées, le piston remonte vers le PMH en comprimant la masse gazeuse enfermée. La pression dans le cylindre croît et, sans combustion, elle attendrait à pleine ouverture 10 à 20 bars au PMH, selon le taux de compression. L'allumage intervient quelques instants (avance à l'allumage) avant le PMH (10 à 20 °V), afin de prendre en compte le délai nécessaire au développement de la combustion.

Les moteurs à injection directe réalisent leurs charges partielles en modulant la quantité de carburant injectée, ce qui signifie que dans la chambre de combustion la répartition de la charge est hétérogène pour que localement une faible quantité de carburant puisse être associée à une faible part de l'air et que le mélange soit combustible. Le dessin et l'aérodynamique interne des chambres de combustion déterminent la formation du mélange et sa localisation, qui doit être impérativement proche d'une bougie d'allumage. Les pleines

charges sont par contre obtenues en revenant à une charge homogène remplissant le volume entier du cylindre [2].

➤ Temps 3 : Combustion-détente

La combustion se développe et la pression croît rapidement pour arriver normalement à son maximum une dizaine de degrés après le PMH, atteignant des valeurs supérieures à 60 bar à pleine charge.

Les gaz sont à ce moment très chauds (2 000 à 3 000 K) et les transferts thermiques vers les parois sont intenses. Le piston descend ensuite vers le PMB, la pression et la température des gaz décroissent en même temps que du travail est fourni au piston. Le taux de détente est déterminant pour le rendement et certains concepts ont été imaginés pour profiter au mieux de cette phase (cycle de Miller) [2].

➤ Temps 4 : Échappement

La soupape d'échappement s'ouvre lorsque le piston atteint le PMB, les gaz de combustion s'évacuent, au début sous l'effet de leur propre pression, puis sous la poussée du piston qui remonte. Pour tenir compte des inerties des gaz, l'échappement peut s'ouvrir quelque peu avant le PMB (AOE = avance ouverture échappement), et se fermer après le PMH (RFE = retard fermeture échappement). Il peut se trouver ainsi quelques instants pendant lesquels les soupapes d'admission et d'échappement sont ouvertes simultanément : c'est le croisement de soupapes. Il est d'autant plus important que le moteur doit être performant à haut régime [2].

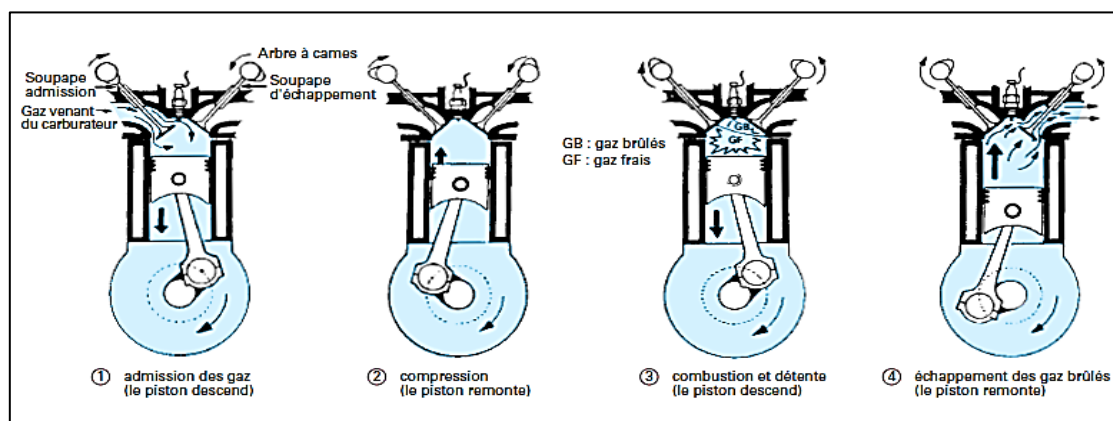


Figure 1.6 : Cycle à 4 temps [2]

1.7.2. Cycle à 2 temps

Le cycle 2 temps ne dure qu'un tour moteur et ses phases de fonctionnement se distinguent par la présence ou non d'échanges gazeux avec l'extérieur.

➤ Temps 1 : Échappement-admission

C'est la phase clé pour un moteur 2 temps ; les ouvertures d'admission et d'échappement restent simultanément ouvertes pendant la plus grande partie de cette période qui voit le piston descendre du PMH vers le PMB, ce qui implique que l'admission des gaz frais et l'expulsion des gaz brûlés s'effectuent en même temps : c'est la phase dite de balayage. Les gaz de combustion s'échappent sous leur propre pression et les gaz d'alimentation doivent être comprimés pour pouvoir pénétrer dans le cylindre. Cette légère compression, quelques dizaines de millibars, peut être obtenue soit en profitant de la course vers le bas du piston et en comprimant les gaz dans le carter, soit en utilisant un compresseur. L'alimentation en carburant peut s'effectuer en amont du cylindre, par carburation ou injection, pour permettre au mélange de se réaliser au préalable avec cependant le risque qu'une partie soit court-circuitée à l'échappement. Cet inconvénient peut être évité par une injection directe dans le cylindre pendant la compression, solution plus coûteuse mais qui place alors le moteur 2 temps au même niveau que le 4 temps pour les consommations et la pollution.

La phase de balayage caractérise le moteur 2 temps dont elle détermine le bon fonctionnement; elle en a fait le succès par la simplicité de construction qu'elle permet, mais aussi la mauvaise réputation sur les plans rendement et pollution par les pertes à l'échappement qui en ont été longtemps la conséquence.

➤ Temps 2 : Compression-allumage-détente

Les ouvertures d'admission et d'échappement sont fermées; si l'alimentation n'est pas effectuée en amont du cylindre, le carburant peut être alors injecté lorsque le piston remonte. La fin de compression et la combustion se déroulent d'une manière identique à celles du moteur 4 temps. Le travail est récupéré pendant la détente qui se termine dès l'ouverture de l'échappement. Souvent, pour un moteur 2 temps, le taux de compression est évalué en partant d'une cylindrée comprise entre le PMH et l'ouverture de l'échappement : c'est donc un taux de détente [2].

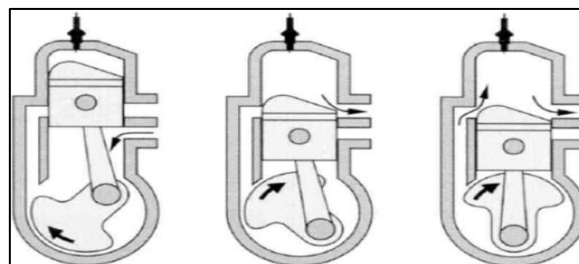


Figure 1.7 : Cycle à 2 temps [6]

1.8. Chronologie de combustion

1.8.1. Diagramme théorique (diagramme idéal)

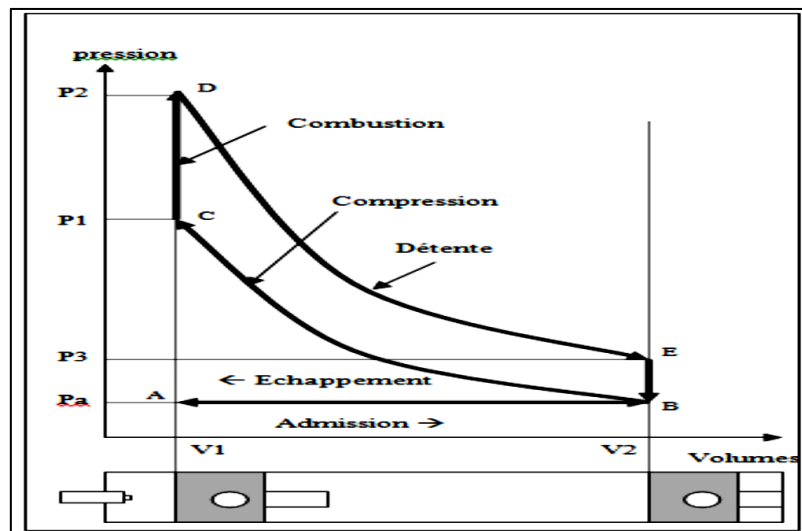


Figure 1.8 : Diagramme de beau de rochas [10]

Alphonse de Beau de Rochas ingénieur français (1815-1908) alors que Lenoir avait construit le premier moteur à explosion à gaz (1859) il établit le cycle thermodynamique idéal des moteurs à explosion à quatre temps (1862) à allumage extérieur. Ses idées furent appliquées et développés par Otto (1876) une querelle d'antériorité eut d'ailleurs lieu. L'évolution des pressions dans la chambre de combustion en fonction du volume du cycle " Beau de Rochas " Se représente dans un diagramme (p, v). Variations de volume en abscisses (horizontale), de pression en ordonnées (verticale), avances et retards, points morts. Notion de travail (travail moteur): $W = F \cdot d$ (aire totale du diagramme moins aire représentée par les temps résistants) [9].

- **A-B admission isobare** : Aspiration du gaz à la pression atmosphérique dans le cylindre le long de la droite isobare AB ($P_A = P_B = P_a$).
- **B-C compression adiabatique** : Compression adiabatique BC jusqu'au volume minimal V_1 , la pression devenant P_1 .
- **C-D combustion isochore** : Combustion instantanée du gaz à volume constant le long de la droite isochore CD avec une forte élévation de température à T_2 et de la pression à P_2 .
- **D-E détente adiabatique** : Détente du gaz chaud le long de l'adiabatique DE qui ramène le volume à V_2 , mais à une pression P_3 supérieure à celle de l'atmosphère.

- **E-B détente isochore** : Détente théorique des gaz dans le cylindre donc la pression tombe instantanément à la pression atmosphérique le long de l'isochore EB, la température redescend.

- **B-A échappement isobare** : Le cycle Beau de Rochas a été conçu pour un moteur tel que l'entrée et la sortie des gaz se fait par des orifices à soupapes placés à l'extrémité fermée d'un cylindre dont l'autre extrémité est constituée par la tête du piston. Toutefois, il est appliqué dans d'autres configurations de moteur, par exemple le moteur rotatif. Echappement des gaz brûlés en décrivant l'isobare BA. Retour au point de départ A [9].

1.8.2. Cycle réel

En pratique, le diagramme réel d'un moteur à 4 temps est nettement différent du diagramme théorique, du fait des facteurs suivants :

- Temps mis par les soupapes à s'ouvrir.
- Délai d'inflammation du mélange.
- Inertie des gaz.
- Echanges de chaleur avec l'extérieur [6].

➤ Diagramme réel avant réglage (Cycle OTTO)

La première réalisation pratique d'un moteur à piston fonctionnant suivant le cycle à 4 temps a été réussie par OTTO en 1876. Mais le graphique des pressions qu'il releva sur le moteur monocylindrique à piston tournant à 180 tr/min s'écartait assez nettement du cycle théorique de Beau de Rochas; le rendement pratique était inférieur au rendement théorique [6].

- **Admission (Courbe AB)**

La pression p est supérieure à P_a du fait de l'accumulation des gaz dans la tubulure d'admission, puis le recule rapide du piston crée une baisse de pression dans la deuxième partie de AB.

$$P_B < P_a \text{ au point B}$$

- **Compression (Courbe BC)**

La courbe de compression se trouve en dessous de la courbe théorique, puisque son point de départ B est en dessous de P_a . Elle est également modifiée par les échanges de chaleur.

- **Combustion -détente (Courbe CDE)**

Pendant le temps que dure la combustion, le piston recule. La verticale va s'abaisser en une courbe dont la pression maximale sera plus faible.

De plus, pendant la détente, les gaz chauds perdent une partie de leur chaleur.

La pression décroît plus rapidement que dans le moteur théorique

- **Echappement (Courbe EA)**

La chute de pression se fait progressivement pour n'approcher la pression à l'admission qu'en fin de course piston. Pendant toute la course il règne une contre-pression due à la poussée rapide du piston.

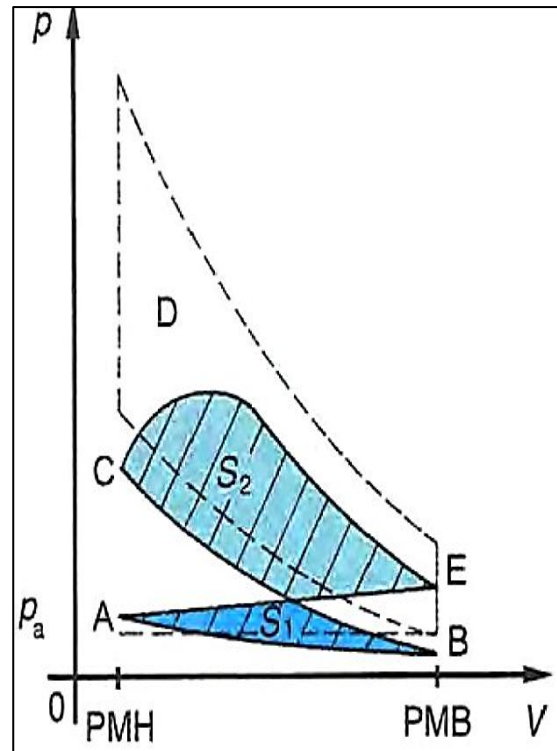


Figure 1.9 : Diagramme réel avant réglage [6]

Dans le diagramme réel on voit que les temps utiles perdent une partie de leur surface. Les temps résistant augmentent [6].

$$S_2 - S_1 = \text{Travail utile insuffisant}$$

- ✚ **Défauts constatés**

- Remplissage insuffisant,
- Compression insuffisante,
- Pression d'explosion trop faible,
- Echappement incomplet (contre-pression).

- ✚ **Cause**

- À l'admission, la pression est inférieure à l'atmosphérique (dans le cas d'un moteur non suralimenté) du fait de l'aspiration du piston et de l'inertie du gaz non nulle,
 - Les caractéristiques du fluide-moteur (viscosité, densité, etc.) comptées constantes dans le cycle thermodynamique varient avec la température dans le cycle réel,
 - Les deux temps de compression et détente ne sont pas adiabatiques, mais polytropiques à cause des échanges de chaleur ayant lieu au cours de ces deux temps entre le fluide-moteur et les parois du cylindre,

- Le fonctionnement du moteur nécessite l'évacuation des produits de combustion et l'introduction périodique, au début de chaque cycle, de la charge fraîche. Le remplissage du cylindre du moteur dépend considérablement de son nettoyage,
- À la compression, la pression finale est inférieure à la théorique du fait du remplissage moindre et des échanges de chaleur entre le fluide-moteur et les parois du cylindre,
- La combustion qui n'est pas instantanée donc non isochore, et ni isobare donne une pression maximum inférieure,
- À l'échappement, du fait de la difficulté de vidange, la pression est toujours supérieure à l'atmosphérique [6].

➤ **Diagramme réel après réglage**

Il est nécessaire, pour remédier à ces inconvénients d'augmenter le temps d'ouverture des soupapes afin d'éviter le freinage des gaz. De même, le point d'allumage devra être avancé pour tenir compte du délai d'inflammation [6].

- **Avance à l'ouverture de l'admission (AOA)**

Cette avance évite l'arrêt de la veine gazeuse devant une soupape fermée et améliore ainsi le taux de remplissage.

- **Retard à la fermeture de l'admission (RFA)**

On profite de l'inertie des gaz pour augmenter le remplissage et ne refermer la soupape qu'après le PMB. La diminution du temps de compression est compensée par une pression de début de décompression plus élevée.

- **Avance à l'allumage (AA)**

Elle permet de répartir l'explosion de part et d'autre du PMH. La pression maximale se trouve ainsi augmentée.

- **Avance à l'ouverture de l'échappement (AOE)**

Elle permet d'avancer la chute de pression des gaz brûlés afin de limiter leur tendance à la contre-pression (échappement libre).

- **Retard à la fermeture de l'échappement (RFE)**

On profite de l'inertie des gaz pour faciliter leur évacuation complète. La soupape d'échappement se ferme donc au début du temps admission.

D'une manière analogue, on réalise dans le moteur une avance à allumage (pour les moteurs à allumage commandé) ou une avance à l'injection (pour les moteurs Diesel), où l'amorçage de l'étincelle (moteur à essence) ou l'injection du carburant (moteur Diesel) se

fait avant que le piston atteigne le point mort haut PMH, de manière à assurer une combustion complète et obtenir une élévation de pression aussi grande que possible.

L'angle de vilebrequin situé entre l'avance ouverture admission (AOA) et retard fermeture échappement (RFE) est appelé « croisement de soupapes », voir la figure (1.10) [6].

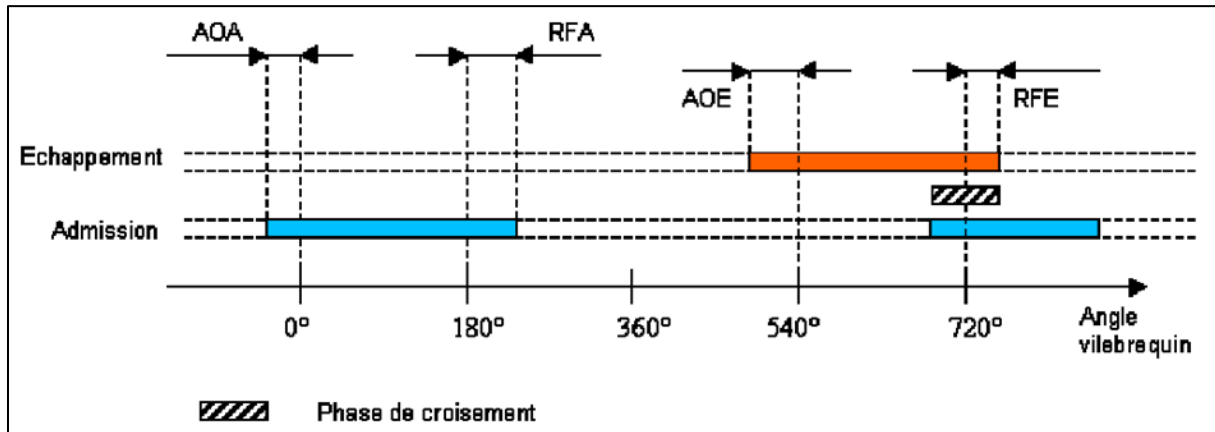


Figure 1.10 : Schéma représentant la distribution des soupapes [6]

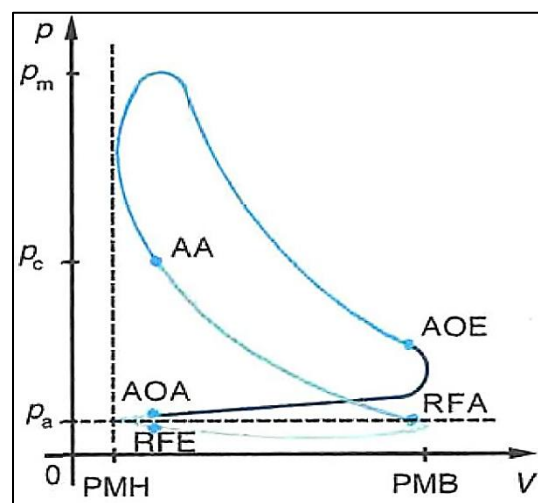


Figure 1.11 : Diagramme réel après réglage [6]

Les valeurs de ces avances ou retards sont habituellement exprimées en degrés d'angle définissant la position de l'arbre au moment où a lieu l'opération considérée; elles varient d'ailleurs notablement d'un constructeur à l'autre. À titre exemple, citons un moteur ayant 20° d'avance à l'ouverture admission, 50° de retard à la fermeture admission, 50° d'avance à l'ouverture échappement et 10° de retard à la fermeture échappement. Dans cet exemple, la soupape d'admission reste donc ouverte pendant que l'arbre tourne de $20 + 180 + 50 = 250^\circ$, tandis que la soupape d'échappement reste ouverte

pendant que l'arbre accomplit une rotation de $50 + 180 + 10 = 240^\circ$ [6].

Les différents avances et retards à l'ouverture et à la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement pour un moteur Diesel sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 1.1 : Avances et retards à l'ouverture et à la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement [6]

Avances et retards [deg]	Moteur essence	Moteur Diesel	Moteur Diesel TDI
AOA	5 à 20	5 à 15	60 à 75
AOE	30 à 40	35 à 50	35 à 50
RFA	30 à 40	30 à 45	30 à 45
RFE	5 à 20	5 à 15	60 à 75

➤ **Le diagramme de pression en fonction de l'angle de vilebrequin**

Pour déterminer l'évolution de la quantité de chaleur d'un moteur, on représente la variation de pression en fonction de l'angle de vilebrequin

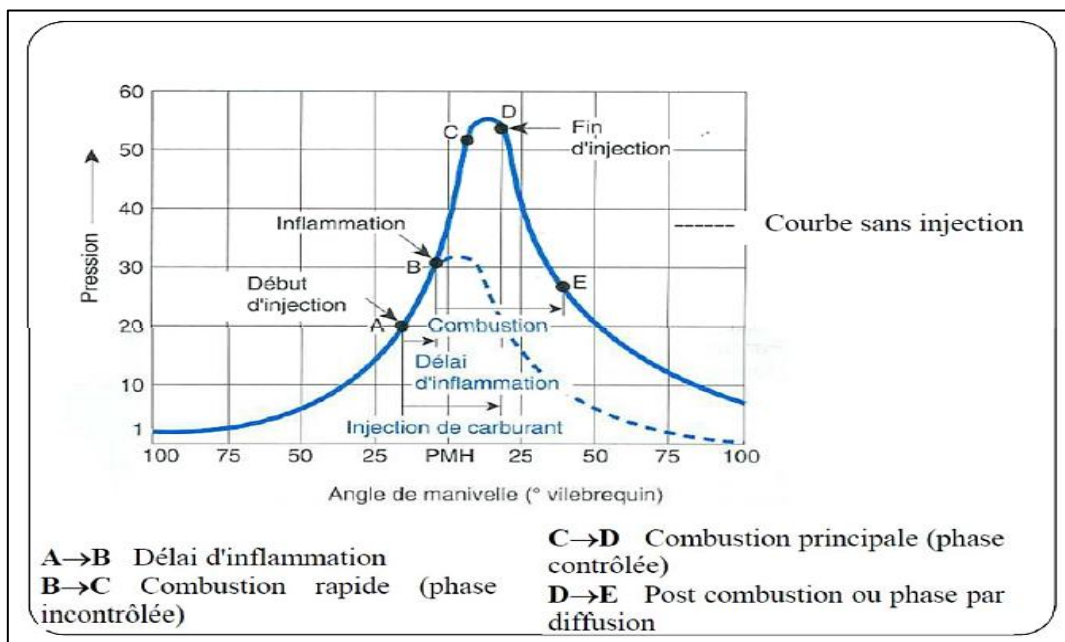


Figure 1.12 : Diagramme de pression en fonction de l'angle de vilebrequin [11]

La flamme se propage à partir des électrodes de la bougie aux extrémités de la chambre de combustion. Dans ce diagramme il y a des phases, la première phase c'est le temps de formation du noyau initial et la propagation de la flamme après propagation dans la chambre qui s'appelle délai d'inflammation.

Cette combustion libère une chaleur qui augmente la température et la pression. Cette augmentation crée une force de poussée de piston du PMH vers PMB. L'analyse de la variation de pression permet d'étudier les caractéristiques de la combustion.

On doit bien déterminer l'instant de l'allumage pour obtenir une pression maximale et une avance de l'allumage pour une bonne précision.

La combustion commence à se développer proportionnellement avec la pression et la température, à l'instant précis de 5% de la masse du mélange brûlé. Cette phase existe entre l'instant d'injection et le début de combustion.

La deuxième phase quand le front de flamme arrive aux parois de la chambre de combustion, c'est presque 90% de la masse du mélange brûlé et cette phase domine le pic de pression et inclue dans le domaine de la durée de combustion.

La troisième phase le mélange complètement brûlé, l'augmentation de chaleur crée une force pour faire descendre le piston vers le PMB et donc crée une chute pression [11].

1.9. Systèmes d'alimentation

1.9.1. Principe de fonctionnement

L'injection d'essence consiste à introduire l'air par une tubulure d'admission de forte section et à injecter le carburant en amont de la soupape d'admission (injection indirecte) ou directement dans le cylindre (injection directe) avec des injecteurs. Afin de réaliser ses fonctions, le système d'alimentation (air et carburant) peut être décomposé en deux parties principales schématisées sur la figure [6] :

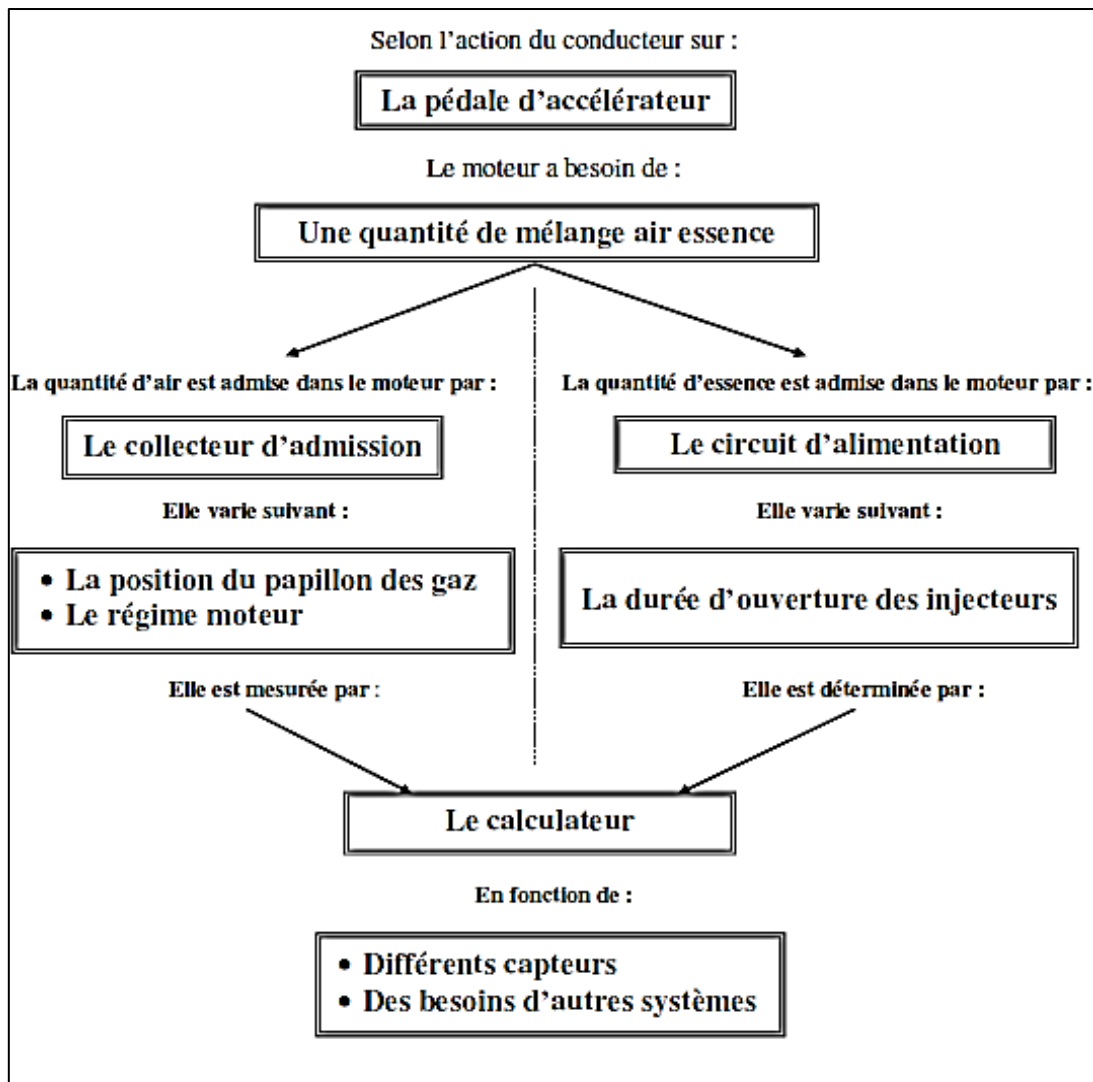


Figure 1.13 : Processus de formation du mélange dans les moteurs à essence [6]

1.9.2. Alimentation en air

Un conduit amène l'air extérieur à un élément filtrant, un autre conduit éventuellement équipé d'un débitmètre amène cet air au boîtier papillon dont l'ouverture est réalisée au moyen d'un actionneur électrique, l'air est ensuite amené au moteur par l'intermédiaire d'un répartiteur qui joue le rôle de volume de tranquillisation appelé plénum et dont le volume est de l'ordre de deux à trois fois celui de la cylindrée du moteur. Le circuit d'admission comprend également la communication avec le circuit de réaspiration des vapeurs de carburant issues du réservoir et l'arrivée du circuit de recirculation des gaz d'échappement. On pourra également trouver des artifices de pilotage de la caractéristique acoustique à des fins de contrôle du niveau sonore ou d'adaptation de la loi de remplissage du moteur. Ce circuit supporte les capteurs de débit et de température d'air, de pression dans le collecteur, le boîtier papillon

avec son actionneur, son capteur de position angulaire et, éventuellement, une résistance de réchauffage pour éviter la formation de givre [12].

1.9.3. Alimentation en carburant

Depuis le premier moteur à essence à 4 temps de Beau de Rochas en 1876, l'injection de carburant dans le domaine automobile a évolué suivant deux axes principaux que sont la commande et le lieu de l'injection :

- Le carburateur (1893) ;
- L'injection mécanique indirecte essence (1930) ;
- L'injection mécanique directe essence (1950) ;
- L'injection électronique indirecte essence (1967) ;
- L'injection électronique directe essence (IDE, 1997) [13].

Ainsi, l'injection peut être réalisée soit dans la tubulure d'admission des gaz frais, c'est l'injection dite indirecte, soit dans la chambre de combustion, l'injection devient alors directe. Les évolutions des moteurs à essence à allumage commandé (en opposition aux moteurs Diesel à allumage par compression) se font en particulier au travers de la modification ou de l'introduction de nouvelles stratégies d'injection de carburant. Ces dernières sont notamment rendues possibles par le développement de l'électronique embarquée et des performances des actionneurs utilisés dans les systèmes moteurs (injecteurs, régulateurs, vannes,...) [13].

➤ Par carburation

La carburation est l'ensemble des opérations réalisant le mélange intime du carburant avec l'air dans des proportions précises afin d'obtenir une combustion rapide et complète.

Pour réaliser la carburation, il est nécessaire d'effectuer des opérations suivantes : dosage, vaporisation et homogénéité.

Le mélange air-essence est obtenu dans le carburateur puis introduit dans le cylindre de moteur [18].

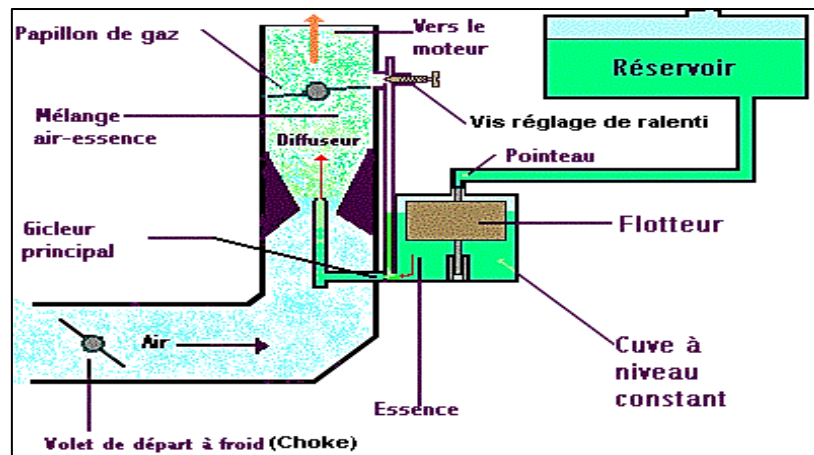


Figure 1.14 : Système d'alimentation en carburant [14]

➤ Par injection

• Injection indirecte

L'alimentation par injection indirecte est réalisée en introduisant le carburant en jet liquide sous pression modérée (2 à 5 bar) dans la tubulure d'admission. L'injection peut être mono point si elle se produit très en amont des cylindres ou multipoint lorsqu'il existe un injecteur par cylindre, placé très près de la chapelle d'admission.

Parmi les dispositifs les plus utilisés se distinguent :

- l'injection mécanique : Souvent continue, avec le débit de carburant contrôlé par un piston doseur.
- l'injection électronique : Les injecteurs sont électromagnétiques avec ouverture commandée par impulsions électriques

Dans tous les cas le système comporte une pompe électrique de mise en pression, un dispositif pour évaluer le débit d'air (plateau mobile, fil chaud, courbes programmée, etc.) et un calculateur électronique gérant les informations issues des différents capteurs (température d'admission, pression, etc.) et pilotant l'injection. Les fonctionnements particuliers (démarrage, transitoires, pleine charge, etc.) sont pris en compte par des corrections programmées électroniquement [15].

La pression régnant dans la tubulure d'admission est mesurée par un capteur de pression absolue placé sur la tubulure d'admission, qui permet d'adapter le débit injecté aux différents états de charge du moteur et aux différences de pression atmosphérique. Le calculateur reçoit des informations sous forme de signaux électriques sur : la pression tubulure et la température de l'air, la température de l'eau, le déclenchement de l'allumage,

la vitesse d'ouverture du papillon, la vitesse de rotation du moteur, la teneur en oxygène de la sonde « lambda ».

Il transforme ces informations en une tension de commande des injecteurs électromagnétiques, le début, la durée et la fin de l'injection étant fonction des paramètres d'entrée [16].

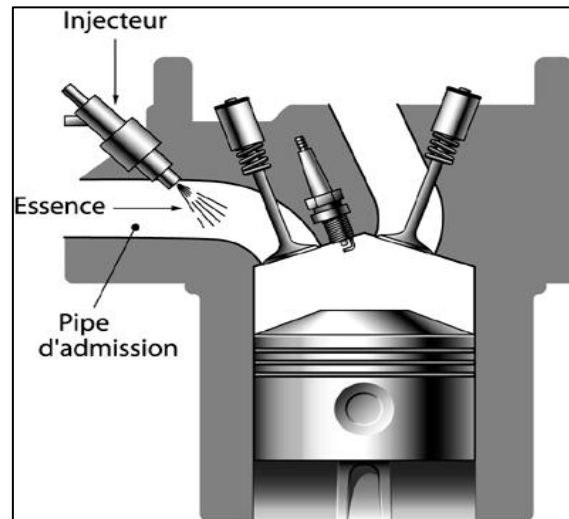


Figure 1.15 : Architecture d'un moteur à injection indirecte [13]

- **Injection directe**

Comme son nom l'indique, l'injection directe du carburant signifie que le carburant est injecté directement dans la chambre de combustion (figure 1.16). Les gaz frais et le carburant pénètrent donc séparément dans la chambre de combustion au sein de laquelle le mélange sera effectué au cours du cycle moteur. Plusieurs motivations sont à la source du développement de ce concept.

L'injection et la vaporisation du carburant dans la chambre de combustion induit une réduction de la température de la charge gazeuse. Ce refroidissement s'accompagne d'une élévation de la densité et il est donc possible d'introduire d'avantage de charge et d'obtenir plus de couple (donc de puissance). De plus, il est aussi possible d'augmenter le taux de compression du mélange qui est limité par l'auto-inflammation du mélange (cliquetis, knocking), néfaste au rendement et à la durée de vie des éléments mécaniques du moteur. Ici, le mélange étant "refroidi", il est possible d'atteindre des pressions plus élevées, la limite de pression de cliquetis étant repoussée [13].

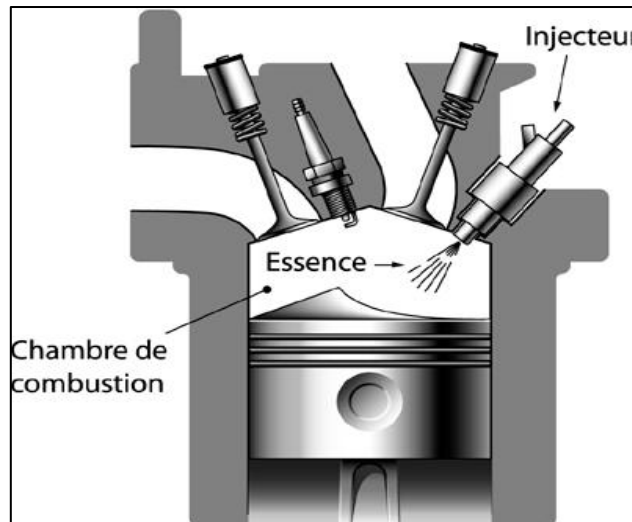


Figure 1.16 : Architecture d'un moteur à injection directe essence [13]

- **Mono point**

L'injection mono point est une injection commandée électro magnétiquement pour l'ouverture de son aiguille. Il n'y a qu'un seul injecteur qui prend place dans le boîtier papillon à la place du carburateur. Ce système d'injection est assez précis mais trop éloigné du cylindre, il tend donc à disparaître. Le procédé le plus usité actuellement est l'injection dite « électronique », pour laquelle des injecteurs à soupape électromagnétique sont soumis à une pression de carburant constante, leur ouverture étant commandée par des impulsions électriques (Bosch Mono-Jetronic et L - Jetronic par exemple). Dans tous les cas, le système comporte une pompe électrique de mise en pression, un dispositif pour évaluer le débit d'air (plateau mobile, fil chaud, courbes programmées...), et un calculateur électronique gérant les informations issues des différents capteurs (température d'admission, pression...) et pilotant l'injection [17].

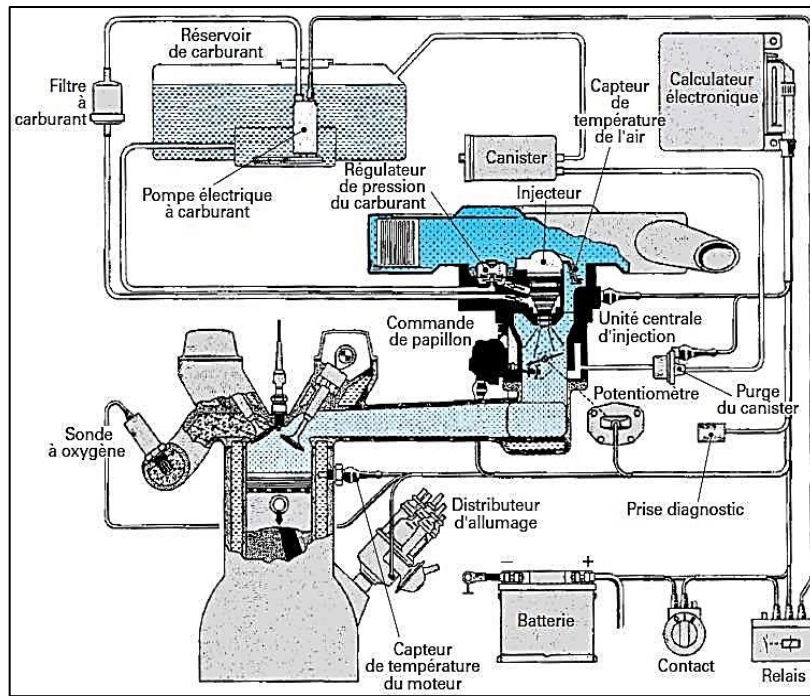


Figure 1.17 : Circuit d'injection monopoint (Bosch Mono-Jetronic) [2]

- **Multipoint**

L'injection multipoints est une injection où il y a un injecteur par cylindre, ils sont commandé soit électroniquement, soit mécaniquement. L'injecteur se situe en amont de la soupape d'admission [17].

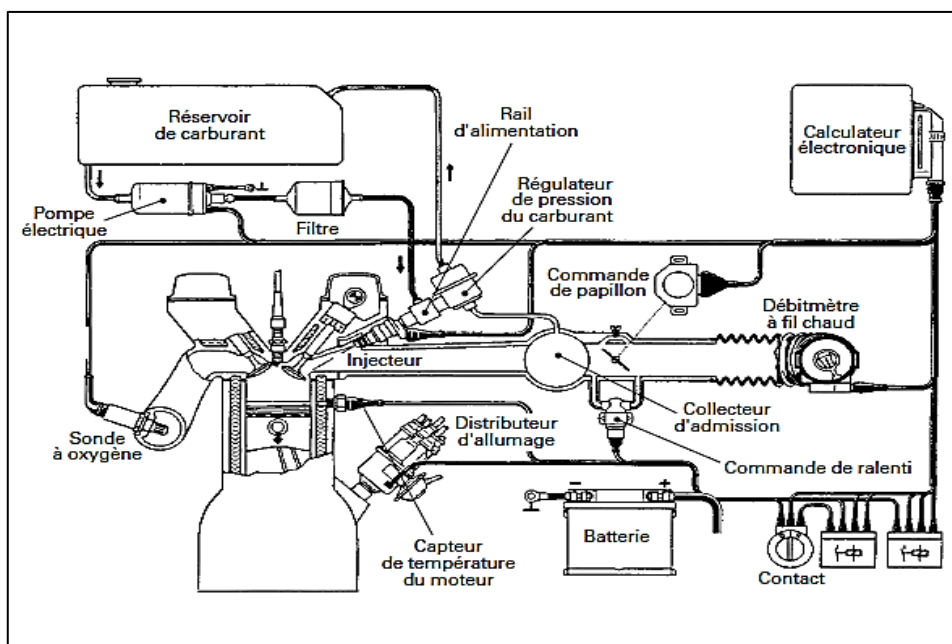


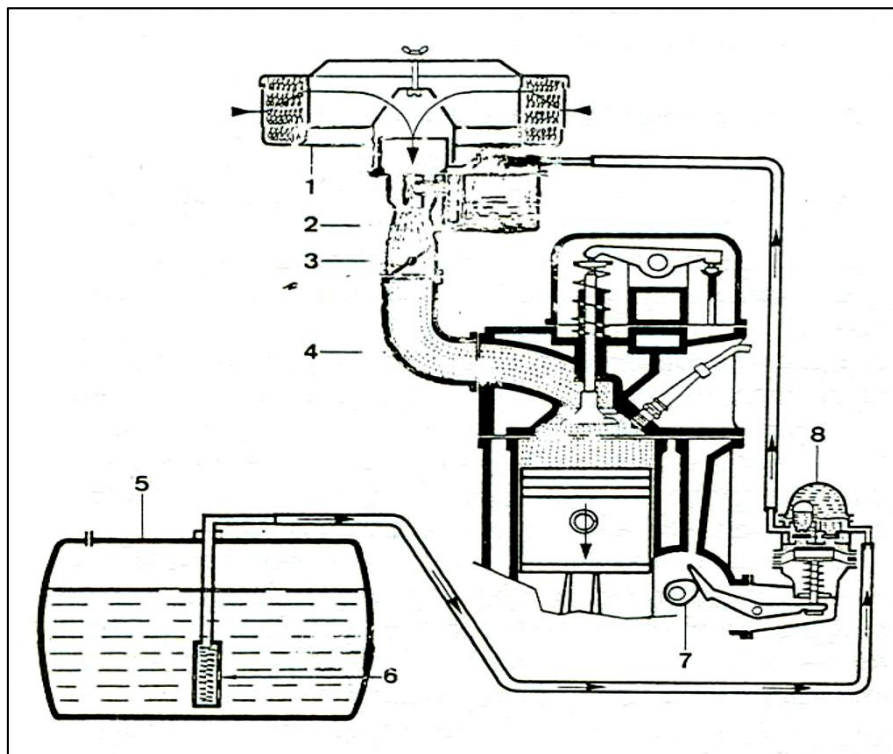
Figure 1.18 : Circuit d'injection multipoint (Bosch LH-Jetronic) [2]

1.10. Constitution de système d'alimentation en carburant

1.10.1. Circuit complet

Le circuit complet d'un système d'alimentation en carburant comprend :

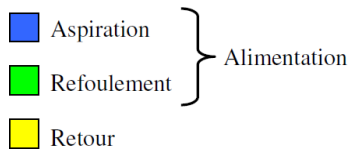
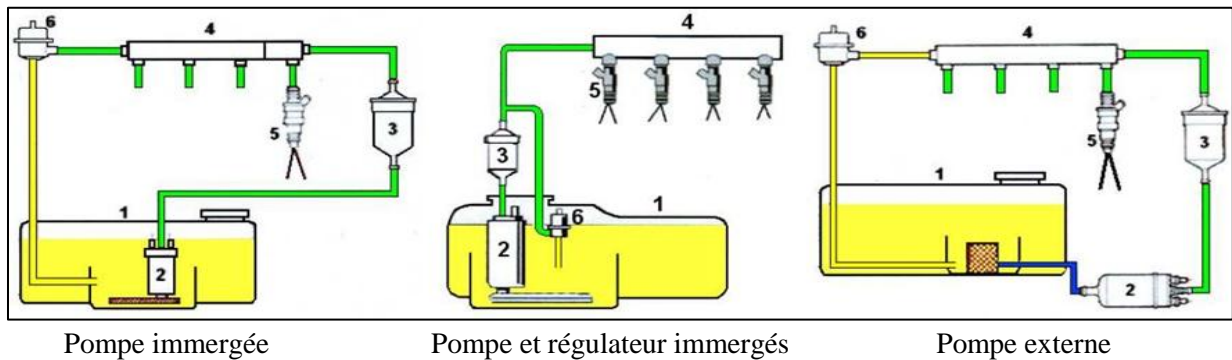
- le réservoir : pour contenir un volume d'essence.
- la pompe à essence : aspire l'essence dans le réservoir et remplit la cuve du carburateur.
- le carburateur : réalise le mélange air-essence.
- le filtre à air : assure l'alimentation du carburateur en air propre [18].



Repère	Nom de l'organe
1	Filtre à air
2	Carburateur
3	Papillon des gaz
4	Collecteur d'admission
5	Réservoir de carburant
6	Filtre à carburant
7	Excentrique sur arbre à cames
8	Pompe mécanique d'alimentation en carburant

Figure 1.19 : Système d'alimentation d'un moteur [18]

1.10.2. Différents montages



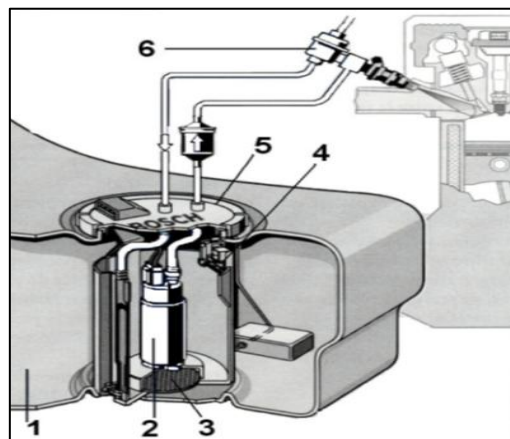
Repère	Désignation
1	Réservoir
2	Pompe de gavage
3	Filtre à carburant
4	Rampe d'alimentation
5	Injecteurs
6	Régulateur de pression

Figure 1.20 : Différents montages d'injection [19]

1.10.3. Éléments constitutifs

➤ Pompe de gavage

Elle fournit un débit constant de carburant au circuit d'alimentation [19].



Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Réservoir	4	Capteur de niveau
2	Pompe de gavage	5	Puits de jauge
3	Crépine	6	Régulateur de pression

Figure 1.21 : Pompe immergée [19]

➤ Filtre à carburant

Son rôle est d'assurer au système d'injection, un carburant exempt de toutes impuretés pouvant endommager le système.

Il est constitué d'un filtre en papier, dont le seuil de filtration est compris entre 5 et 10 microns et d'un tamis qui empêche la circulation des débris éventuels pouvant provenir d'une déchirure du filtre, c'est pourquoi il faut impérativement respecter son sens de montage lors d'un remplacement [19].

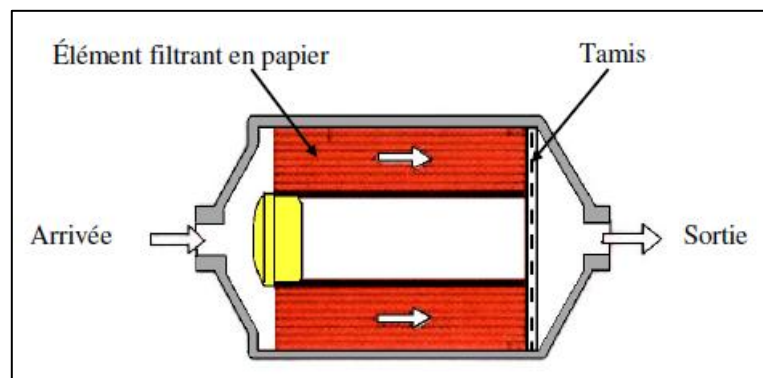
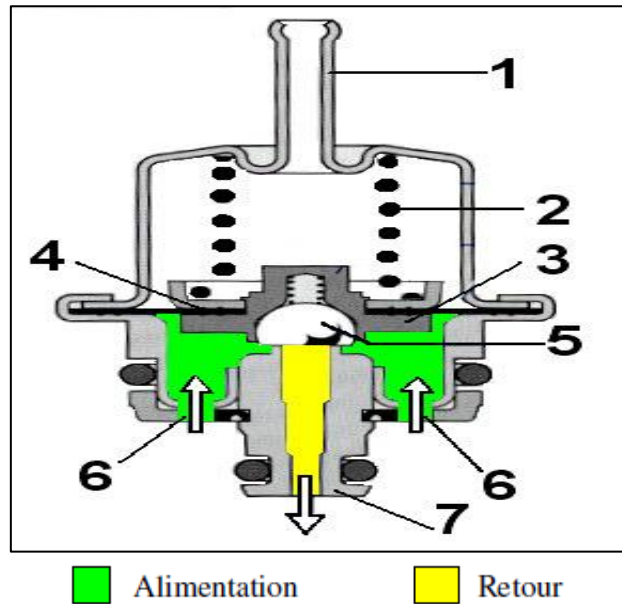


Figure 1.22 : Filtre à carburant [19]

➤ Régulateur de pression

Il a pour fonctions de maintenir constant la pression du circuit d'alimentation et de permettre le retour de l'excédent de carburant [19].



Repère	Nom de l'organe
1	Raccord collecteur d'admission
2	Ressort
3	Porte clapet
4	Membrane
5	Clapet
6	Arrivée de carburant
7	Sortie carburant (retour)

Figure 1.23 : Régulateur de pression [19]

➤ Injecteurs

- Les injecteurs pulvérisent le carburant
- Ils sont commandés par le calculateur qui décide de leur mise à la masse
- Lorsqu'il y a circulation de courant dans l'enroulement magnétique, il se crée un champ magnétique qui attire le noyau magnétique. Celui-ci étant relié à l'aiguille, elle se soulève et autorise la sortie du carburant.
 - Dès la fin de l'excitation, le ressort de rappel repousse et maintient l'aiguille sur son siège. Il n'y a plus d'injection [19].

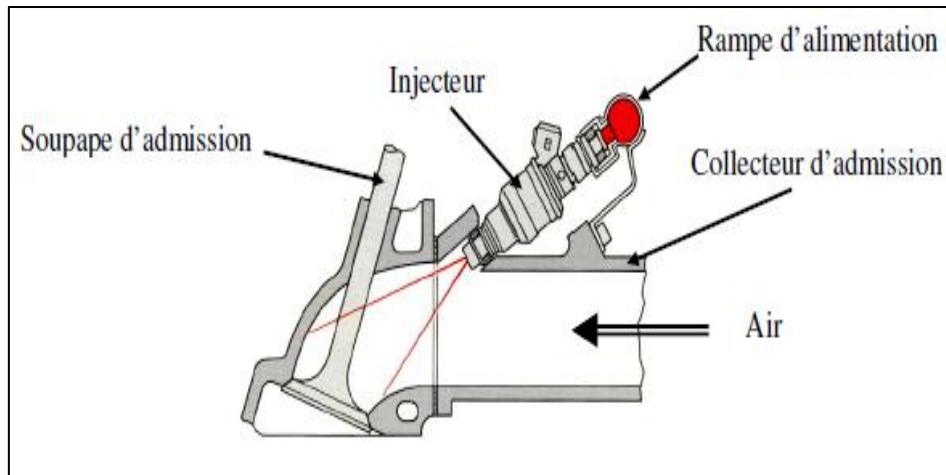


Figure 1.24 : Mise en situation d'un injecteur [19]

1.11. Système d'allumage

L'allumage du mélange carburé est provoqué par une étincelle électrique éclatant entre les électrodes d'une bougie. Un circuit spécial assure la mise en tension, la distribution entre les cylindres et la détermination de l'instant d'allumage.

Le circuit d'allumage se compose d'une bobine d'induction, d'un rupteur (les vis platinés) ou d'un transistor et d'un distributeur. Le rupteur provoque une interruption périodique du courant et crée ainsi des impulsions que la bobine transforme en haute tension (10 à 20 kV). Le distributeur dirige le courant haut tension vers les bougies d'allumage.

Cette technologie est maintenant supplantée par les allumeurs électroniques intégraux (AEI), pour lesquels un circuit électronique commandé par un calculateur génère les impulsions d'allumage. Ce système est d'une grande souplesse, car l'énergie et l'instant d'allumage peuvent être modulés en fonction d'un grand nombre de données (régime, température, cliquetis, etc.).

L'instant d'allumage détermine le calage de la combustion dans le cycle moteur et il est éminemment variable. Il doit tenir compte de la durée de combustion, qui, elle-même dépend de nombreux paramètres, les principaux étant le régime et la charge. Pour réaliser cela, les systèmes moins évolués utilisent des procédés mécaniques (la correction centrifuge pour le régime et la capsule à dépression pour la charge). L'électronique permet de considérer beaucoup de paramètres (températures de l'air, angle de rotation...), mais aussi d'intégrer les lois d'avancement optimisées [15].

1.11.1. Différents types d'allumage

➤ Allumage classique par batterie

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.

• 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.

Dans le système d'allumage classique, les coupures intermittentes sont réalisées par un rupteur, placé sur la ligne de retour à la masse du bobinage. Son ouverture et sa fermeture sont provoqués par une came. Le rupteur et l'arbre porte cames sont des éléments de l'allumeur. L'arbre d'allumeur tourne à demi-vitesse du vilebrequin puisqu'il doit se produire une étincelle tous les deux tours de vilebrequin.

Au moment où le circuit primaire se ferme au rupteur, le courant s'établit progressivement et lorsqu'il s'ouvre, ce courant se trouve alors dérivé vers le condensateur branché aux bornes du rupteur.

Le condensateur va se charger ce courant du self puis se décharge aussitôt. La variation brutale du flux dans le circuit primaire provoque la naissance d'un courant haute tension dans l'enroulement secondaire puis la distribuer vers la bougie intéressée.

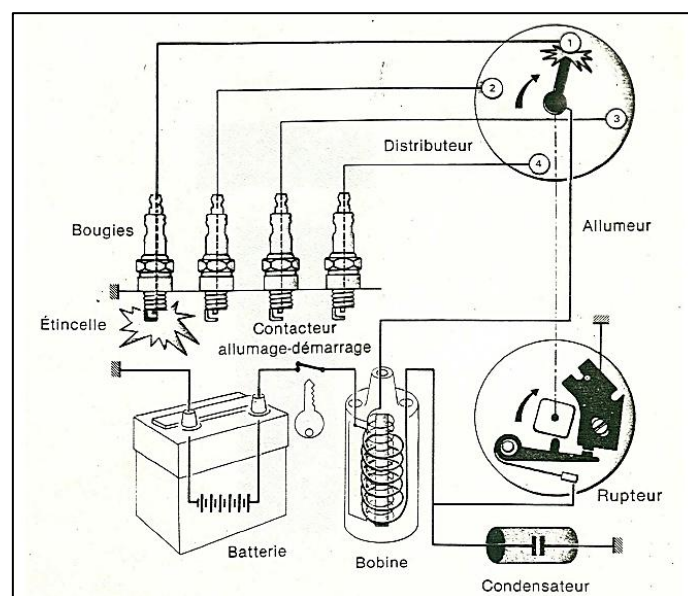


Figure 1.25 : Allumage par batterie [20]

- **Organes de l'allumage classique**

La source d'électricité étant la batterie accumulateur, le dispositif d'allumage classique mécanique est constituée de trois organes distincts :

- L'allumeur-distributeur, comprenant lui-même le rupteur, le condensateur, le système d'avance centrifuge et à dépression et enfin le doigt de distributeur (tête de distribution),
 - La bobine haute tension,
 - La bougie, une par cylindre [20].

➤ **Allumage électronique**

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.
- 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.

- **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 (meilleure étincelle).
- Un distributeur identique à celui d'un allumage classique.
- Un boîtier électronique qui amplifie le courant émis par l'impulseur et calcule, 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 [20].

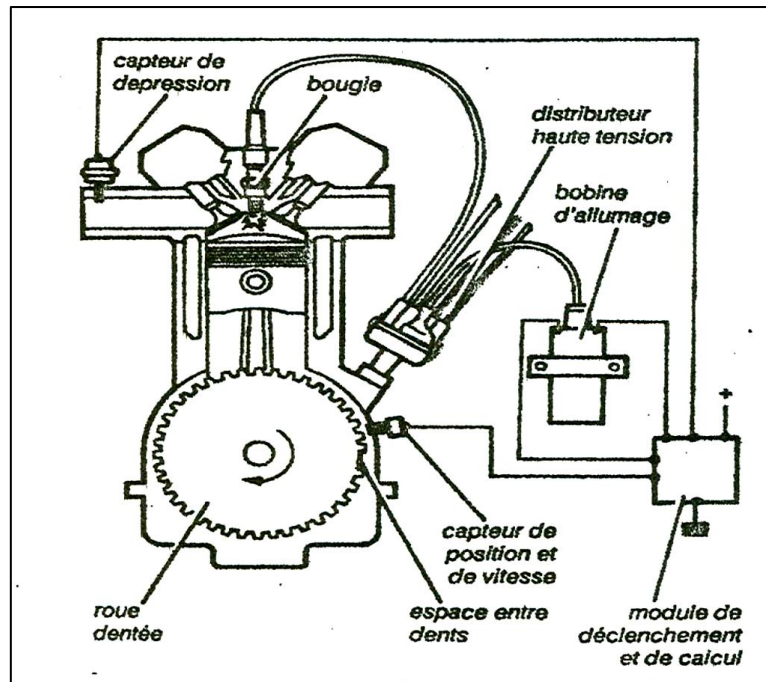


Figure 1.26 : Système d'allumage électronique [20]

1.12. Systèmes annexes

1.12.1. Système de graissage

Le système de lubrification a plusieurs rôles :

- Diminuer les frottements sur les pièces en mouvement;
- Dissiper une partie de la chaleur de combustion;
- Assurer l'étanchéité des cylindres;
- Evacuer, lors des vidanges, les particules dues à l'usure et aux résidus de combustion.

➤ Circuit de graissage

On peut distinguer deux types de circuits de graissage :

- Les circuits à graissage sous pression et à bain d'huile, le plus généralement utilisé sur les véhicules de tourisme.
- Le circuit à graissage sous pression et à carter sec, réservés à certaines applications particulières (véhicules tous terrains ou véhicules de compétition).

• Graissage sous pression et à bain d'huile

Le carter inférieur constitue une réserve d'huile. Cette dernière est aspirée au travers d'une crépine par une pompe, qui la refoule à une pression dont la valeur maximale (environ 4 à 5 bars) est contrôlée par une soupape de décharge, vers successivement :

- Le filtre à huile;

- La rampe principale qui alimente les paliers de vilebrequin;
- La rampe de distribution qui permet de lubrifier les contacts cames-patins ou
- Cames-poussoirs.

L'huile retombe ensuite par gravité dans le carter inférieur par des retours prévus à cet effet.

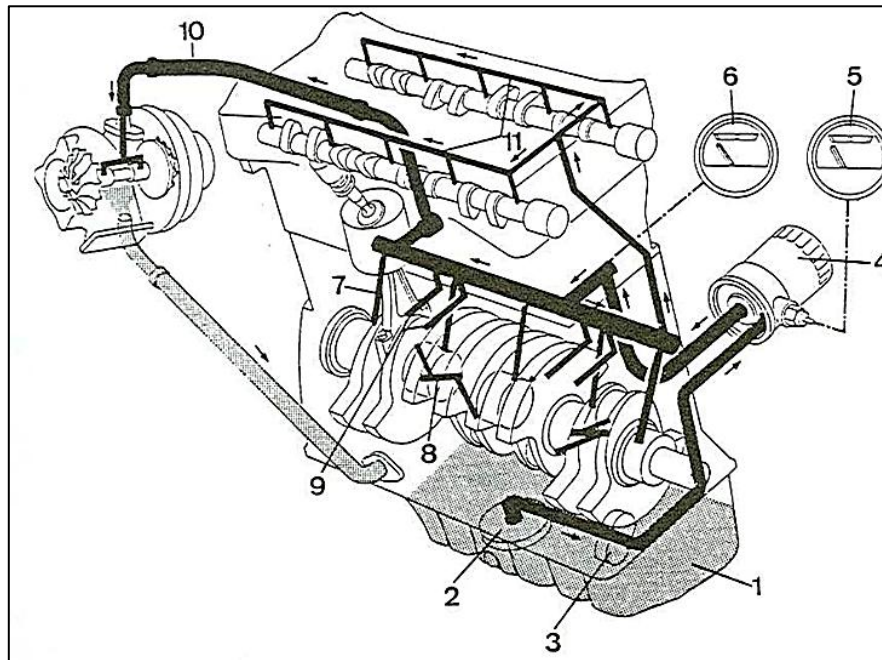
- **Graissage sous pression et à carter sec**

Dans ce cas l'huile qui retombe dans le carter inférieur est aussitôt aspirée par une pompe d'épuisement vers un réservoir d'huile souvent séparé du moteur. De là, l'huile est aspirée puis refoulée sous pression par une pompe d'alimentation analogue, ainsi que le reste de circuit de graissage.

La pompe d'épuisement a un débit largement supérieur à celui de la pompe d'alimentation, dans un rapport de l'ordre de 1.5 à 2. Elle aspire donc, en même temps que de l'huile, une certaine quantité d'air. D'où l'intérêt de ce type de moteur, d'huiles ayant de bonnes propriétés anti-mousse.

Le réservoir d'huile permet une désaération de l'huile avant son départ vers la pompe d'alimentation.

Les deux pompes, d'épuisement et d'alimentation peuvent être toutes deux des pompes à engrenages entraînées par un même arbre [21].



Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Carter inférieur du réservoir d'huile	7	Graissage des paliers de vilebrequin
2	Crépine d'aspiration	8	Conduits percés dans le vilebrequin
3	Pompe à huile	9	Arrosage des pistons
4	Filtre à huile	10	Graissage des paliers du turbo
5	Manomètre de pression	11	Graissage des paliers d'arbre à cames
6	Thermomètre		

Figure 1.27 : Circuit de graissage [6]

1.12.2. Système de refroidissement

➤ Rôle du refroidissement

- Le rendement du moteur (le rapport entre l'énergie fournie par l'arbre moteur et l'énergie apportée par la combustion) ne dépasse généralement pas 30% dans les moteurs à allumage commandé.
- La quantité d'énergie à évacuer par le refroidissement varie en fonction de la charge du moteur.
- Au cours du cycle, la température des gaz au sein du cylindre varie de quelques degrés à 2000°C.

- Les parois de la culasse et de la chemise suivent ces variations avec une amplitude beaucoup plus faible. Ces écarts (de 60 à 80°C autour d'une moyenne de 200°C pour la peau des parois de la culasse par exemple) suffisent parfois à provoquer des contraintes thermiques cycliques préjudiciables à la tenue des pièces (craques thermiques dans la culasse, déformations permanentes de la culasse entraînant des problèmes d'étanchéité au niveau du joint de culasse...) [22].

➤ **Avantages du refroidissement**

- Maintien de la température des éléments de la chambre de combustion en dessous de certaines limites pour assurer leur résistance mécanique.

- Diminution de la température de l'huile afin d'assurer une bonne lubrification du contact segment/cylindre et aussi de diminuer les risques de grippage des pistons ou de gommage des segments.

- Maintien d'un taux de remplissage correct (échauffement des gaz frais plus réduit).

- Eloignement des limites du cliquetis (combustion anormale) [22].

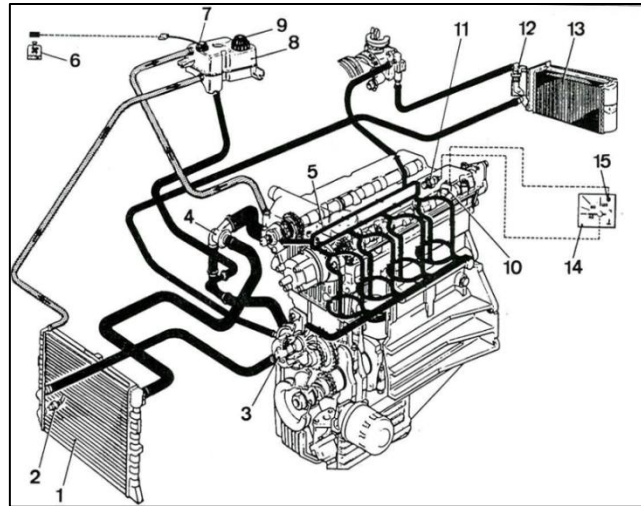
➤ **Principaux systèmes de refroidissement**

• **Refroidissement par eau**

Une circulation d'eau interne refroidit le moteur, ensuite l'eau est refroidie dans un radiateur.

Dans ce système le moteur, en particulier la culasse et le bloc-cylindres, comporte des cavités (chambres d'eau) dans lesquelles circule l'eau de refroidissement.

La circulation de l'eau est assurée par une pompe centrifuge.



Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Radiateur	9	Bouchon du réservoir d'expansion
2	Sonde de ventilateur électrique	10	Sonde de température du liquide de refroidissement
3	Pompe à eau	11	Sonde pour lampe témoin de température
4	Soupape thermostatique	12	Robinet de chauffage
5	Culasse	13	Radiateur de chauffage
6	Lampe témoin de niveau min du liquide	14	Indicateur de température du liquide de refroidissement
7	Jauge à liquide	15	Lampe témoin de liquide de refroidissement
8	Réservoir d'expansion		

Figure 1.28 : Circuit de refroidissement à eau d'un moteur [6]

- **Refroidissement par air**

Un courant d'air frais passe sur le moteur et le refroidit. En automobile, c'est le refroidissement par eau qui est le plus utilisé.

Ce type de refroidissement encore beaucoup utilisé pour les motos est très rare en automobile.

Le coefficient de conductivité de l'air étant plus faible que celui de l'eau, les surfaces d'échange doivent être augmentées et le débit d'air être très important.

En pratique, cette surface est augmentée au moyen d'ailettes venues de fonderie au niveau des cylindres et de la culasse.

Pour les moteurs à poste fixe, le moteur est caréné avec des tôles et l'air est pulsé par une soufflante [22].

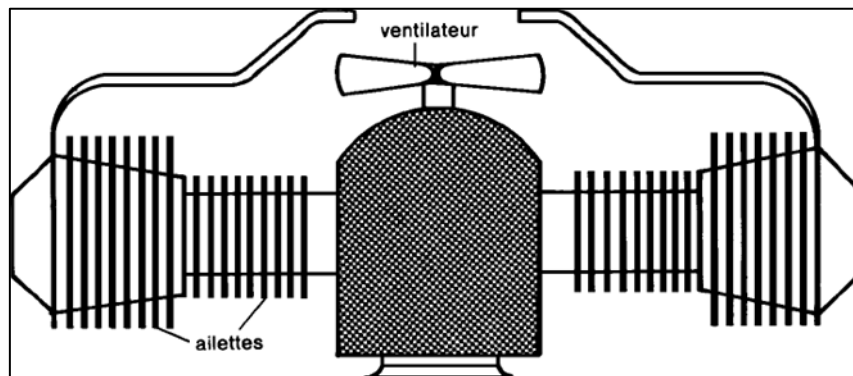


Figure 1.29 : Circuit de refroidissement à air [6]

1.13. Émissions polluantes

En Algérie un tiers de la consommation énergétique finale va vers le secteur des transports. Le transport routier en particulier, se caractérise par une dépendance importante vis-à-vis des produits pétroliers (essences et gasoil) et représente ainsi une des principales sources de pollution atmosphérique dans les grandes agglomérations urbaines du nord du pays (Alger, Oran, Constantine et Annaba).

En effet, en constante évolution depuis 1985 (5 % de croissance annuelle), le parc automobile algérien compte plus de 2.8 millions de véhicules tous genres confondus, se caractérisant par une certaine vétusté (60 % du parc a plus de 14 ans d'âge) Concernant la consommation de carburant, l'essence reste la principale source d'énergie pour plus de 75 % des véhicules de ce parc et en particulier pour 92,5% des véhicules de tourisme.

Certains produits de combustion peuvent présenter un danger plus ou moins prononcé. Ainsi, les oxydes de carbone et d'azote sont toxiques, certains hydrocarbures (imbrûlés ou transformés lors des processus de combustion) semblent être classés parmi les substances cancérigènes. Les suies et les fumées sont également indésirables du point de vue de la pollution de l'air [23].

1.13.1. Présentation des polluants automobiles

Les polluants provenant des gaz d'échappement automobile appartiennent globalement aux grandes familles des polluants atmosphériques. On retrouve en effet les oxydes de carbone (CO, CO₂), les composés azotés regroupés sous le terme NO_x (NO et NO₂) et le protoxyde d'azote N₂O, les composés organiques qui rassemblent les COVNM

(hydrocarbures non méthaniques et composés carbonylés), le méthane (CH_4), les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques). Dans le cas d'utilisation de gazole non désulfuré nous pouvons retrouver des composés soufrés, et l'emploi de carburants plombés, peut engendrer la présence de composés halogénés (halogénures, bromures et chlorures de plomb qui produisent dans l'atmosphère HBr et HCl). Il est à noter que ces derniers composés sont en baisse du fait de la diminution progressive de ce type de carburant. Avec l'augmentation des véhicules diesels, la présence de composés métalliques (zinc des lubrifiants et impureté cadmium) et de particules organiques (suies) à l'échappement est à considérer [24].

1.13.2. Formation des polluants

Dans le cas idéal d'une combustion complète, les produits formés sont majoritairement du dioxyde de carbone CO_2 et de l'eau H_2O . Or ce cas idéal n'est quasiment jamais atteint du fait des temps très courts laissés aux différents processus chimiques d'oxydation, des manques d'homogénéité des mélanges carburés et des variations rapides de température au sein de la chambre de combustion qui compose le moteur. Ceci conduit à la présence de produits de combustion incomplète à l'échappement.

Les polluants formés et émis par les moteurs sont les mêmes quel que soit le type de combustion, seules les quantités relatives varient avec le type de combustion, la conception interne, la géométrie, et les conditions de fonctionnement [Degobert P., 1992]. Nous pouvons à titre d'exemple montrer un paramètre influant sur les émissions : la richesse du mélange carburé Φ (rapport carburant / air). Comme le montre la figure 1.30, les comportements à l'émission sont différents en fonction de la valeur de la richesse du mélange du carburant.

L'évolution des concentrations des différents polluants en fonction de la richesse, montre qu'il n'existe aucune zone de réglage susceptible de réduire simultanément l'ensemble des polluants. Un fonctionnement en milieu très pauvre réduit les niveaux de CO , CO_2 , NO mais engendre une augmentation des HC et également de HCHO , par la difficulté de propagation de la flamme dans ces conditions, qui produit donc plus d'imbrûlés. De façon générale, on essaie de se rapprocher de la stœchiométrie (rapport air/carburant = inverse de la richesse = 1) et le traitement des polluants est réalisé par un système catalytique extérieur au moteur [24].

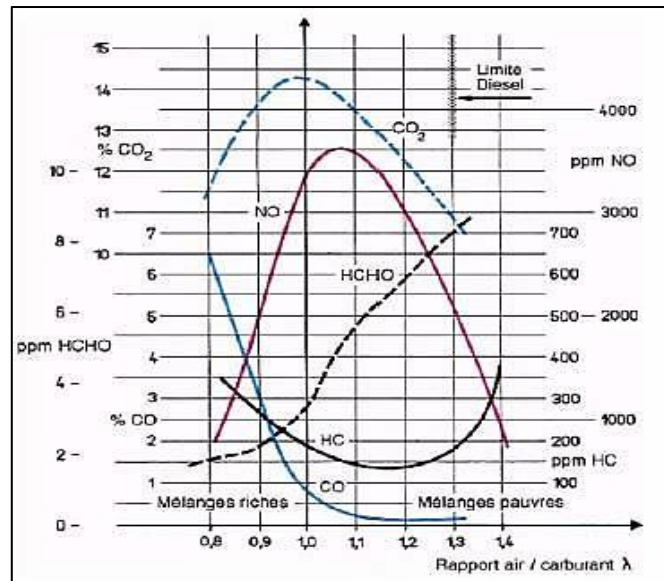


Figure 1.30 : Évolution des émissions de polluants en fonction de la richesse du mélange

[Degobert,1992] [24]

➤ Formation des oxydes d'azotes

L'oxyde nitrique (NO) est l'oxyde d'azote prédominant qui se forme, par oxydation, lors de phénomènes de combustion dans un moteur. Sa source principale est l'azote moléculaire de l'air utilisé comme comburant dans les moteurs. Des conditions de hautes températures et des teneurs élevées en O_2 favorisent sa formation en grande quantité. La création de NO_2 quant à elle, peut être négligeable notamment dans le cas des moteurs à allumage commandé du fait de sa conversion rapide à l'état de NO. Pour les moteurs diesels, le NO_2 peut représenter jusqu'à 30% des NO_x . Par ailleurs, il peut se former une faible quantité d'oxyde nitreux N_2O .

➤ Formation des composés organiques volatils non méthaniques

Les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) également appelés hydrocarbures imbrûlés, proviennent de la combustion incomplète des hydrocarbures entrant dans la composition des carburants. Les émissions relatives aux transports routiers représentent un quart des émissions totales anthropiques de COV tous secteurs confondus. Dans ce secteur, les véhicules particuliers représentent les plus forts émetteurs avec une part de 73%. Ces composés sont plus ou moins nocifs et ont des réactivités différentes aux cours des transformations chimiques qu'ils subissent au sein de la troposphère. [Carter W.P.L, 1994].

➤ Formation du monoxyde de carbone

La formation du monoxyde de carbone (CO) dépend principalement de la richesse du mélange carburé. Dans des conditions de combustion trop riche, le défaut d'oxygène entraîne une

combustion incomplète et la teneur en CO augmente régulièrement avec la richesse. Dans le cas de moteur à allumage commandé, les émissions de CO sont significatives, du fait du fonctionnement qui est proche de la richesse 1 en pleine charge et au démarrage avec le starter. Dans le cas du moteur diesel, le fonctionnement en mélange globalement pauvre entraîne des émissions plus faibles que celles du moteur à allumage commandé. Cependant l'hétérogénéité du mélange et des défauts locaux d'oxygène, ainsi que des niveaux de température et des temps de séjour insuffisants peuvent engendrer la formation de CO.

➤ **Formation de particules**

Les particules formées à l'échappement présentent une composition complexe. Elles peuvent être composées de particules minérales, de particules organiques (suies) ou d'un mélange des deux. Ces produits se retrouvent principalement dans les moteurs diesels. Les fractions organiques peuvent contenir des hydrocarbures aliphatiques de forte masse moléculaire, des aromatiques et poly-aromatiques, et la fraction inorganique peut être constituée d'acide sulfurique provenant du soufre présent dans les carburants. La composition de ces particules varie suivant les caractéristiques du carburant, du mode de fonctionnement et de la conception et du réglage du moteur. Pour la taille des particules, celle-ci s'étend sur une large gamme allant de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres. Mais la plupart des particules émises ont une taille comprise entre 0,05 et 0,3 μm et de ce fait ont un impact sur la santé non négligeable car elles peuvent pénétrer profondément dans les voies respiratoires et présenter ainsi des risques sanitaires [24].

1.13.3. Réglementation et mesures

En ce qui concerne les polluants automobiles, la plupart des pays a adopté des réglementations afin de fixer des valeurs limites d'émissions sur un certain nombre d'entre eux, à des fins d'homologation ou de conformité de production. Des méthodes d'essais, suivant des procédures précises établies par des réglementations propres à chaque pays, servent à l'établissement des normes d'émission. Différents cycles réglementaires ont été établis de façon à prendre en compte la spécificité de chaque pays. Ces cycles sont représentatifs de conditions de conduites simulées par une succession de différents régimes moteurs sur des durées établies. Il serait bien trop long d'évoquer ici l'ensemble de ces normes, chacune ayant ses propres caractéristiques au niveau des modes de conduite. Nous ne présenterons, de ce fait, que les normes les plus couramment employées, et faisant référence dans le domaine des émissions automobiles, à savoir les normes européennes et les normes américaines [24].

1.14. Nouvelles voies envisagées pour la réduction de la consommation des carburants et des émissions de polluants

Les efforts pour diminuer la consommation en carburant et les émissions de gaz polluants s'orientent aujourd'hui dans trois directions principales :

- L'amélioration de la combustion proprement dite par la conception de nouveaux moteurs plus performants, en utilisant les méthodes CFD (computational fluid dynamics) combinés à des essais expérimentaux et des modèles de cinétique chimique.
- L'amélioration des techniques de post-traitements des gaz émis à la sortie du moteur : pot catalytique, filtres à particules.
- La reformulation des carburants en essayant par des programmes expérimentaux
- D'établir des corrélations empiriques entre la composition chimiques du carburant et les émissions [25].

1.14.1. Amélioration de la combustion dans les moteurs

L'effort de recherche des motoristes pour l'amélioration de la combustion dans les moteurs a principalement porté sur trois axes :

➤ Réduction de la cylindrée (downsizing)

Le downsizing repose sur le principe de réduction de la consommation en carburant par diminution de la taille du moteur avec suralimentation en carburant pour une performance équivalente. Il apparaît en effet, qu'à vitesse constante, un moteur de 1 litre suralimenté en carburant consommera 25 % de carburant en moins qu'un moteur de 2 litres sans suralimentation. Ceci est dû à une baisse des frottements internes au moteur et notamment à des pertes de charge lors du passage du carburant dans les injecteurs. Cette méthode concerne essentiellement les moteurs à essence.

➤ Système d'injection

Le mode d'injection des carburants dans la chambre de combustion a fait l'objet de nombreux changements au cours de la dernière décennie. Ainsi pour les nouveaux moteurs Diesel, on a depuis le début des années 2000 une généralisation de l'injection du carburant sous-pression avec alimentation des injecteurs au travers d'une rampe commune à tous les cylindres (système Common-rail). Ce système permet une pression d'injection identique dans tous les cylindres et donc un meilleur contrôle de l'alimentation et de la dispersion du carburant.

Pour les moteurs à essence, dont le fonctionnement avec des mélanges stœchiométriques implique une surconsommation en carburant de 20% par rapport au moteur Diesel, on observe

également une évolution vers l'injection du carburant directement dans la chambre de combustion. C'est notamment le cas des moteurs à combustion stratifiée encore en développement actuellement et pour lesquels l'injection est dirigée près de la bougie d'allumage, créant une zone riche en carburant. Ces conditions d'injection permettent l'auto-inflammation de mélange ayant une richesse proche de 0,3 alors que dans les conditions classiques de fonctionnement du moteur à essence le mélange ne peut s'enflammer que pour des richesses comprises entre 0,7 et 1,2. D'où à performance équivalente un gain de consommation en carburant de 10 à 20 % [25].

➤ **Mode de combustion utilisé**

A l'image des nouveaux modes d'injection décrits au paragraphe précédents, la tendance actuelle du développement des moteurs est à la combustion en mélange pauvre homogène, que le carburant d'alimentation soit de l'essence ou du gazole. Ainsi une alternative prometteuse à la combustion en moteur Diesel est le moteur à allumage par compression de charge (HCCI) appelé également moteur CAI pour les applications développé à partir des moteurs essence. Cette technologie s'appuie sur le mode de fonctionnement d'un moteur Diesel mais pour lequel la charge avant auto-inflammation serait totalement homogène permettant un contrôle chimique de l'auto-inflammation, la température à l'intérieur du cylindre étant contrôlée par recirculation des gaz d'échappement. Ce mode de combustion utilisant des mélanges pauvres a pour avantage de diminuer la consommation en carburant des moteurs essence et, grâce à l'homogénéité chimique et thermique de la charge, de limiter les émissions de NO_x et de particules des moteurs Diesel. On peut envisager à moyen terme la création d'un seul moteur fonctionnant à l'essence et au gazole, voire avec d'autres carburants alternatifs comme le gaz naturel. Néanmoins la mise sur le marché de cette technologie n'est pas envisagée avant 2010, car il demeure plusieurs problèmes liés à la complexité et au coût des systèmes d'injection permettant l'homogénéisation de la charge ; un autre problème majeur est le contrôle de l'auto-inflammation elle-même et de l'énergie émise par celle-ci. C'est pourquoi aujourd'hui les motoristes se tournent de plus en plus vers des modèles cinétiques détaillés, seuls capables d'expliquer les phénomènes chimiques liés à la combustion des mélanges [25].

1.14.2. Systèmes de post-traitement des gaz d'échappement

Les motoristes se tournent aujourd'hui vers des systèmes de post-traitement des gaz d'échappement ayant pour but d'éliminer les NO_x et les particules de suies émises dans les moteurs Diesel. Ce mode de post-traitement des gaz d'échappement est utilisé sur les nouveaux modèles de moteurs à essence depuis une dizaine d'années. Il consiste en l'élimination simultanée des NO_x , du CO et des HC. Il permet une élimination quasi-totale de ces polluants (99%) lorsque le catalyseur est chaud. Inconvénient majeur, le fonctionnement de ce système de post-traitement n'est optimum qu'avec la combustion d'un mélange air carburant stœchiométrique. Il devient donc beaucoup moins efficace pour les nouveaux modes combustion en mélange pauvre.

➤ Catalyseurs

Les catalyseurs d'oxydation permettent de transformer en aval des soupapes d'échappement les hydrocarbures HC imbrûlés en produits moins toxiques tels que le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O). contrairement aux filtres à particules, les catalyseurs d'oxydation ne posent pas le problème de colmatage par accumulation d'un produit solide retenu [27].

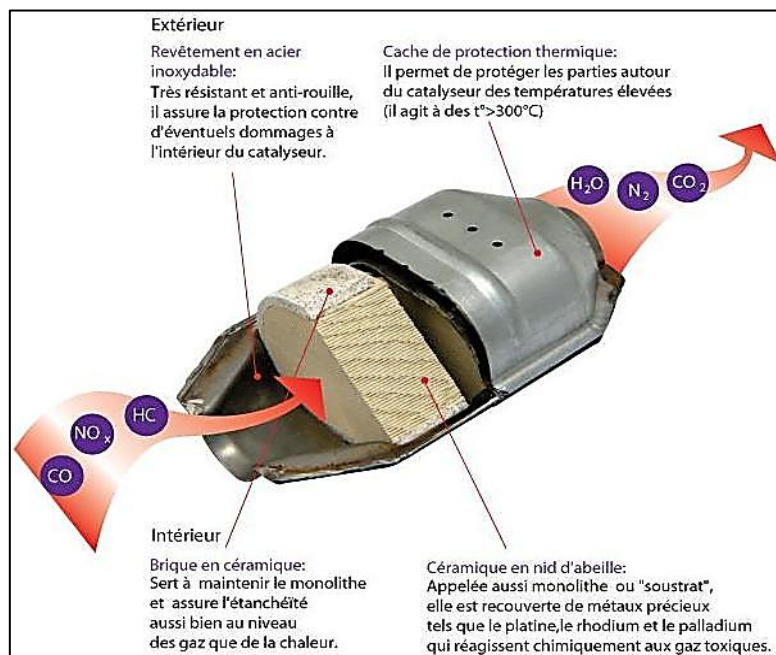


Figure 1.31 : Catalyseurs d'oxydation [26]

➤ Réduction catalytique sélective (SCR) et piège à NO_x

Pour la réduction des émissions de NO_x deux technologies sont envisagées : la réduction catalytique sélective et le piège à NO_x . La catalyse SCR est surtout envisagée pour les poids lourds. Elle consiste en l'injection d'un agent réducteur, généralement de l'urée, dans la ligne

d'échappement en amont du catalyseur qui libère par hydrolyse de l'ammoniaque en proportion stœchiométrique pour éliminer tous les NO_x , l'ammoniaque excédentaire étant finalement dégradé en azote (clean-up). Cette technologie qui nécessite l'ajout d'un réservoir d'urée et la présence d'un capteur à NO_x pour doser la quantité d'urée libérée, permet d'éliminer 90 % des NO_x dans les conditions optimales d'utilisation (200°C à 550°C). Un avantage important de ce dispositif est que son efficacité est indépendante du système de combustion.

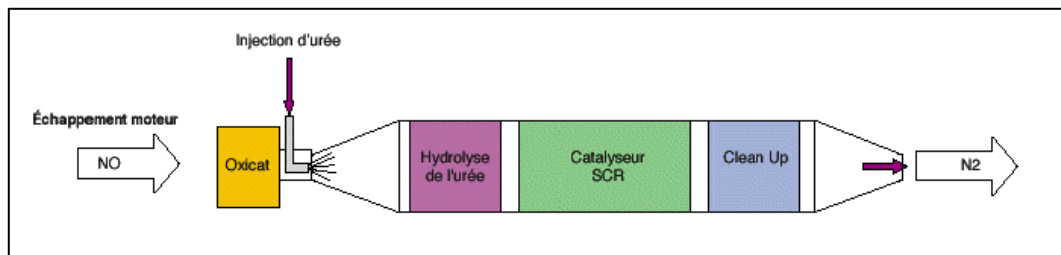


Figure 1.32 : Schéma d'un système SCR (source : panorama IFP 2005) [25]

L'autre technologie envisagée est le piège à NO_x qui consiste en une alternance entre des périodes de stockage du polluant et celle d'élimination par catalyse trois voies. Cette période de régénération du piège dépend du mode de fonctionnement du moteur et de la température de la voie d'échappement. Il doit donc s'effectuer par contrôle électronique en fonction des paramètres de combustion du moteur (richesse de l'alimentation, température...) [25].

➤ Filtres à particules

Les suies qui n'ont pas pu être brûlées dans la chambre de combustion peuvent être détruites par un filtre à particules. Celui-ci n'agit que sur les particules qui sont captable à la température où les gaz d'échappement les traversent. Il faudra prévoir les modes de fonctionnement suivantes :

- Filtration et combustion quasi simultanée des particules lorsque la température des gaz d'échappement le permet.
- Rétenion et accumulation des particules de suies dans le filtre lorsque la température des gaz d'échappement est trop faible.
- Régénération du filtre avant que les pertes de charge dues à l'accumulation de suies deviennent inacceptables.
- Les suies qui n'ont pas pu être brûlées dans la chambre de combustion peuvent être détruites par un filtre à particules. Celui-ci n'agit que sur les particules qui sont

captable à la température où les gaz d'échappement les traversent. Il faudra prévoir les modes de fonctionnement suivantes :

- Filtration et combustion quasi simultanée des particules lorsque la température des gaz d'échappement le permet.
- Rétention et accumulation des particules de suies dans le filtre lorsque la température des gaz d'échappement est trop faible.
- Régénération du filtre avant que les pertes de charge dues à l'accumulation de suies deviennent inacceptables [27].

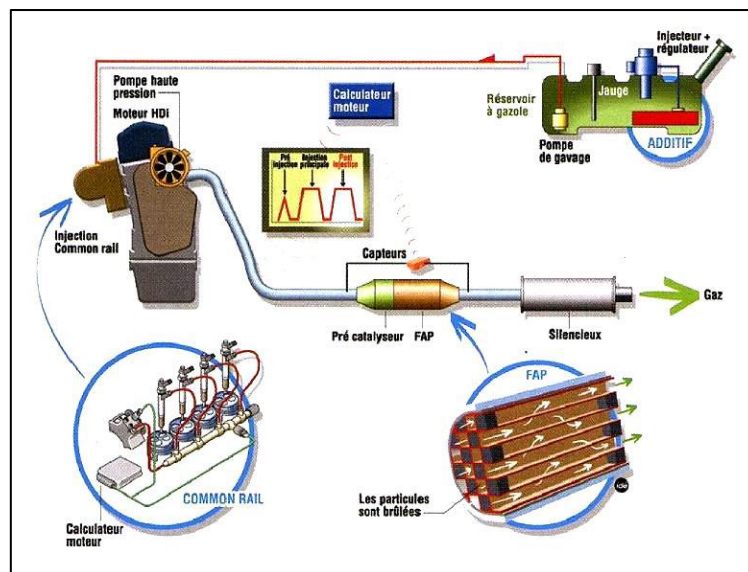


Figure 1.33 : Emplacement des filtres à particules dans un moteur [28]

1.14.3. Reformulation des carburants

Le concept de carburant propre, c'est-à-dire contribuant à une meilleure protection de l'environnement, s'est développé depuis le début des années 1980, tout d'abord aux États-Unis, puis dans le monde entier. En Europe, les conclusions du programme EPEFE (European Programme on Emissions Fuels and Engine Technologies) ont abouti à une législation sur la spécification des carburants et qui concerne les paramètres influençant les rejets de polluants. Si une nouvelle formulation d'une essence ne permet pas comme les pots catalytiques une réduction de 90 % des émissions, on peut cependant espérer des améliorations plus modestes (de 10 à 30 %) applicables rapidement à une large population de véhicules.

➤ Perspectives de recherche sur la formulation des carburants

La recherche sur l'amélioration des moteurs essence et Diesel tend vers des modes de combustion de charges homogènes avec une auto-inflammation contrôlée essentiellement par

la chimie d'oxydation du carburant. L'amélioration de la formulation des carburants rend essentiel le développement de modèles chimiques de combustion des carburants usuels. Cependant en raison de la complexité de la composition de ces carburants il est quasiment impossible de disposer de modèles contenant toutes les espèces. De nombreuses équipes de chercheurs ont donc tenté de développer des mélanges représentatifs des carburants contenant au plus une dizaine d'espèce appartenant aux grandes familles de molécules présentes dans les carburants (alcanes, cyclanes, aromatiques...) [25].

1.15. Biocarburants

1.15.1. Enjeux et perspectives

Deux problématiques majeures se posent au plan énergétique mondial :

- La consommation accrue d'énergies fossiles entraîne une augmentation des émissions de gaz à effet de serre responsable d'importants changements climatiques sur la planète
- La raréfaction de la principale source d'énergie qu'est le pétrole, d'où la hausse des prix du pétrole et l'accentuation de la dépendance des pays consommateurs vis-à-vis des pays producteurs de pétrole.

Parmi les solutions étudiées, les biocarburants offrent des perspectives face aux enjeux actuels. Une production de biocarburants sur le plan national ou communautaire, à partir de matières premières agricoles peut avoir un impact positif sur la balance commerciale du pays ou de la zone communautaire. Par ailleurs, les biocarburants offrent pour certaines productions un débouché énergétique contribuant à accroître les sources de revenus possibles pour le monde rural et favorisant le maintien de l'emploi en milieu rural [30].

1.15.2. Définition et catégories

Un biocarburant est un carburant liquide ou gazeux créé à partir de la transformation de matériaux organiques non fossiles issus de la biomasse, par exemple des matières végétales produites par l'agriculture (betterave, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre, etc.).

Si la langue anglaise n'a retenu qu'une seule appellation « biofuel », plusieurs dénominations coexistent dans la langue française : biocarburant (terme retenu par le Parlement européen), agrocaburant ou carburant végétal.

Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que du CO₂ et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO_x, SO_x).

On distingue trois générations de biocarburants :

➤ **Biocarburants de première génération**

Ils sont principalement de deux types :

- Le bioéthanol : il est produit à partir de canne à sucre, de céréales et de betterave sucrière. Il est utilisé dans les moteurs essence;
- Le biodiesel : il est dérivé de différentes sources d'acides gras, notamment les huiles de soja, de colza, de palme et d'autres huiles végétales. Il est utilisé dans les moteurs diesel.

Les biocarburants de première génération entrent en concurrence directe avec la chaîne alimentaire. Ils sont produits à partir de matières premières qui peuvent être utilisées dans une chaîne alimentaire animale ou humaine. Aujourd'hui, seule cette génération est produite à l'échelle industrielle.

➤ **Biocarburants de deuxième génération**

Des technologies sont actuellement mises au point pour exploiter les matières cellulosiques telles que le bois, les feuilles et les tiges des plantes ou celles issues de déchets. On qualifie ces matières de biomasse ligno-cellulosique car elles proviennent de composants ligneux ou à base de carbone qui ne sont pas directement utilisés dans la production alimentaire. Ces caractéristiques présentent un avantage de disponibilité supérieure et de non concurrence alimentaire par rapport à la première génération de biocarburants.

Cette technologie permet de produire du bioéthanol dit de deuxième génération, du biodiesel, du bio-hydrogène ou du biogaz. Elle n'est pas encore déployée au stade industriel mais des perspectives de mise en application à moyen terme se dessinent. Leur production à grande échelle est prévue à l'horizon 2020-2030.

➤ **Biocarburants de troisième génération**

Les procédés, encore à l'étude, s'appuient principalement sur l'utilisation de microorganismes telle que les micro-algues.

Celles-ci peuvent accumuler des acides gras permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres. A partir de ces acides gras, il est possible de générer du biodiesel. Certaines espèces de microalgues peuvent contenir des sucres et ainsi être fermentées en bioéthanol. Enfin, les microalgues peuvent être méthanisées pour produire du biogaz. Certaines d'entre elles peuvent également produire du bio-hydrogène [31].

1.16. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les moteurs à allumages commandés, leurs structures, comportements et principe de fonctionnement.

Exposés des divers aspects, la combustion dans les moteurs à essence n'a pas la prétention d'être exhaustif.

Seuls les moteurs essence ont été retenus les points les plus marquants des très nombreux phénomènes physiques ou chimiques impliqués et les modes de réalisation retenus actuellement.

L'existence de ces derniers dans une combustion essence influe sur le bon fonctionnement des chambres de combustion. Seul un mariage avec un système d'injection réussi sur toute la plage de fonctionnement du moteur, permet d'obtenir les longévités, les performances, les consommations et les émissions de polluants recherchées. La recirculation des gaz d'échappement est une voie d'avenir prometteuse pour réduire les émissions d'oxydes d'azote.

Chapitre 2:
Conversion d'un moteur essence
au GPL

Chapitre 2 Conversion d'un moteur essence au GPL

2.1. Introduction

Un gaz est un ensemble d'atomes ou de molécules très faiblement et quasi indépendants dans l'état gazeux. La matière n'a pas de forme et de volume propre : un gaz tend à occuper tout le volume disponible. Cette phase constitue l'un des trois états dans lequel peut se trouver un corps pur, l'autre étant les phases solide et liquide. Le passage de l'état liquide à l'état gazeux est appelé vaporisation. On qualifie alors le corps de vapeur (par exemple la vapeur d'eau) [32].

Le Butane et le Propane sont des Gaz de Pétrole Liquéfiés, appelés couramment « GPL ». Il s'agit de dérivés du pétrole et/ou du gaz naturel. Cette appellation est exclusivement réservée au Propane et au Butane, car ils sont les seuls à être gazeux à pression et température ambiante (1,013 bar et 15°C) et à se laisser liquéfier sous faible pression (respectivement à 7,5 et 1,5 bar).

Ceci, présente l'intérêt de stocker une importante quantité d'énergie, dans un volume réduit, ce qui permet de le transporter plus facilement que pour les gaz non condensables (méthane, éthane) qui exigent des pressions très élevées et le commercialiser aisément dans les bouteilles en acier puisqu'il est gazéifié au moment de son utilisation.

L'utilisation des GPL présente des avantages par rapport à l'essence en permettant de réduire [33] :

- 50% des émissions d'oxyde d'azote.
- 60% des monoxydes de carbone.
- 90% hydrocarbures et particules.

2.2. Historique des GPL

C'est au cours du processus de croissance du marché des produits pétroliers qu'un ingénieur de la Riverside Oil Company en Virginie (20ème Siècle) a découvert les Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL).

Le 24 décembre 1910, H. Stukeman réussit pour la première fois à obtenir les 658 premiers litres de GPL liquide. Cet ingénieur avait entrepris ses travaux sous l'impulsion de son directeur général, A.N. Kerr, qui dirigeait la raffinerie. Ce dernier se trouvait depuis un certain temps confronté au problème de l'évaporation des essences minérales (extraites du gaz naturel associé aux gisements de pétrole) qui étaient stockées dans des bacs à ciel ouvert. Pour limiter

ses pertes, il eut l'idée de récupérer les vapeurs et d'essayer de les recondenser ; ainsi étaient nés les Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL).

C'est en 1912 que fut expérimentée la première installation domestique au GPL. Dans la même année, la carburation automobile au GPL fit ses premiers pas. Le pré-développement de cette invention prit cependant une dizaine d'années. En 1922, les statistiques officielles font état de 417 tonnes de GPL vendues dans l'ensemble des États-Unis. Les compagnies pétrolières commencent à s'intéresser au GPL et le commercialisent dès 1927, l'impulsion est alors donnée et en 1930, vingt ans après leur découverte, la consommation de GPL aux États-Unis atteignait 32200 tonnes.

Pour l'Europe, c'est en France que débutera le GPL en 1932, en usage domestique. En revanche, le GPL carburant n'y sera autorisé qu'en 1979 [34].

En Algérie, suite à une phase d'étude et d'expérimentation entamée en 1977, la décision d'introduire le GPL carburant « Sirghaz » est intervenue en 1983 avec l'adoption de la bicarburation et la mise en place de la réglementation liée aux conditions d'utilisation et de distribution du GPL/c [35].

2.3. Gaz Pétrolier Liquéfié

Le gaz de pétrole liquéfié est un carburant composé de propane et de butane. C'est un hydrocarbure, c'est à dire qu'il est composé de carbone et d'hydrogène (HC).

Il est issu de la distillation du pétrole et fait partie des coupes les plus légères : 100 tonnes de pétrole brut donnent 3 à 5 tonnes de GPL.

Le GPL est incolore et inodore, il est extrêmement inflammable et volatile, il est plus lourd que l'air. Pour déceler d'éventuelles fuites, on lui donne une odeur particulière au moyen de mercaptans (à base de soufre)

Le GPL est stocké sous une forme liquide dans le réservoir; cet état liquide dépend de la pression et de la température auxquelles le GPL est stocké ce qui en facilite aussi bien le transport que le stockage [36].

Le pourcentage de propane et de butane peut varier de 50% de propane et 50% de butane, jusqu'à 80% de propane et 20% de butane, en fonction du pays et du fournisseur.

Le butane a un meilleur rendement énergétique que le propane, et la proportion du mélange peut donc avoir son importance dans la consommation finale de gaz lors du fonctionnement du moteur.

Si le pourcentage de butane diminue, la consommation de gaz augmente [37].

2.4. Composition des GPL

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) est l'un des molécules pures, dites saturées, car elle possède des relations stables entre les différents atomes. En effet, GPL n'est rien d'autre que des chaînes hydrocarbonées, c'est-à-dire qu'elle est constituée uniquement de molécules de Carbone (3 pour le propane et 4 pour le butane) et d'Hydrogène (8 pour le propane et 10 pour le butane).

Ces hydrocarbures mélangés répondent à des règles officielles, clairement définies par la loi [39].

- Propane C₃H₈
- Butane C₄H₁₀

Tableau 2. 1 : Composition des GPL [38]

Composants du GPL	% molaire
Méthane	0,32
Ethane	1,12
Propane	60,95
Iso butane	15,46
Normal butane	22,14
Iso pentane	0,01

2.5. Origine du GPL

Le GPL est extrait à partir de diverses sources qui peuvent être :

- De la récupération à partir de la liquéfaction des gaz associés (champs pétroliers).
- Comme sous-produit à partir des unités de liquéfaction du gaz naturel GNL.
- Du pétrole brut après raffinage comme sous-produit.
- De la récupération à partir des champs gaziers [40].

2.6. Propriétés des GPL

➤ Odeur

Le GPL est inodore à l'état naturel, mais on doit ajouter un odorant, ce sont des composés sulfures tel que le diéthylmercaptane ou le diméthylsulfide pour des raisons de sécurité [41].

➤ Tension de vapeur

C'est la pression pour laquelle il y a un équilibre entre la phase gazeuse et la phase liquide du produit. Exprimée en bar, elle varie de façon importante avec la température. Plus la température augmente plus la pression augmente.

A 15°C :

- Le propane a une pression d'environ 7 Bar ;
- Le butane a une pression d'environ 1,5 Bar [42].

➤ **Dilatation**

À l'état liquide, le GPL a un haut coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors du leur stockage (les sphères ne doivent jamais être complètement remplies) [41].

➤ **Masse volumique**

- La masse Volumique G.P.L. à l'état gazeux
- Air = 1,2 g/l
- Propane = 1,8 g/l
- Butane = 2,4 g/l

Les G.P.L en phase gazeuse sont deux fois plus lourds que l'air.

- La masse Volumique G.P.L. à l'état liquide
- Eau = 1 kg/l
- Propane = 0,51 kg/l
- Butane = 0,58 kg/l

Le G.P.L. en phase liquide est deux fois plus léger que l'eau [42].

➤ **Température d'ébullition**

Passage de l'état liquide à l'état gazeux. La température d'ébullition est de :

- (0°C) pour le butane,
- (- 44°C) pour le propane,
- (- 25°C) pour le GPL carburant.

Pour les températures supérieures à ces valeurs, chaque fois que l'on ouvre le robinet du récipient, il y a ébullition du liquide, formation de vapeur donc de gaz (ciel gazeux) qui se régénère au fur et à mesure des soutirages de ce gaz au robinet.

Ce sont les calories contenues dans l'air ambiant qui provoquent et entretiennent cette vaporisation naturelle. A l'inverse, si la température ambiante descend au-dessous de la température d'ébullition, la phase gazeuse se retransforme en phase liquide : elle ne peut plus y avoir de soutirage et on peut même assister à un phénomène de givrage de l'emballage.

Le G.P.L. en phase liquide entre en ébullition à des températures très basses, notamment le propane. Pour pouvoir se transformer elle a besoin d'énergie qu'elle emprunte à son environnement. Elle fait descendre la température de l'air ou des objets en contact [42].

➤ Pouvoir calorifique

C'est la propriété la plus intéressante étant donné que le GPL est traditionnellement utilisé pour les besoins domestiques [41]. C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de volume du gaz, mesurée dans les conditions de référence. Le pouvoir calorifique pour le gaz naturel s'exprime en (J/m^3). Il existe deux valeurs de pouvoir calorifique [43] :

• Pouvoir calorifique supérieur (PCS)

C'est la quantité de chaleur dégagée lorsque tous les produits de combustion sont ramenés à la température ambiante, l'eau formée étant liquide [43].

• Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

C'est la quantité de chaleur dégagée lorsque tous les produits de combustion sont ramenés à la température ambiante, l'eau restée à l'état vapeur [43]. Le GPL a un pouvoir calorifique élevé et constant. Le butane offre un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 12,66 kWh par kg, le propane un PCI de 12,78 kWh par kg. Si l'on considère leur pouvoir calorifique supérieur (PCS), le butane et le propane affichent respectivement 13,7 kWh et 13,8 kWh par kg [43].

➤ Impuretés

- Le plus important est le soufre, la teneur en soufre est inférieure ou égale à 0,005 % en masse, ainsi l'eau l'un des impuretés importants.
- Le GPL est non corrosif à l'acier mais généralement aux cuivres et ces alliages ou l'aluminium.
- Le GPL n'a aucune propriété de lubrification et cet effet doit être pris en considération lors de la conception des équipements du GPL (pompes et compresseurs).
- Les GPL sont incolores, que ce soit en phase liquide ou en phase gazeuse. Les GPL ne sont pas vraiment toxiques, ils présentent tout au plus un léger pouvoir anesthésiant s'ils sont inhalés longuement et provoquent des migraines et des maux d'estomac [44].
- Le GPL lorsqu'il se répand sous sa forme, hors d'un container sous pression produisant du froid : au contact de la peau, il provoque des brûlures caractéristiques appelées « brûlures froides » [44].
- Le poids spécifique du GPL est environ la moitié de celui de l'eau [41].
- Le gaz propane a une densité de 1,5 fois de l'air [41].
- Le GPL n'est ni toxique ni corrosif vis à vis des aciers [41].
- Le GPL n'est pas de propriétés lubrifiantes et ceci doit être pris en considération lors du dimensionnement des compresseurs et des pompes [41].

- Le GPL est caractérisé par un indice d'octane recherché (RON) naturellement élevé atteignant aisément 98. Cette propriété découle en fait directement de des valeurs de RON de chacun de ces constituants. Par ailleurs, son indice d'octane moteur (MON) est, lui aussi légèrement plus élevé que celui des essences classiques [41].

Tableau 2.2 : Propriétés des GPL

	Butane	Propane
PCS (pouvoir calorifique supérieur)	49,4 MJ ou 13,7 kWh par kg à 15° C et 1013 mbar	49,8 MJ ou 13,8 kWh par kg à 15°C et 1013 mbar
PCI (pouvoir calorifique inférieur)	45,6 MJ ou 12,66 kWh par kg à 15°C et 1013 mbar	46,0 MJ ou 12,78 kWh par kg à 15°C et 1013 mbar
Tension de vapeur	1,5 Bar	7 Bar
Masse volumique	Etat gazeux : 2,4 g/l Etat liquide : 0, 58 kg/l	Etat gazeux : 1,8 g/l Etat liquide : 0, 51 kg/l

2.7. Utilisation du GPL

Il est utilisé dans plusieurs domaines tels que :

➤ Source d'énergie domestique

Actuellement de nombreux appareils de cuisson et de chauffage, sont conçus de manière à s'adapter à l'utilisation des GPL

➤ GPL en pétrochimie

Essentiellement utilisés comme combustible dans les secteurs résidentiels et commerciaux, 1,8% des GPL sont cependant consommés comme charge pétrochimique. 10% de l'éthylène, produit par la pétrochimie est produit mondialement à partir du propane.

La demande globale pétrochimique des GPL enregistre un taux de croissance de l'ordre de 10% [40].

➤ GPL carburant, GPL / C

Le GPL/C, dont la composante diffère d'une région à une autre, est un carburant qui est utilisé dans de nombreux pays dans le monde, essentiellement en Amérique, en Europe et dans le sud asiatique. Un pourcentage de 7 à 8% du GPL consommé mondialement est sous forme de carburant. L'expérience internationale dans l'utilisation du GPL comme carburant permet d'affirmer que le GPL est aujourd'hui un carburant éprouvé et largement utilisé. Les atouts de ce carburant lui confèrent les caractéristiques d'un carburant propre, moins polluant que l'essence.

L'indice d'octane élevé des GPL permet leur substitution à l'essence sans modification du moteur, de plus il confère à celui-ci un pouvoir antidétonant. Ce carburant a beaucoup d'avantages pour l'environnement, il a une capacité de se mélanger à l'air meilleure que celle de l'essence, il y a absence de plomb, ainsi qu'une diminution des résidus de CO₂ et de CO.

Il est à noter que le GPL/C n'encrasse pas le moteur, et cela grâce à son indice d'octane élevé, ce qui augmente la longévité du moteur et lui assure en plus un pouvoir antidétonant, ainsi qu'un pouvoir calorifique élevé. Le GPL/C est le premier carburant sans plomb compétitif au gas-oil et au super sans plomb, avec près de 23000 stations dans le monde qui délivrent du GPL/C à plus de 5 millions véhicules pour une consommation de 10 MT [45].

➤ **Comme combustible**

Cuisine, production d'eau chaude ou chauffage livré par les distributeurs sous forme liquide, en bouteilles ou en vrac.

Dans certains cas, les clients sont alimentés à partir de réseaux propane ou d'air.

Propane ou butane comme en Corse. Il est utilisé par des particuliers ou des industriels comme gaz de combustion.

L'utilisation dans le secteur résidentiel tertiaire (cuisson) est concentrée principalement en Espagne, France, Turquie et Italie. Dans le monde, près de 500 millions de ménages et un sur deux dans l'Union européenne l'utilisent [46].

➤ **Dans la climatisation**

Il est utilisé pour la construction des réfrigérateurs et des climatiseurs grâce à sa détente d'absorption de la chaleur et de créer le froid [47].

➤ **Dans la production d'électricité**

Il est utilisé pour la génération d'électricité, pourrait être important si les conditions de nature économique venaient à être favorables, les marchés ciblés à cet effet, et qui sont attractive pour le GPL. La production d'électricité en Algérie est effectuée uniquement par le gaz naturel, le GPL n'est pas introduit jusqu'ici dans la génération d'électricité ou dans la combustion [47].

2.8. Avantages et inconvénients techniques des GPL

➤ **Avantages du GPL en première monte**

- Composants GPL en première monte sur de nombreuses marques de constructeurs automobile ;
- Norme Européenne de sécurité ECE 67-01 pour les composants GPL ;
- Zéro émission de particules polluantes ;

- 18% de Nox en moins que l'essence ;
 - Emissions de CO₂ -18% par rapport à l'essence ;
 - Bonus écologique à l'achat ;
 - Coût du GPL à la pompe inférieur à celui de l'essence ;
 - Bicarburant (GPL et essence) ;
 - Autonomie étendue avec les réservoirs essence et GPL ;
 - Valeur de revente d'un véhicule GPL supérieure à celle d'un véhicule essence ;
 - Remise sur la carte grise dans de nombreux départements ;
 - Garantie constructeur totale sur le véhicule et la transformation ;
 - Périodicité d'entretien équivalente en GPL et en essence.
- **Inconvénients du GPL en première monte**
- Surcoût à l'achat ;
 - Consommation + 20 % par rapport à celle d'un véhicule essence ;
 - Baisse de la performance de - 5% comparé à celles de l'essence ;
 - La roue de secours se substitue au réservoir de GPL ;
 - Offre constructeurs réduite en nombre de modèles ;
 - Embout spécifique pour faire le plein de GPL [48].

2.9. Stockage de GPL

Les gaz du pétrole liquéfiés sont stockés sous leur propre tension de vapeur et la pression de stockage dépend uniquement de la nature du produit stocké et la température de stockage

2.9.1. Différents types de stockage des GPL

On distingue quatre grands types de stockages :

➤ **Stockage aérien sous pression**

C'est le mode de stockage le plus rencontré dans l'industrie des GPL car il permet un stockage économique de très grandes quantités avec un coût d'exploitation très faible. Le stockage est réalisé dans des réservoirs directement exposés à l'air ambiant.

La pression de stockage est la tension de vapeur à la température ambiante et dépend uniquement de la nature du produit stocké et des conditions atmosphériques [49].

Cela concerne :

La nature du produit stocké des conditions atmosphériques

- Les réservoirs cylindriques
- Les sphères

- Les stockages souterrains
- Les stockages sous talus
- Les réservoirs petits vrac de propane et les bouteilles de propane et de butane commerciaux.

- **Sphères**

La forme sphérique permet de mieux utiliser la résistance de la tôle et d'obtenir un moindre coût d'investissement.

La gamme de capacités réalisables va de 200 m³ (7 m de diamètre) jusqu'à 7000 m³.

Le quotient de la surface extérieure par le volume est inférieur de 88 % à celui d'un cylindre de même volume ce qui réduit les échanges de chaleur avec l'air ambiant.

Compte tenu de la géométrie et la grande dimension, la construction des sphères est effectuée directement sur le site d'implantation à partir d'éléments transportables préfabriquée en usine [49].

- **Réservoirs cylindriques (cigares)**

Ils peuvent être installés verticalement ou horizontalement. Ils ont une capacité limitée (jusqu'à 500 m³) et sont très sensibles à la mise sous vide. Les équipements rencontrés sur ces capacités sont identiques à ceux équipant les sphères.

- **Équipements des réservoirs sous pression**

Le schéma ci-dessous représente les principaux équipements d'un réservoir sous pression.

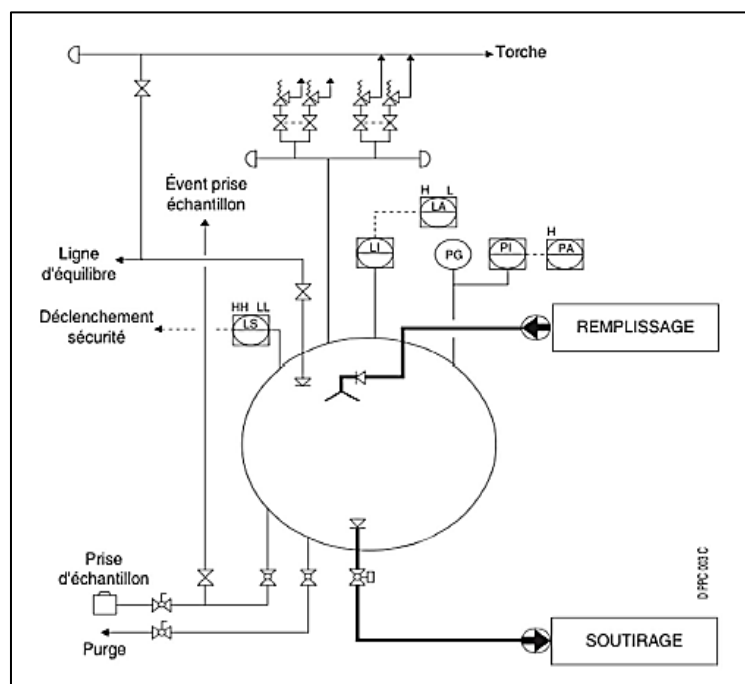


Figure 2.1 : Accessoires d'une sphère [49]

- La ligne de vidange située en partie inférieure.
- La ligne de remplissage située en partie inférieure (dans ce cas c'est souvent la même ligne que la vidange) ou en partie supérieure.
- Une ligne éventuelle d'équilibre en phase gaz reliée à un autre stockage.
- Les mesures et les alarme de niveaux, de température et de pression.
- Les alarmes de niveaux et de pression.
- Les soupapes de sûreté contre les surpressions et sécurité feu.
- Les systèmes de protection anti-incendie.
- Les sécurités complémentaires des canalisations d'exploitation en phase liquide [49].

NB : on trouve les mêmes équipements pour les cigares.

➤ **Stockages sous talus (Réservoirs sous talus : RST)**

Il s'agit de réservoirs dont les parois sont recouvertes avec une couche protectrice à l'égard des effets thermiques et mécaniques. Cette couche protectrice a une épaisseur minimale de 1 m de matériau dense et inerte (terre, sable, matériau composite).

Généralement tous les piquages et canalisations débouchent de la paroi en partie haute ce qui nécessite des pompes de soutirage immergées.

• **Sphère sous talus**

La sphère est abritée sous un cocon autoporteur ou talus en "Texsol" : mélange de sable et de fils polyester (à raison de 130 km de fil par m³, soit 3 kg/m³) de masse volumique 1,9 t/m³.

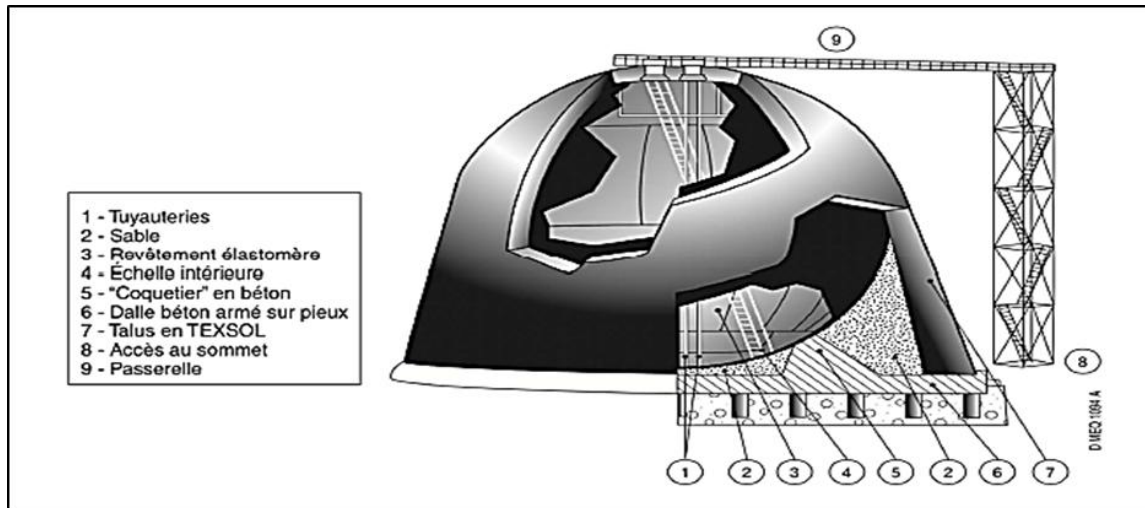


Figure 2.2 : Sphère sous talus [49]

La sphère repose sur un "coquetier" en béton. Cette dalle repose sur 84 pieux forés à 30 m de profondeur.

L'ensemble des équipements est positionné sur trois trous d'homme de 30 cm de diamètre situés au sommet de la sphère. Le transfert vers les autres sphères du dépôt s'effectue par 2 tuyauteries de 8 cm en phase liquide et une tuyauterie de 4 cm en phase gazeuse [49].

Sphère existante :

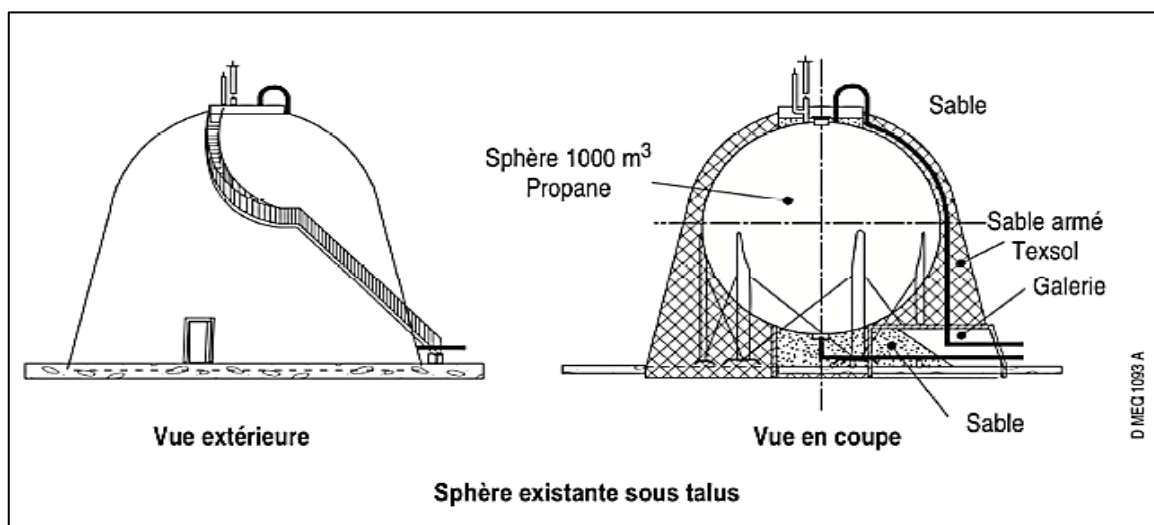


Figure 2.3 : Sphère sous talus [49]

- **Réservoir cylindrique sous talus**

Après construction, ils sont protégés par un revêtement spécial puis recouvert (à l'exception des trous d'homme des tuyauteries ou de visite) de sable ou de terre compactés (2 t/m^3 à $2,3 \text{ t/m}^3$).

Il repose soit sur un lit de sable ou bien sur des supports [49].

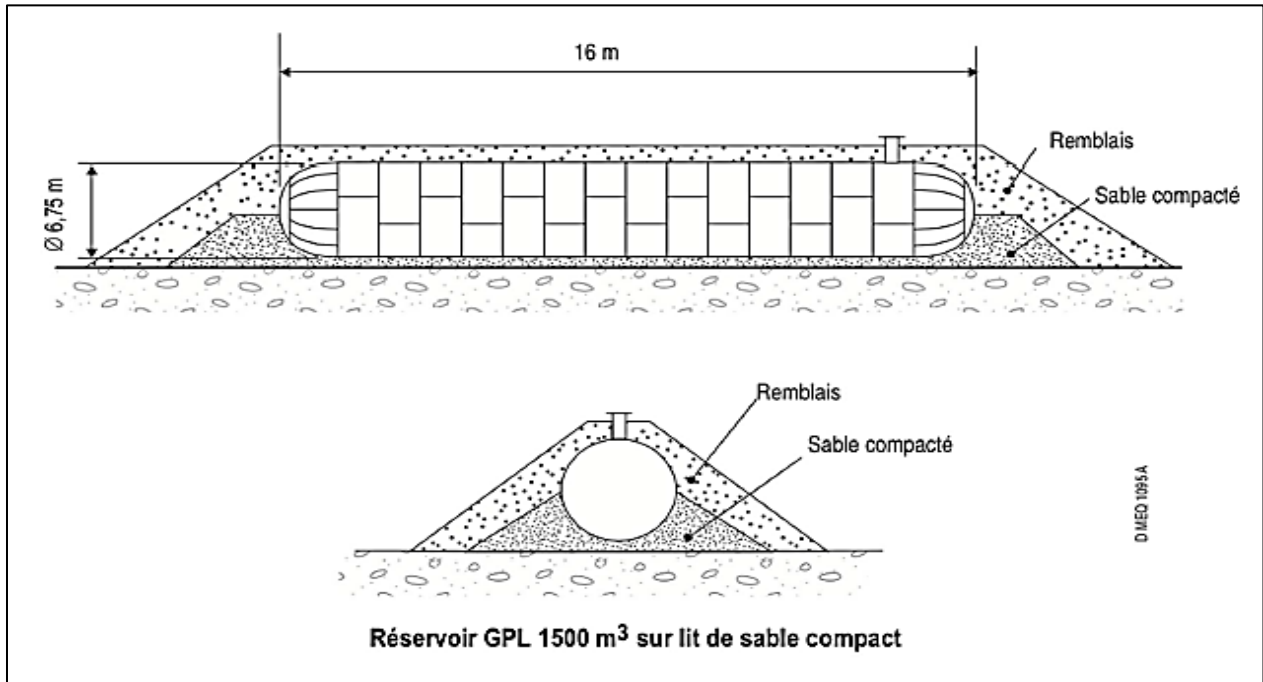


Figure 2.4 : Réservoir cylindrique sous talus [49]

➤ **Stockages réfrigérés sous pression**

Dans l'état actuel des techniques, les stockages réfrigérés sont essentiellement aériens et concernent les sphères et les cigares. Ils sont bien entendu calorifugés.

Le stockage à basse température du produit provoque en continu une légère évaporation qui permet de maintenir la température constante. Comme pour les stockages cryogéniques, les vapeurs émises doivent être re-condensées pour minimiser les pertes [49].

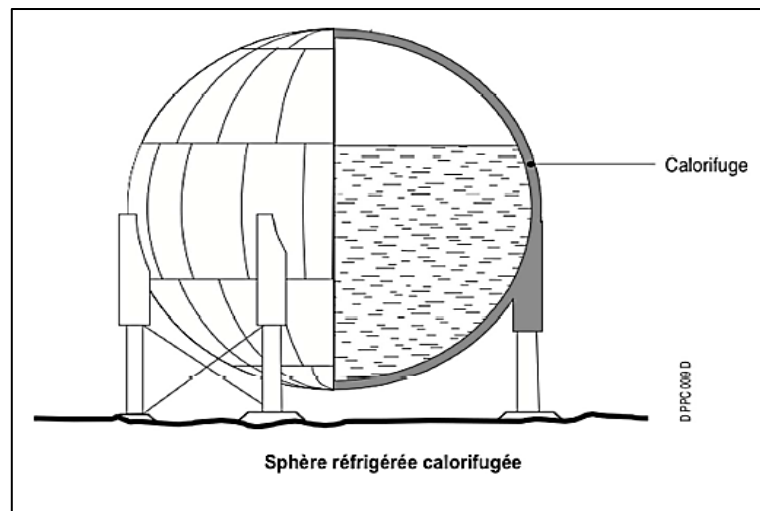


Figure 2.5 : Sphère réfrigérée calorifugée [49]

➤ Stockages cryogéniques

Ce mode de stockage n'est pas trop utilisé pour le stockage des GPL, il est généralement réservé au stockage du GNL (gaz naturel liquéfié) [49].

2.10. Risques inhérents à l'utilisation du GPL

Le GPL est stocké sous pression dans des réservoirs en acier. Il convient de maintenir son confinement et d'éviter son échauffement. Compte tenu de ses caractéristiques physiques et chimiques, les risques seront consécutifs à des fuites suite à une défaillance de l'installation, à l'endommagement accidentel d'une partie de l'équipement GPL, à une manipulation malencontreuse lors d'une intervention sur le véhicule, ou à des ruptures liées à l'augmentation de la température des récipients de stockage.

2.10.1. Risques dus à la vaporisation

À l'air libre, à la pression atmosphérique, la vaporisation se produit à environ -30°C (température d'ébullition). La phase liquide, au contact de la peau, provoque des brûlures (rougeur, cloque...) dues à sa très basse température. La phase gazeuse, à haute dose, peut avoir un effet légèrement anesthésiant et/ou asphyxiant (par déplacement de l'oxygène).

2.10.2. Risques dus aux fuites

Qu'il soit en phase liquide ou gazeuse, le GPL est très fluide. Le risque de fuites existe et peut être à l'origine d'incendie et d'explosion. Ces risques seront particulièrement élevés dans les

parties basses ou les espaces confinés, là où le GPL, plus lourd que l'air, en s'accumulant, pourra atteindre sa limite inférieure d'inflammabilité.

2.10.3. Risques dus à un échauffement

La pression du GPL dépend exclusivement de la température. Un fort échauffement dû à une cause externe (incendie, soleil, séchage en cabine de peinture...) conduit à une augmentation de la pression interne dans le réservoir ainsi qu'à un accroissement du volume occupé par la phase liquide lié à sa dilatation. Ces deux phénomènes peuvent entraîner l'éclatement du récipient. Pour ces raisons, les réservoirs sont équipés d'un dispositif limiteur de surpression (soupape), une augmentation anormale de la pression interne entraînant l'ouverture de ce dispositif [50].

2.11. Situation Algérienne de GPL

2.11.1. Industrie du GPL en Algérie

Durant la dernière décennie, l'industrie algérienne des GPL a connue des changements profonds, notamment en matière de production, d'exploitation et dans les activités de transport maritime.

Le programme de valorisation des ressources gazières lancé au début des années 90 fait bénéficier aujourd'hui SONATRACH de disponibilités importantes de GPL. Depuis la mise en exploitation du champ gazier de HAMRA en 1996, la production des GPL en Algérie a suivi une croissance soutenue.

Quelques chiffres peuvent illustrer cette dynamique. La production est passée de 5,05 millions de tonnes en 1996 à plus de 7.3 millions de tonnes en 1998 et devait clôturer dans année (2014) à plus de 14 millions de tonnes. Un pic de 17 millions de tonnes sera atteint en 2020 lorsque les projets développés auront été mis en service [51].

2.11.2. Offre nationale de GPL

Dans les pays pétrolier et gazier comme l'Algérie, l'industrie des GPL est méconnue du grand public. En Algérie la majeure partie du GPL provient des champs pétroliers (79%) suite à la séparation du gaz et du traitement du pétrole brut, soit 4.35 millions de tonnes, L'autre partie est produite au niveau des raffineries du pétrole de Skikda ; Alger et Arzew (10%).

L'Algérie est l'un des leaders mondiales du GPL, avec une production annuelle qui avoisine les 10.5 millions de tonnes en 2009 (contre 5 millions en 1996) dont 2 millions est consommé localement sous forme du butane et de propane est distribué en Algérie par Naftal depuis 1983 sous le nom commercial déposé « SIRGHAZ » [40].

2.12. Installation GPL

Le circuit d'alimentation d'un moteur fonctionnant au gaz liquide se compose d'un réservoir, d'un filtre, d'un régulateur de pression, d'un vaporisateur, d'un carburateur et des canalisations correspondantes.

Le prélèvement s'effectue au moyen d'une tubulure plongeante au fond du réservoir, où le gaz se trouve toujours à l'état liquide. La partie supérieure ne contient que des vapeurs qui ne permettraient pas au moteur de fonctionner aux hauts régimes.

Enfin, si l'on prélevait le GPL dans la partie supérieure du réservoir, la composition du gaz liquide restant s'enrichirait graduellement de butane, du fait de l'évaporation plus rapide du propane. On obtiendrait ainsi une diminution de pression dans le réservoir et une diminution du nombre d'octane du combustible. En puisant le GPL liquide au fond du réservoir, le mélange reste donc pratiquement constant. Le GPL traverse un premier filtre puis passe toujours à l'état liquide, dans la partie à haute pression du régulateur (régulateur primaire) où la pression est ramenée à des valeurs variant entre 0,3 et 0,7 kg/cm², contre 10 à 14 kg/cm² dans le réservoir.

Il passe ensuite dans le «vaporisateur» (généralement incorporé au régulateur de pression) : il s'agit d'un serpentín immergé dans l'eau chaude provenant du moteur, dans lequel le GPL se transformera en gaz.

Ce gaz entre ensuite dans la partie à basse pression du régulateur (régulateur secondaire), qui ramène la pression à une valeur légèrement inférieure à la pression atmosphérique (5 mm environ d'eau). La régulation de cette dépression est fondamentale pour réaliser un dosage correct du combustible dans le carburateur. Le régulateur sera sensible aux variations de la pression atmosphérique et à la température agissant de façon telle que la pression finale soit toujours légèrement inférieure à la pression atmosphérique pour éviter que le gaz ne s'échappe librement dans l'atmosphère pendant le fonctionnement du moteur.

Du régulateur secondaire, le combustible passera dans le carburateur où s'effectuera le mélange avec l'air qui sera aspiré dans le conduit d'admission [52].

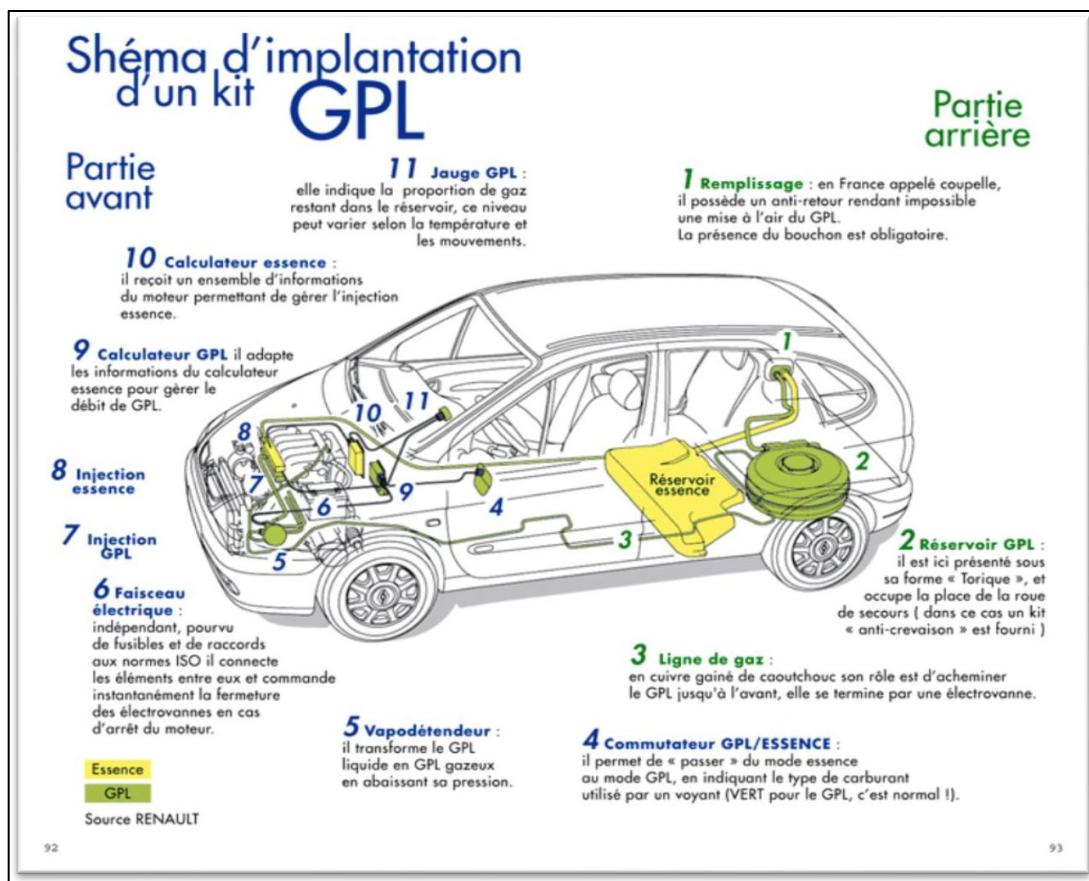


Figure 2.6 : Schéma d'implantation d'un kit GPL [53]

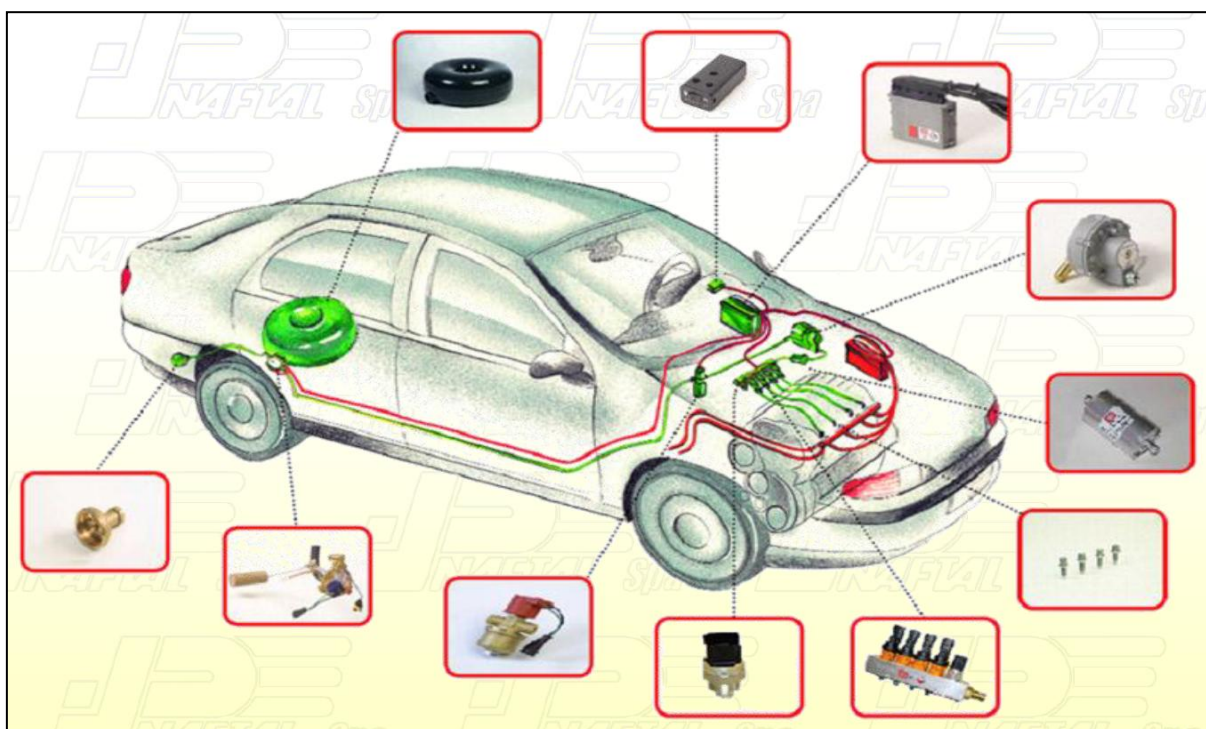


Figure 2.7 : Kit de conversion GPL-C de type BRC [54]

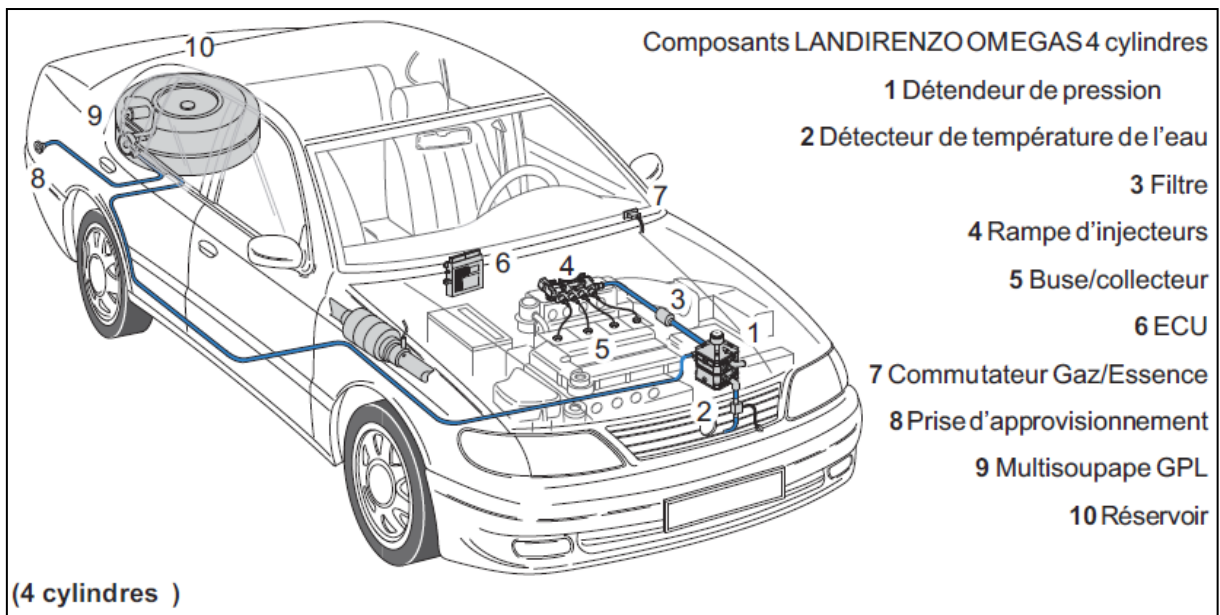


Figure 2.8 : Kit de conversion GPL-C de type LANDIRENZO [55]

2.12.1. Principe de fonctionnement

Le passage en mode GPL se fait par l'intermédiaire d'un interrupteur (4) situé sur le tableau de bord. Le témoin (3) rappelle au conducteur le mode de carburant utilisé. Le démarrage du moteur s'effectue en mode essence quelle que soit la position de l'interrupteur. La commutation en mode GPL s'effectue lorsque la température du moteur est supérieure ou égale à 15°C.

Le GPL liquide provenant du réservoir se vaporise au travers du vaporisateur-détendeur (6), celui-ci est réchauffé par l'intermédiaire du circuit de refroidissement du moteur. Asservi à la pression de la tubulure d'admission, il module le débit de gaz envoyé au doseur distributeur (19).

Ainsi, le GPL à l'état gazeux est distribué aux injecteurs (17) par l'intermédiaire du doseur distribue (19).

Le calculateur (1) exploite les informations des différents capteurs et sondes (11-13-14-15-18) et pilote le doseur distributeur par l'intermédiaire d'un moteur «pas à pas» et ainsi module la quantité de gaz à injecter. L'injection s'effectue de façon simultanée sur tous les cylindres.

Le calculateur GPL est équipé d'un autodiagnostic permettant de signaler et d'identifier les défauts [56].

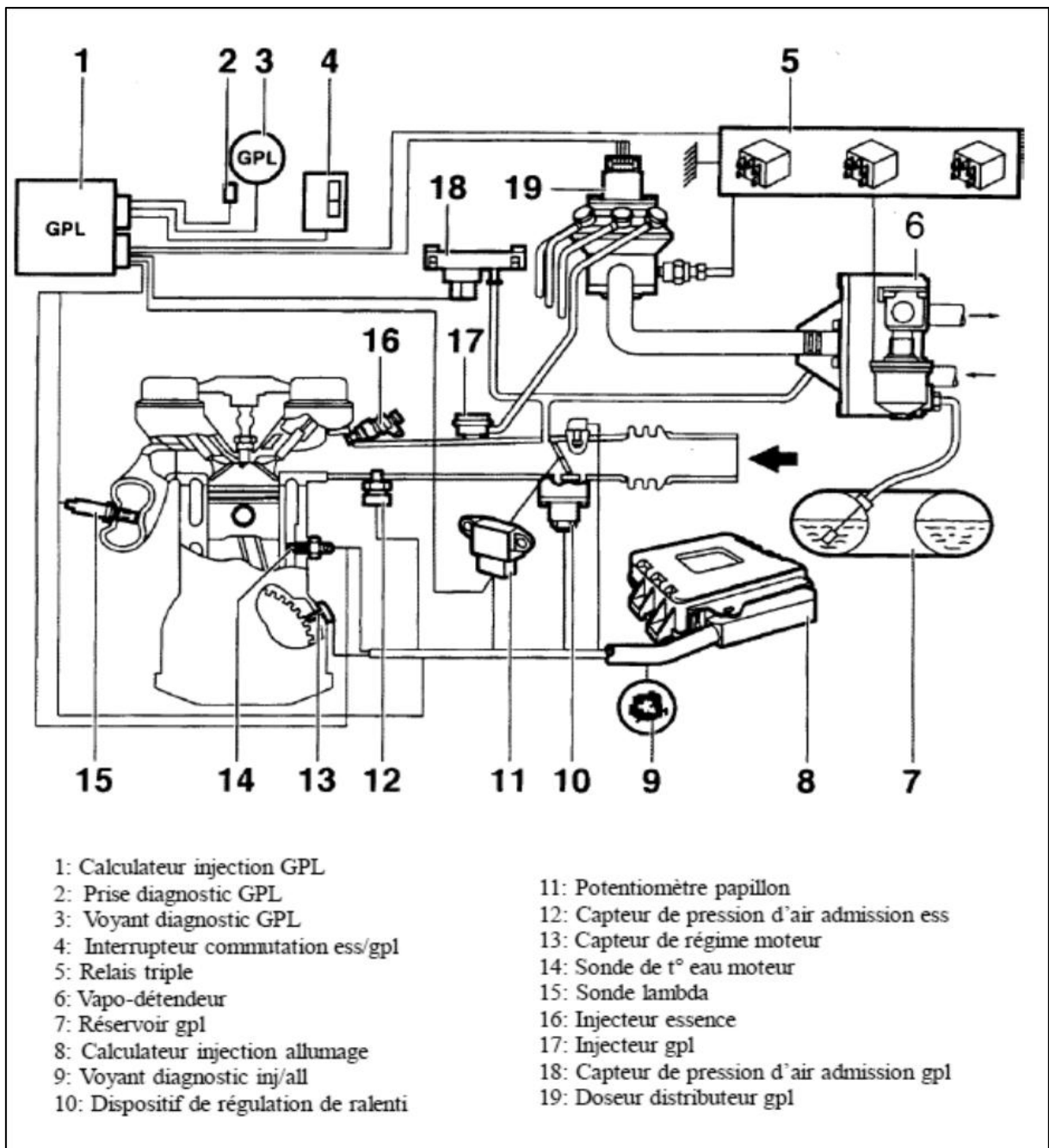


Figure 2.9 : Schéma de principe d'un système d'alimentation GPL [56]

2.13. Sécurité maximale pour les véhicules GPL

En raison de rares très médiatisés par le passé, le GPL a longtemps souffert d'une mauvaise image en terme de sécurité. Pourtant, rouler au GPL est aussi sûr que de rouler avec un véhicule essence. Aujourd'hui, les voitures GPL présentent des garanties de sécurité maximales.

2.13.1. Réservoir GPL ultra résistant

Conçu en acier, un réservoir GPL possède des parois 6 fois plus épaisses qu'un réservoir essence ou diesel. Entièrement étanche, un réservoir GPL résiste à des pressions supérieures à 30 bars, alors que la pression d'utilisation n'excède pas les 5 bars. Un réservoir GPL résistait aux flammes pendant plus d'une demi-heure là où un réservoir d'essence explosait après seulement 5 minutes.

2.13.2. Accessoires de sécurité sur les véhicules GPL

Depuis 2001, les équipements de GPL sont réglementés au niveau européen. Aussi, quelle que soit sa forme, un réservoir GPL doit obligatoirement être équipé de 5 accessoires de sécurité: un clapet anti-retour, un limiteur de remplissage à 80%, un limiteur de débit, une électrovanne et une soupape de sécurité [52].

2.14. Bicarburant essence-GPL

Une voiture équipée du GPL est à **bicarburant** : elle comporte un réservoir essence et un réservoir GPL.

Les deux réservoirs alimentent ensuite successivement le moteur du véhicule, en fonction des réserves de carburant disponibles.

Parce qu'il est équipé de deux réservoirs distincts, le véhicule GPL est doté d'une plus forte autonomie (plus de 1000 km) qu'un véhicule thermique 100% essence ou diesel. Cette technologie n'est pas contraignante : non seulement il est aujourd'hui facile de faire le plein de GPL mais si jamais le réservoir dédié est vide, le véhicule fonctionnera comme n'importe quelle voiture essence [57].

2.14.1. Composition du système

Toutes les voitures roulant au GPL ont donc des moteurs "essence", auxquels s'ajoutent des équipements spécifiques GPL :

- Un réservoir (souvent installé à la place ou à côté de la roue de secours pour éviter les pertes de place dans le coffre) ;
- Une soupape de sécurité (qui vous permet de vous garer partout, même dans les parkings souterrains, sans aucune restriction) ;
- Un bouchon de remplissage (au même endroit que celui pour l'essence) ;
- Des canalisations ;
- Des injecteurs ou un rail d'injecteurs ;

- Un calculateur électronique (fonctionnant avec le calculateur essence pour réguler le débit de GPL) ;
- Un vaporiseur-détendeur (transformation du GPL liquide en GPL) ;
- Un commutateur de carburant (permettant de passer de l'essence au GPL ou inversement) ;
- Une jauge.

Ces voitures peuvent être directement achetées en "bicarburant" ou transformées par des installateurs spécialisés grâce à un kit GPL, même si la voiture n'avait qu'un moteur fonctionnant à l'essence lors de son achat.

2.14.2. Mode d'injection

Il existe deux modes d'alimentation GPL : gazeuse et liquide.

➤ **Injection gazeuse**

- Fonctionnement :

Même fonctionnement que pour la carburation essence classique (chapitre 1)

- Démarrage :

Tout d'abord, on doit commencer à rouler avec le moteur essence, une fois que ce dernier est chaud, on bascule sur le moteur GPLc.

➤ **Injection liquide**

- Fonctionnement :

Fonctionnement similaire aux moteurs à injections (directes ou indirectes) sur la plupart des voitures neuves « bicarburant » (essence + GPL).

- Démarrage :

Directement on démarre notre voiture sur le moteur GPL [58].

2.14.3. Avantages et inconvénients de la bicarburant

Plus de huit millions de véhicules roulent au GPL dans le monde, dont trois millions uniquement qu'en Europe et environ 250.000 en France. Plus de 1 650 stations-service proposent aujourd'hui des pompes distribuant du GPL, c'est un peu moins que pour le super-éthanol E85, dont le nombre de pompes n'a cessé de croître ces dernières années (2 000 actuellement). Contrairement à ce dernier, qui peut être versé directement dans le réservoir d'origine pour les véhicules à essence (sans-plomb), le GPL impose l'installation d'un second réservoir de carburant séparé capable de supporter des pressions allant jusqu'à 30 bars

(pression d'usage entre 4,5 et 20 bars). La bascule entre le GPL et l'essence se fait simplement en appuyant sur un bouton dédié à cet effet ou parfois automatiquement.

➤ **Avantages**

Les véhicules en bicarburation essence-GPL permettent de rejeter moins de CO₂ par rapport à un moteur essence équivalent, ils émettent par exemple 18 % de moins de CO₂ au kilomètre en moyenne et dix fois moins de particules fines. Ceci suffit au gouvernement pour considérer le GPL comme un carburant "propre" et donc de donner aux véhicules compatibles avec ce carburant certains avantages fiscaux comme l'exonération totale ou partielle des frais de carte grise. L'absence de résidus lors de la combustion du GPL (ni encrassement, ni dépôt de calamine) profite également à la longévité de la mécanique, permettant même un espacement des vidanges en utilisation quotidienne.

Évidemment, l'un des principaux aspects attractifs avec le GPL reste l'économie financière réalisée lors d'un plein, avec un prix moyen à la pompe de 0,86 €/litre en octobre 2020 contre 1,35 €/litre en moyenne pour le sans plomb 95. Les véhicules équipés au GPL sont également étudiés pour que le réservoir de gaz n'explose pas en cas de collision ou d'incendie, un point important qui pourrait refroidir de futurs acheteurs. Des normes de sécurité drastiques sont maintenant appliquées. Enfin, si convertir votre véhicule thermique à la bicarburation essence-GPL n'est pas toujours bon marché (entre 2 500 € et 4 000 € en moyenne), le surcoût à l'achat d'un véhicule neuf avec une motorisation déjà prévue pour l'utilisation du GPL reste limité. Chez Dacia par exemple, une Sandero Stepway avec un moteur TCe de 100 ch (essence) coûte exactement le même prix que le même modèle avec le moteur Eco-G de 100 ch (GPL-essence) soit à partir de 2276300 DA (13 390€)

➤ **Inconvénients**

Si les avantages de la bicarburation essence-GPL sont nombreux, certains inconvénients subsistent cependant. Premièrement, une adaptation technique du moteur doit être entreprise pour les personnes souhaitant convertir leur véhicule au GPL, pour un coût non négligeable. Le remplissage des cylindres n'étant pas optimal avec le GPL par rapport à l'essence, l'utilisateur subit une légère baisse de la puissance maximale de son moteur. Quasiment imperceptible sur les modèles de forte puissance, cette perte peut être plus handicapante sur les véhicules essence de faible puissance convertis post-production. Ne pas oublier également que la consommation volumique de carburant est plus importante de 20% en moyenne avec le GPL. Un véhicule consommant environ 5 litres/100 km de sans plomb 95 par exemple, sa consommation augmentera à environ de 6 litres/100 km.

Le stockage du carburant sous pression impose l'utilisation de pompes et de pistolets spécifiques, impossible par exemple de remplir un jerrican de GPL pour des raisons évidentes. De plus, un adaptateur est souvent nécessaire pour se fournir en GPL dans les pays étrangers. Enfin, certains installateurs professionnels choisissent de placer le réservoir de GPL additionnel dans le coffre des véhicules entraînant une diminution du volume de celui-ci. Dans ce cas en revanche, l'autonomie du véhicule augmente drastiquement si le réservoir d'essence d'origine est conservé. Nombreux sont ces inconvénients qui peuvent donc être évités en se tournant vers un véhicule à bi-carburant essence-GPL neuf, mais le choix reste très limité et ils sont légèrement plus chers [59].

2.15. Conclusion :

Incontestablement, le gaz (GNL ou GPL) représente le cœur de l'énergie dans le monde. GPL est une source d'énergie propre et immédiatement disponible qui peut être utilisée pratiquement n'importe où, en émettant 35% moins de CO₂ que le charbon et 12% moins que le naphta. Il n'émet aussi presque aucun carbone [60].

Les GPL offre des avantages de l'environnement significatif, particulièrement du point de vue de la qualité de l'air. Il est caractérisé par les émissions de particule basses comme NO_x, les émissions de faible teneur en soufre [60].

Finalement, on peut conclure que les GPL peuvent être utilisés dans tous les secteurs en tant que combustible (dans la pétrochimie en tant que charge et dans le secteur de transport en tant que carburant et pour la production d'électricité).

Chapitre 3:
Formulations Mathématiques
et code de calcul CFD
CONVERGE

Chapitre 3 Formulations Mathématiques et code de calcul CFD CONVERGE

3.1. Introduction

Les contraintes actuelles, tant écologiques qu'économiques, forcent les constructeurs automobiles à effectuer des travaux de recherche liés à la combustion turbulente et ses applications. De ce fait il est nécessaire de comprendre les processus physique et chimique prépondérants au sein d'une chambre de combustion permettent non seulement l'amélioration des systèmes actuels mais aussi le développement de nouvelles technologies.

Dans ce contexte, l'utilisation de l'outil numérique permet de réduire les coûts et les temps d'études. Il est très simple de modifier numériquement la géométrie ou les conditions d'utilisation (pression, température...). Les investigations réalisées avec les codes CFD (Computational Fluid Dynamics) par exemple CONVERGE, KIVA, Fluent et CFX... permettent alors de tester un grand nombre de solutions pour ne retenir que les plus pertinentes pour des tests expérimentaux. Dans le cadre de la modélisation de la combustion turbulente, l'utilisation d'un code de calcul comme CONVERGE CFD représente une bonne démarche de compréhension et de prédiction des phénomènes qui se manifestent à l'intérieur du cylindre d'un moteur à combustion interne alimenté par un biocarburant [61].

Nous avons utilisé, dans le cadre de ce travail et grâce à un programme de coopération, le code CFD Converse V2.3, qui a été développé à l'université de Middleton, Wisconsin en 2008 [62].

3.2. Équations de l'aérothermochimie turbulente

La simulation numérique d'un problème de combustion vise la résolution des équations de l'aérothermochimie. Il s'agit du système composé des équations de conservation de la masse, de conservation de la quantité de mouvement, de conservation des espèces chimique et de conservation de l'énergie [63].

3.2.1. Équation de continuité de l'espèce chimique m

La détermination de la fraction massique pour chaque espèce, m , s'obtient par la solution de l'équation de transport de la I^{ème} espèce, sous la forme [63]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m u) = \nabla \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}^s \delta_{m1} \dots \dots \dots (3.1)$$

Où :

ρ_m est la masse volumique de l'espèce m ,

ρ est la masse volumique du mélange,

u est la vitesse du mélange,

D est le coefficient de diffusion,

$\dot{\rho}_m^c$ regroupe les termes sources d'origine chimique,

$\dot{\rho}^s$ regroupe les termes sources provenant du spray.

On suppose que toutes les espèces ont des diffusivités égales, données par $D = \frac{\mu}{\rho S_C}$

μ est la viscosité dynamique,

S_C est le nombre de Schmidt (le nombre de Schmidt compare les effets de la viscosité et de la diffusion du fluide), $S_C = \frac{\nu}{D}$.

3.2.2. Equation de conservation de la masse

Par sommation des équations (3.1) sur toutes les espèces, on obtient l'équation de la conservation de la masse totale du fluide [63].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = \dot{\rho}^s \dots\dots\dots (3.2)$$

3.2.3. Equation de quantité de mouvement

Les équations moyennes de conservation de la quantité de mouvement découlent de la seconde loi fondamentale de la dynamique et donné par [63]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla(\rho u_i u_j) = -\frac{1}{\alpha^2} \nabla p - A_0 \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \nabla \sigma + F^S + \rho g \dots\dots\dots (3.3)$$

Où p est la pression du fluide. La quantité α est utilisée en conjonction avec la méthode de l'échelle de gradient de pression PGS (Pressure Gradient Scaling). Cette méthode parait efficace pour les faibles nombres de Mach.

Dans l'équation (3.3) la quantité A_0 est égale à zéro pour les écoulements laminaires et à l'unité si un modèle de turbulence est utilisé. Le tenseur des contraintes visqueuses est de forme newtonienne [63]:

$$\sigma = \mu [\nabla u + (\nabla u)^T] + \lambda \nabla \cdot u \dots\dots\dots (3.4)$$

Les deux coefficients de viscosité μ et λ , seront définis dans ce qui suit. L'exposant T indique la transposée d'une matrice et I représente la matrice unité. F^S est le gain du taux de quantité de mouvement par unité de volume dû au spray. La force d'inertie g est considérée constante [63].

3.2.4. Équation de conservation de l'énergie

L'équation de l'énergie interne E est, exclusive à l'énergie chimique [63]:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla(\rho u E) = -p \nabla \cdot u - \nabla J + (1 - A_0) \sigma : \nabla u + A_0 \rho \varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^S \dots (3.5)$$

Le vecteur du flux thermique J est la somme des contributions dues à la conduction thermique et à la diffusion de l'enthalpie :

$$J = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \dots \dots \dots (3.6)$$

Où T est la température du fluide et h_m l'enthalpie spécifique de l'espèce m , K est la conductivité thermique. K est calculé à partir du nombre de Prandtl et la chaleur spécifique à pression constant C_p

La chaleur spécifique des espèces C_{p_m} comme les enthalpies spécifiques h_m dans l'équation (3.6) sont obtenues à partir des tables de JANAF en fonction de la température. Le terme $\rho \varepsilon$ de l'équation (3.5) représente la dissipation visqueuse, où ε est le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.

Deux termes sources surgissent dans l'équation (3.5) : \dot{Q}^c due à la chimie et \dot{Q}^S due au spray [63].

3.3. Approche de RANS

La méthode RANS constitue un outil performant et moins complexe dans l'étude des écoulements réactifs, particulièrement adaptées à l'étude du comportement instationnaire des écoulements turbulents. Il est aujourd'hui l'outil le plus utilisé car son coût de mise en place est le plus faible. La méthode RANS consiste à décomposer chaque variable de l'écoulement en la somme de sa moyenne d'ensemble (moyenne de Reynolds) et de sa fluctuation [64,65]:

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \dots \dots \dots (3.7)$$

$$\bar{\Phi} = \lim_{N_s \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^{N_s} \frac{\Phi^{(m)}}{N_s} \dots\dots\dots (3.8)$$

En appliquant cette opération de décomposition aux équations de conservation, un terme représentant la composante turbulente de l'écoulement apparait. La fermeture du problème consiste à le modéliser [64,65].

Dans le cas des écoulements compressible, Favre a proposé:

$$\tilde{\Phi} = \frac{\bar{\rho}\Phi}{\bar{\rho}} \dots\dots\dots (3.9)$$

Avec :

$$\Phi = \tilde{\Phi} + \Phi' , \bar{\rho}\tilde{\Phi} = \bar{\rho}\Phi + \overline{\rho'\Phi'} \dots\dots\dots (3.10)$$

La décomposition de FAVRE appliquée aux équations (3.1), (3.2), (3.3) et (3.5) donne un nouveau système d'équation, semblable au système initial (avec la densité des espèces $\rho_i = \rho Y_i$).

Y_i : est la fraction massique de l'espèce i .

3.3.1. Equation de continuité de l'espèce m

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{Y}_m \tilde{\vec{u}}) = \nabla \cdot [\overline{\rho D \nabla Y_m} - \overline{\rho \vec{u}' Y'}] + \overline{\rho \dot{Y}_m^c} + \overline{\rho \dot{Y}_m^s} \dots\dots (3.11)$$

3.3.2. Equation de conservation de la masse total

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\vec{u}}) = \overline{\dot{\rho}_m^s} \dots\dots\dots (3.12)$$

3.3.3. Equation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{\vec{u}}) = \nabla \cdot [\overline{\vec{\sigma}} - \overline{\rho \vec{u}' \vec{u}'}] - \nabla \tilde{p} + \overline{\vec{F}^s} + \bar{\rho} \tilde{\vec{g}} + A_0 + \nabla \cdot (\frac{2}{3} \rho k) \dots (3.13)$$

3.3.4. Equation de conservation de l'énergie interne

$$\frac{\partial \bar{\rho} E}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{E}) = -\tilde{p} \nabla \cdot \tilde{\vec{u}} - \nabla \cdot (\overline{\vec{j}} + \overline{\rho \vec{u}' \vec{E}'}) + A_0 \bar{\rho} \tilde{\epsilon} + \overline{Q^c} + \overline{Q^s} \dots\dots\dots (3.14)$$

3.4. Les sous modèles physiques

Les termes qui apparaissent dans les équations moyennées présentent des termes supplémentaires qui posent un problème de fermeture du système d'équations. Le nombre d'inconnues devenant plus grand que le nombre d'équations, nous avons donc besoin de modèles de turbulence qui permettent d'estimer les contraintes de Reynolds afin de fermer le système d'équations à résoudre.

3.4.1. Modèle de Turbulence k-ε

L'approche consiste à représenter les propriétés de la turbulence à l'aide d'échelles de vitesse et de longueur caractéristiques des fluctuations. L'échelle de vitesse est obtenue par l'intermédiaire de l'énergie cinétique turbulente (k). L'échelle de longueur est obtenue par l'intermédiaire de taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (ϵ).

Quand ce modèle de turbulence est utilisé ($A_0 = 1$), deux équations de transport additionnelles sont résolues pour l'énergie cinétique k et son taux de dissipation ϵ .

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{k}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{k}) = -\frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} \nabla \cdot \tilde{u} + \bar{\sigma} : \nabla \tilde{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{pr_k} \right) \nabla \tilde{k} \right] - \bar{\rho} \tilde{\epsilon} + \overline{W^s} \dots \dots \dots (3.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\epsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{\epsilon}) = & - \left(\frac{2}{3} C_{\epsilon 1} - C_{\epsilon 3} \right) \bar{\rho} \tilde{\epsilon} \nabla \cdot \tilde{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{pr_{\epsilon}} \right) \nabla \tilde{\epsilon} \right] + \frac{\tilde{\epsilon}}{k} [C_{\epsilon 1} \bar{\sigma} : \nabla \tilde{u} - \\ & C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \tilde{\epsilon} + C_s \overline{W^s}] \dots \dots \dots (3.16) \end{aligned}$$

Ce sont les équations k - ϵ standards avec quelques termes additionnels. Le terme source $(C_{\epsilon 3} - \frac{2}{3} C_{\epsilon 1}) \nabla \cdot \tilde{u}$ dans l'équation (3.16) explique le changement de l'échelle des longueurs en présence d'une vitesse de dilatation. Le terme source $\overline{W^s}$ est dû à l'interaction avec la vapeur.

➤ Modèle de turbulence RNG k-ε

Un nouveau modèle appelé modèle *RNG k-ε*, 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. La principale différence vient des constantes qui ne sont plus déterminées expérimentalement mais calculées théoriquement [65].

$$\frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\bar{\rho} \vec{u} \varepsilon) = - \left(\frac{2}{3} C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 3} - \frac{2}{3} C_{\mu} C_{\eta} \frac{k}{\varepsilon} \nabla \vec{u} \right) \bar{\rho} \varepsilon \cdot \nabla \vec{u} + \nabla \left[\left(\frac{\mu_{eff}}{Pr_{\varepsilon}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} [(C_{\varepsilon 1} - C_{\eta}) \bar{\sigma} : \nabla \vec{u} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} + C_s \overline{W^s}] \dots (3.17)$$

Avec :

$$C_{\eta} = \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \dots (3.18)$$

$$\eta = \frac{S k}{\varepsilon} \dots (3.19)$$

$$S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2} \dots (3.20)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \dots (3.21)$$

Tableau 3.1 : Valeurs des constantes dans les modèles RNG k-ε [66]

Constant	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$	c_s	c_{ps}	Pr_k	Pr_{ε}	η_0	β	c_{μ}
Standard k-ε	1.44	1.92	-1.0	1.5	0.16432	1.0	1.3	-	-	0.09
RGN k-ε	1.42	1.68	-1.0	1.5	0.164	0.71	0.719	4.38	0.012	0.084

3.4.2. Modélisation du spray

Dans les moteurs à essence ou diesel à injection directe, le carburant est introduit dans la chambre de combustion par l’injecteur. Le jet liquide issu de l’orifice de l’injecteur se pulvérise et doit ensuite être réduit-en de fines gouttelettes qui vont s’évaporer facilement et ainsi favoriser le mélange air/carburant et la combustion. Transformer le jet liquide en “ nuage de gouttelettes c’est l’atomiser. Cette transformation s’effectue en deux étapes. Le fractionnement primaire et le fractionnement secondaire. Les gouttelettes injectées dans le cylindre peuvent subir un ou plusieurs processus à savoir, l’atomisation et l’évaporation. Par conséquent, sont exigés des modèles qui décrivent ces processus (atomisation et évaporation).

3.5. Équations de la phase liquide

Dans les moteurs à combustion interne à injection directe, le carburant est introduit dans la chambre de combustion par l'injecteur. Le jet liquide issu de l'orifice de l'injecteur se pulvérise et doit ensuite être réduit en de fines gouttelettes qui vont s'évaporer facilement et ainsi favoriser le mélange (air/carburant) et la combustion. Transformée le jet liquide en " spray" (nuage de gouttelettes) c'est l'atomiser. Cette transformation s'effectue en deux étapes. Le fractionnement primaire du jet produit des gouttes directement à partir de la colonne liquide. Le fractionnement secondaire divise ces gouttes issues du fractionnement primaire en gouttes encore plus petites. Les gouttelettes injectées dans le cylindre peuvent subir un ou plusieurs processus à savoir, l'atomisation, la collision et l'évaporation. Par conséquent, sont exigés des modèles qui décrivent ces processus (atomisation, collision, et évaporation) [67].

3.5.1. Modèles d'atomisation

Au cours des années, plusieurs modèles d'atomisation primaire et secondaire ont été proposés. Dans les différentes versions du code CONVERGE 2.3 il existe plusieurs modèles pour l'atomisation du jet. On cite: Les modèles basés sur la croissance d'ondes de perturbation initiée en sortie d'injecteur (KH et RT) et ceux basés sur l'amplification de l'oscillation ou de la déformation d'une goutte (TAB), expliquées par les effets aérodynamiques. Même si ce modèle traite principalement le fractionnement secondaire des gouttes, il a été utilisé dans Converge pour l'atomisation primaire du jet. D'autres modèles comme KH-RT ont été implémentés dans Converge. Ce modèle donne les conditions initiales d'un modèle d'atomisation prenant en compte les instabilités de Kelvin-Helmholtz (KH) et Rayleigh-Taylor (RT), figure (3.1). Dans le cadre de notre étude, le modèle KH-RT est utilisé, à cause de grand nombre de Weber, de plus il offre la possibilité de simuler les deux processus de fractionnement Indépendamment [61, 68, 69].

➤ Modèle KH

La physique de l'atomisation à grand nombre de Weber est très complexe. Reitz (1987) [70]. Ce modèle de fractionnement primaire suppose que l'atomisation se produit du fait du développement d'instabilités de surface de type Kelvin Helmutz à la sortie de l'injecteur. En s'appuyant sur la théorie linéaire des instabilités, Reitz obtient la longueur d'onde Λ_{KH} et le

taux d'accroissement Ω_{KH} de l'onde qui croît le plus rapidement. En fonction des nombres adimensionnels du problème, Reitz obtient les corrélations suivantes :

$$\frac{\Lambda_{KH}}{r_0} = 9.02 \frac{(1+0.45Z_l^{0.5})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.87We_g^{1.67})^{0.6}} \dots\dots\dots (3.22)$$

$$\Omega_{KH} \left[\frac{\rho_l r_0^3}{\sigma} \right]^{0.5} = \frac{(0.34+0.38We_g^{1.5})}{(1+Z_l)(1+1.4T^{0.6})} \dots\dots\dots (3.23)$$

D'où :

$$T = Z_l \sqrt{We_g} \quad : \text{Nombre de Taylor,}$$

$$Z_l = \sqrt{\frac{We_l}{Re_l}} \quad : \text{Nombre d'Ohnesorge,}$$

$$We_g = \frac{\rho_g U^2 r_0}{\sigma} \quad : \text{Nombre de Weber gas,}$$

$$We_l = \frac{\rho_l U^2 r_0}{\sigma} \quad : \text{Nombre de Weber liquide,}$$

$$Re_l = \frac{U r_0}{\nu_l} \quad : \text{Nombre de Reynolds.}$$

Dans le modèle KH, le rayon des gouttelettes r , obtenu après un temps de rupture τ_{KH} est donné par :

$$r = B_0 \Lambda_{KH} \dots\dots\dots (3.24)$$

Et :

$$\tau_{KH} = \frac{3.726 B_1 r_0}{\Lambda_{KH} \Omega_{KH}} \dots\dots\dots (3.25)$$

Où B_0 est une constante prise égale à 0, 61 [68], la constante B_1 dépend du niveau des perturbations initiales dans le jet liquide et varie d'un injecteur à un autre. Reitz fixe cette constante, qui dépend de la géométrie de l'injecteur, à 10, la valeur typique dans Converge varie entre 5 et 100 [70].

Durant le processus de fractionnement, le rayon (initialement égal au rayon r_0) décroît pour atteindre le rayon de stabilité r_1 , suivant la loi :

$$\frac{dr_0}{dt} = - \frac{(r_0-r)}{\tau_{KH}}, r \leq r_0 \dots\dots\dots (3.26)$$

➤ **Modèle RT**

Le modèle RT fonctionne d'une manière légèrement différente. La longueur d'onde Λ_{RT} et le taux d'accroissement Ω_{RT} de l'onde en fonction des nombres adimensionnels sont données par (Xin et al. 1998) [71] :

$$\Lambda_{RT} = 2\pi \sqrt{\frac{3\sigma}{a(\rho_l-\rho_g)}} \dots\dots\dots (3.27)$$

$$\Omega_{RT} = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\sigma} \frac{[a(\rho_l-\rho_g)]^{3/2}}{\rho_l+\rho_g}} \dots\dots\dots (3.28)$$

Si le modèle hybride KH-RT est activé, la longueur L_b peut être écrite comme suivant [72]:

$$L_b = C_{bl} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} d_0 \dots\dots\dots (3.29)$$

Avec C_{bl} est la constante de la longueur de rupture.

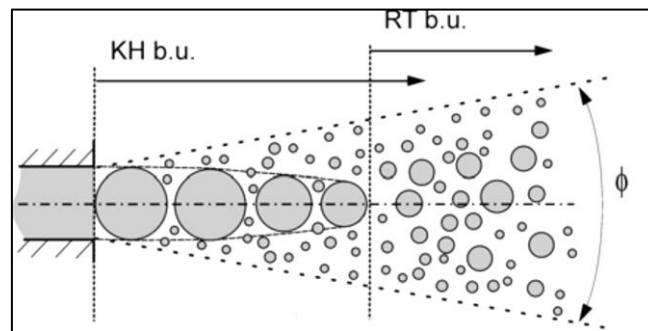


Figure 3.1 : Schéma de principe du modèle KH-RT [74]

3.5.2. Collision

La fréquence de collision d'une goutte avec l'ensemble des gouttelettes est donnée par O'Rourke en (1981) [73].

$$U_{coll} = \frac{N_2 \pi(r_1+r_2)V_{12}}{\vartheta} \dots\dots\dots (3.30)$$

N_2 est le nombre de gouttelettes, V_{12} est la vitesse relative entre gouttelettes, r_1 et r_2 sont les rayons des gouttelettes, respectivement, et est ϑ le volume de la phase gazeuse entre deux gouttelettes à colis. Afin de déterminer le résultat de collision, un paramètre d'impact critique b_{crit} est calculé avec l'expression [72] :

$$b_{crit} = (r_1 + r_2) \min\left(1.0 \frac{2.4f}{We_{coll}}\right) \dots\dots\dots (3.31)$$

Avec :

$$f = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3 - 2.4 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + 2.7 \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \dots\dots\dots (3.32)$$

Et We_{coll} est le nombre de Weber de la collision donnée par :

$$We_{coll} = \frac{\rho_L V_{12}^2 r_2}{\sigma} \dots\dots\dots (3.33)$$

3.5.3. Evaporation

Une fois que la pulvérisation de liquide est injectée dans le domaine de calcul, le modèle est nécessaire pour convertir le liquide en vapeur gazeuse [72]. Dans CONVERGE, le taux de temps de changement de rayon gouttelette due à la vaporisation est calculée à partir de la corrélation Frossling (Amsden et al. 1989) [75].

$$\frac{dr}{dt} = - \frac{\rho_g D}{2\rho_L r} B_d Sh_d \dots\dots\dots (3.34)$$

D est le coefficient de diffusion de la vapeur de liquide dans l'air.

$$B_d = \frac{Y_1^* - Y_1}{1 - Y_1^*} \dots\dots\dots (3.35)$$

Y_1^* est la fraction de masse de vapeur à la surface de la goutte, Sh_d est le nombre de Sherwood donnée par:

$$Sh_d = \left(2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}\right) \frac{\ln(1+B_d)}{B_d} \dots\dots\dots (3.36)$$

Y_1^* est donnée sous la forme suivante :

$$Y_1^* = \frac{M_{C_n H_{2m}}}{M_{C_n H_{2m}} + M_{mix} \left(\frac{P_{gas}}{P_v} - 1 \right)} \dots\dots\dots (3.37)$$

Où M_{mix} est la masse molaire du mélange, P_{gas} est la pression du gaz, et P_v est la tension de vapeur [65].

3.6. Modèle du transfert thermique (Loi de paroi)

Les modèle Han et Reitz [76] est fait pour les écoulements compressibles. Le Flux de chaleur de paroi donnée par le modèle par [72]:

$$k \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\mu_m c_p F (T_f - T_w)}{Pr_m y} \dots\dots\dots (3.38)$$

Avec :

$$F = \begin{cases} 1.0 & y^+ < 11.05 \\ \frac{\left(\frac{y^+ Pr_m}{Pr_t} \right)}{\left(\frac{1}{k} \ln(y^+) + B + 11.05 \left(\frac{Pr_m}{Pr_t} - 1 \right) \right)} & y^+ > 11.05 \end{cases} \dots\dots\dots (3.39)$$

Et :

$$y^+ = \frac{\rho u_{\tau} y}{\mu_m} \dots\dots\dots (3.40)$$

k est la conductivité moléculaire, Pr_r est le nombre de Prandtl moléculaire, Pr_t est le nombre de Prandtl turbulent, T_w est la température de la paroi, et T_f est la température du fluide. La vitesse de cisaillement, $u_{\tau\tau}$, est tirée de la loi de paroi de l'élan.

3.7. Modèles chimiques

3.7.1. Modélisation de la combustion turbulente

En turbulence classique, les équations pour les divers moments des variables dépendantes sont dérivées à partir des équations de conservation. On montre alors que ces équations ne peuvent être 'fermées' à aucun niveau et que des hypothèses de fermeture, souvent empiriques, sont

nécessaires. Ces hypothèses proposent de relier les moments d'ordre supérieur aux moments d'ordre inférieur par des relations universelles.

Les chercheurs se sont attachés alors à examiner la physique des phénomènes afin de pouvoir proposer des modèles de combustion turbulente [72].

➤ **Aperçu sur les Modèles de combustion turbulente**

Des modèles de combustion turbulente ont été proposés pour exprimer les taux de réaction moyens en fonction des variables connues, c'est-à-dire des valeurs moyennes elles-mêmes, et probablement aussi en fonction des caractéristiques de la turbulence, puisque celle-ci joue un rôle important pour les modèles basés sur la solution de l'équation de transport des fractions massiques des espèces, donc il ne peut pas prendre en compte les effets de la turbulence. Les termes sources qui apparaissent dans les équations de transport des espèces sont calculés d'après l'expression du taux d'Arrhenius pour les combustions (non pré-mélangées et pré-mélangées). Les mécanismes des réactions chimiques seront prédéfinis.

Pour la modélisation des écoulements réactifs, Converge V2.2 propose divers modèles, parmi lesquels on distingue [72] :

- Le modèle du temps caractéristique de la combustion (taux de progression CTC).
- Le modèle d'équilibre chimique (Chemical Equilibrium-CEQ).
- Modèle de chimie cinétique détaillée (Detailed Chemical Kinetics Model-SAGE).
- Modèle G-équation (prévu dans la version Converge 2.2).

➤ **Mécanismes réactionnels détaillés « SAGE »**

Un mécanisme réactionnel est une collection de réactions élémentaires. Une réaction élémentaire est une réaction qui se produit exactement comme elle est représentée par une équation, tout différemment des réactions globales ou complexes, et elle ne peut pas être encore décomposée en réactions constitutives. Les mécanismes réactionnels décrivent comment toute réaction a lieu à un niveau moléculaire, quelles liaisons seront cassés ou formés et dans quel ordre, quel est le taux de progression des chaque étape. Par conséquent, la connaissance des propriétés des réactifs et des produits est exigée]. Chaque étape du mécanisme comporte une combinaison d'espèces. La dépendance de ces étapes aboutit à l'équilibre stœchiométrique de l'équation de la réaction chimique globale. Pour qu'un mécanisme réactionnel soit considéré valide, il faut qu'il satisfasse le caractère précédent, et il faut encore que ses prévisions intermédiaires (espèces et taux de progressions des réactions élémentaires) ne fassent pas contradiction aux observations expérimentales. D'une manière générale une réaction peut être représentée avec [72] :

$$\sum_{m=1}^M \nu'_{m,r} X_m \Leftrightarrow \sum_{m=1}^M \nu''_{m,r} X_m \quad , \text{Pour } r = 1, 2, \dots, R \quad \dots\dots\dots (3.41)$$

$$\dot{\rho}_m^c = M_{max} \Sigma (\nu''_{m,r} - \nu'_{m,r}) \dot{\omega}_m \quad \dots\dots\dots (3.42)$$

$$\dot{Q}^c = \Sigma Q_r \cdot \dot{\omega}_m \quad \dots\dots\dots (3.43)$$

Où X_m représente une mole de l'espèce m , et $\nu'_{m,r}$ et $\nu''_{m,r}$ sont les coefficients stœchiométriques intégraux de la réaction r , M_{max} la masse moléculaire.

La réaction r à un taux de réaction donné par :

$$\dot{\omega}_m = \sum_{r=1}^R \nu_{m,r} q_r \quad \text{pour } m = 1, 2, \dots, M \dots\dots\dots (3.44)$$

Où M est le nombre total des espèces

Avec :

$$\nu_{m,r} = \nu''_{m,r} - \nu'_{m,r} \quad \dots\dots\dots (3.45)$$

Et q_r le taux variable de réaction est :

$$q_r = k_{fr} \prod_{m=1}^M [X_m]^{\nu'_{m,r}} - k_{rr} \prod_{m=1}^M [X_m]^{\nu''_{m,r}} \quad \dots\dots (3.46)$$

$[X_m]$ est la concentration molaire de l'espèce m , k_{rr} et k_{fr} les taux de réaction, respectivement vers l'avant et vers arrière, ils sont de la forme généralisée d'Arrhenius.

$$K_{fr} = A_r T^{b_r} e^{\left(\frac{-E_r}{R_u T}\right)} \quad \dots\dots\dots (3.47)$$

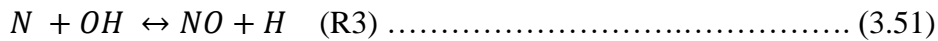
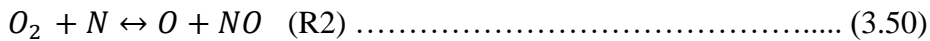
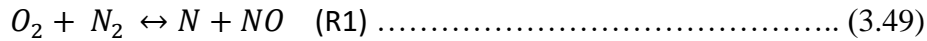
$$K_{rr} = \frac{k_{fr}}{K_{cr}} \quad \dots\dots\dots (3.48)$$

Où A_r est le facteur pré-exponentiel, b_r est l'exposant de la température, E_r est l'énergie D'activation, R_u est la constante universelle des gaz.

3.8. Modèle de formations des polluants

3.8.1. Modèle de formation de NO_x

Le mécanisme Ze'ldovich étendu tel que présenté par Heywood (1988) [77] est utilisée pour calculer la formation de NO. Ce mécanisme est donné par l'ensemble des réactions suivantes [72]:



Les constantes de vitesse des réactions (R1), (R2) et (R3) sont donnés par [72]:

$$k_{R1,f} = 7.6 \times 10^3 \exp(-38,000/T) \dots\dots\dots (3.52)$$

$$k_{R1,r} = 1.6 \times 10^3 \dots\dots\dots (3.53)$$

$$k_{R2,f} = 6.4 \times 10^9 T \exp(-3,150/T) \dots\dots\dots (3.54)$$

$$k_{R2,r} = 1.5 \times 10^9 T \exp(-19,500/T) \dots\dots\dots (3.55)$$

$$k_{R3,f} = 4.1 \times 10^{13} \dots\dots\dots (3.56)$$

$$k_{R3,r} = 2.0 \times 10^{14} T \exp(-23,650/T) \dots\dots\dots (3.57)$$

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 (3.52) jusqu'à (3.57) sont cm³/mol.s .

Le taux de formation de NO peut être écrit comme :

$$\begin{aligned} \frac{d[NO]}{dt} = & k_{R1,f}[O][N_2] - k_{R1,r}[NO][N] + k_{R2,f}[N][O_2] - k_{R2,r}[NO][O] + \\ & k_{R3,f}[N][OH] - k_{R3,r}[NO][H] \dots\dots\dots (3.58) \end{aligned}$$

Où [N] par exemple, désigne la concentration d'espèces de [NO] en cm³ en moles. La vitesse de formation de [N] peut être écrite comme [72]:

$$\begin{aligned} \frac{d[N]}{dt} = & k_{R1,f}[O][N_2] - k_{R1,r}[NO][N] + k_{R2,f}[N][O_2] - k_{R2,r}[NO][O] + \\ & k_{R3,f}[N][OH] - k_{R3,r}[NO][H] \dots\dots\dots (3.59) \end{aligned}$$

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2R \{1 - ([NO]/[NO]_e)^2\}}{1 + \left(\frac{[NO]}{[NO]_e}\right)^{R'}} \dots\dots\dots (3.60)$$

D'où :

$$R' = \frac{R_1}{R_2 + R_3} \dots\dots\dots (3.61)$$

Et :

$$R_1 = k_{R1,r} [NO]_e [N]_e \dots\dots\dots (3.62)$$

$$R_2 = k_{R2,f} [N]_e [O_2]_e \dots\dots\dots (3.63)$$

$$R_3 = k_{R3,f} [N]_e [OH]_e \dots\dots\dots (3.64)$$

Où l'indice (*e*) est utilisé pour désigner la concentration de l'espèce d'équilibre [72].

3.8.2. Modèle de formation des suies (modèle de *Hiroyasu*)

La production de masse de suie M_s (g) dans une cellule de calcul peut être déterminée à partir d'une compétition à une seule étape entre le taux de masse de suie de formation \dot{M}_{sf} (g /s) et le taux d'oxydation de masse de suie \dot{M}_{so} . donc selon Hiroyasu et Kadota (1976) [78].

$$\frac{dM_s}{dt} = \dot{M}_{sf} - \dot{M}_{so} \dots\dots\dots (3.65)$$

Où le taux de formation est donnée par :

$$\dot{M}_{sf} = SF M_{form} \dots\dots\dots (3.66)$$

$$SF = A_{sf} p^{0.5} \exp(-E_{sf} / R_u T) \dots\dots\dots (3.67)$$

Dans les équations (3.65) et (3.66), M_{form} est la masse des espèces de formation de suie (typiquement de vapeur de carburant) en grammes, P est la pression de la cellule, R_u est la constante de gaz universelle (cal /K gmol), T est la température de la cellule, E_{sf} est l'énergie d'activation en (cal /gmol) et A_{sf} est le facteur pré-exponentiel d'Arrhenius.

Le taux d'oxydation \dot{M}_{SO} est donc ainsi donnée par:

$$\dot{M}_{SO} = A_{SO} \frac{6M_S}{\rho_S D_S} R_{total} MW_C \dots\dots\dots (3.68)$$

L'équation peut être réécrite plus compacte comme :

$$\dot{M}_{SO} = SO M_S \dots\dots\dots (3.69)$$

Avec :

$$SO = A_{SO} \frac{6}{\rho_s D_s} R_{total} MW_C \dots\dots\dots (3.70)$$

$$R_{total} = \left(\frac{k_A P_{O_2}}{1+k_z p_{O_2}} \right) x + K_B P_{O_2} (1 - x) \quad (mol/cm^2) \dots (3.71)$$

D_s est le diamètre des particules de suie, M_s est la masse de particule de suie, ρ_s est la densité de suie et P_{O_2} est la pression partielle d'oxygène.

Où x est la proportion d'un des sites donnés par:

$$x = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + (K_T/K_B)} \dots\dots\dots (3.72)$$

Et les valeurs de K sont taux constant pour le carbone donné par [72]:

$$k_A = 20 \exp(-30,000/R_u T) \quad (mol/cm^2 S^1 atm^1) \dots\dots\dots (3.73)$$

$$k_B = 4.46 \times 10^{-3} \exp(-15,200/R_u T) \quad (mol/cm^2 S^1 atm^1) \dots\dots\dots (3.74)$$

$$k_T = 1.51 \times 10^5 \exp(-97,000/R_u T) \quad (mol/cm^2 S^1) \dots\dots\dots (3.75)$$

$$k_Z = 21.3 \exp(-4,100/R_u T) \quad (1/atm) \dots\dots\dots (3.76)$$

Les équations décrites précédemment sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature. On peut distinguer les méthodes suivantes:

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des volumes finis (MVF).

La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes entourant chaque point du maillage. Cette méthode, même si elle ne fournit qu'une précision du premier ordre, possède des qualités qui en font l'une des plus adaptées à l'étude des écoulements turbulents. En effet, celle-ci est très robuste et permet de traiter des équations

comportant des termes sources complexes et non-linéaires. De plus, elle a l'avantage de satisfaire la conservation de la masse sur chaque volume de contrôle. Enfin, elle peut être utilisée avec des maillages relativement grossiers, ce qui permet la mise en œuvre de code pour un coût raisonnable. La simulation numérique des fluides ou CFD (Computational Fluid Dynamics) est un outil puissant qui permet de réduire le nombre d'essais nécessaires à l'élaboration d'un nouveau procédé. Ceci est particulièrement intéressant pour les moteurs à combustion interne, pour lesquels les essais au banc coûtent chers. La CFD est simplement le calcul numérique appliqué à la mécanique des fluides. Cela consiste à résoudre dans une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, que l'on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique. En effet, son faible coût par rapport à celui des mesures expérimentales, permet de multiplier les essais numériques. Cela constitue généralement une première étape dans l'élaboration d'un nouveau procédé de fonctionnement des moteurs automobiles ou l'utilisation de nouveaux carburants qui pose de nombreux problèmes physiques nécessitant une modélisation.

3.9. Outil CFD

CFD est l'acronyme anglais de «Computational Fluid Dynamics». Il désigne conventionnellement le large domaine des outils numériques, résolvant les équations décrivant le mouvement d'un fluide (équations de Navier-Stokes, de continuité ainsi que de toutes les autres équations de conservation).

La CFD pour "Computational Fluid Dynamics" est l'application particulière de l'outil numérique à l'étude de la dynamique des fluides, qu'ils soient liquides ou gazeux, ou bien même les deux conjugués. Le champs d'investigation est ainsi au moins aussi vaste que celui de la mécanique des fluides elle-même. La manœuvre consiste à trouver une solution discrète approchée aux équations de Navier-Stokes, avec éventuellement et même très certainement des hypothèses simplificatrices. En effet, l'outil mathématique n'est pas aujourd'hui en mesure de nous donner une solution analytique excepté des cas spéciaux et simplistes, les choses auraient été bien trop simples. Autant la précision des données de mesures issues de l'expérience dépend de la qualité et de la technicité des outils utilisés, autant la précision d'une solution numérique dépend fortement de la qualité de la discrétisation, autrement dit de la qualité des schémas et méthodologies numériques utilisés dans le sens mathématique du terme [79].

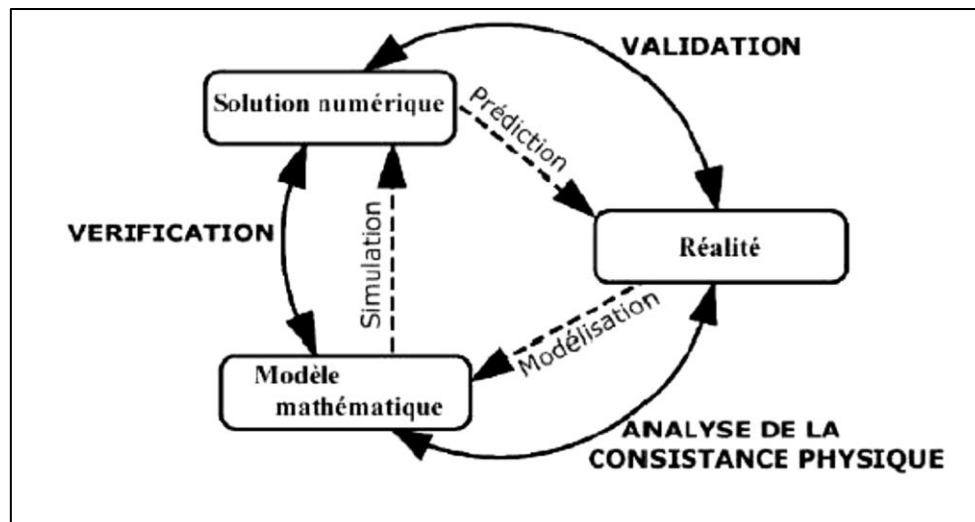


Figure 3.2 : Cadre conceptuel dans lequel s’inscrit la simulation numérique: Réalité et les résultats de simulation [79]

La CFD (Computational Fluid Dynamics) est simplement le calcul numérique appliqué à la mécanique des fluides. Cela consiste à résoudre dans une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, que l’on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique. Historiquement, la CFD a commencé à se développer en génie mécanique, pour étudier les écoulements autour d’un objet afin de mieux le profiler (ailes d’avions, automobiles) [80]. Dans la simulation des moteurs diesel, les problèmes sont, en général, beaucoup plus complexes de part, en particulier, le caractère multiphasique des écoulements, les réactions chimiques et le comportement turbulent des fluides. Le fonctionnement des moteurs automobiles actuels pose de nombreux problèmes physiques nécessitant une modélisation. Parmi ceux-ci, on peut citer:

- L’injection directe du carburant dans la chambre de combustion.
- L’utilisation des gaz résiduels dans les nouveaux modes de combustion. Ces gaz conduisent à une stratification de composition et de température qu’il faut prendre en compte.
- Les émissions de polluants. Bien que les moteurs soient de plus en plus propres, les normes ne cessent de devenir de plus en plus strictes, ce qui constitue un vrai challenge pour les constructeurs.
- L’utilisation de nouveaux carburants (gaz naturel et GPL, hydrogène). En effet, ces derniers ont des caractéristiques différentes des carburants classiques, ce qui influence considérablement la formation du mélange et la combustion par la suite [79].

Tableau 3.2 : Le code CFD [81]

Nom de code	Origine	Type	Méthode
FIRE	AVI, Allemagne	Code commercial	Volume finis
FLOW-3D	Harwell, Royaume-Uni	Code commercial	Volume finis
FLUENT	Fluent INC, Etats-Unis	Code commercial	Volume finis
CONVERGE	KIVA, Etats-Unis	Volume finis	Volume finis

3.10. CFD Converge

Le laboratoire CONVERGENT science basé à Middleton, Wisconsin a développé un code de simulation 3D appelé «CONVERGE». En effet, ce code est bien connu par le monde industriel et universitaire aux USA. 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 hydrodynamiques 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 [72].

3.10.1. Structure standard de Converge V 2.3

Converge V2.3 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 préprocesseur « pré-processing », le solveur Converge et le post-processeur « postprocessing ».

➤ Génération de maillage

Converge est un logiciel de construction de modèle physique et de maillage. 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 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 UI

importe un fichier sous format '.Dat' noté (surface.dat). Ce dernier s'exporte vers le code de calcul afin d'effectuer les simulations numériques.

➤ **Pré-processing**

L'étape de prétraitement consiste à préparer une surface triangulée qui est faite dans le préprocesseur GUI. Cette étape commence généralement par la lecture d'un fichier STL qui était sortie d'un logiciel de CAO, suivie par des trous de fixation, orienter les triangles, fixant connectivité inadéquate, et la réparation d'autres problèmes avec la surface. Selon la qualité du fichier STL, ce qui peut soit prendre quelques minutes ou quelques heures.

Une fois que la surface est propre, les limites sont ensuite affectés numéros d'identification qui correspondent à des entrées dans le fichier de spécification de limite. Après l'attribution de numéros aux limites, le fichier est écrit et sera une entrée vers l'exécutable converge. Prétraitement implique également la création des autres fichiers d'entrée nécessaires pour l'exécution du code. Ces fichiers d'entrée sont tous en format texte ASCII pour modifier facilement par l'utilisateur. La plupart de ce manuel traite de la préparation des fichiers d'entrée pour exécuter une simulation.

➤ **Exécution du code**

Converge peut être exécuté en série (un processeur) ou en parallèle (plus d'un processeur). Procédé d'exécution dépend du fait que la tâche est en série ou en parallèle.

➤ **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 différentes formes (GMV, Tecplot...), pour représenter des graphes par d'autres logiciels.

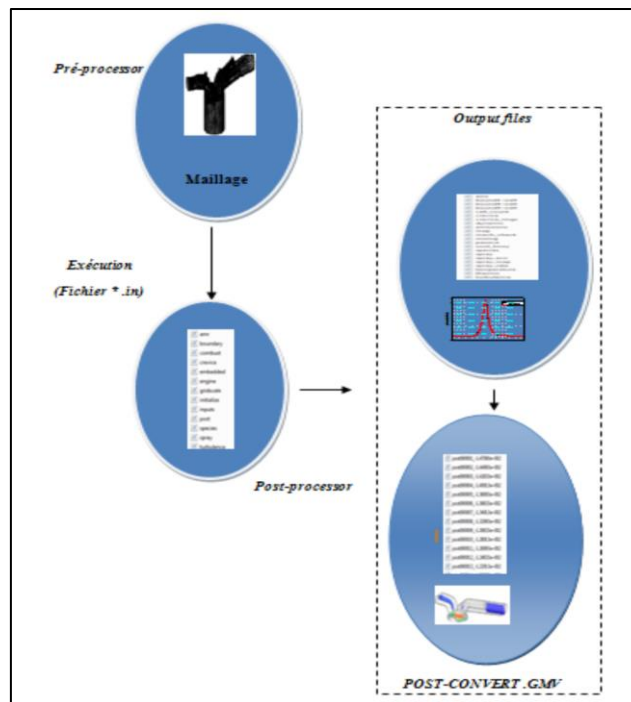


Figure 3. 3 : Structure standard de converge

3.10.2. Techniques de maillage

Les techniques de génération de maillages sont employées de manière intensive dans de nombreux domaines. Des nombreuses études ont montré que les techniques utilisant les maillages offrent de bonnes performances ainsi que des fonctionnalités intéressantes. ConvergeV1.3 [72], et ConvergeV1.4 [61] offrent la possibilité de réaliser un maillage structuré, d'ajouter des soupapes verticales, piston sans ou avec bowl ω et d'autres formes. De plus, différentes techniques de raffinement du maillage ont été implémentées dans le code Converge parmi lesquelles: Le raffinement de base.

➤ Raffinement du maillage de base

Dans la simulation numérique, le temps de calcul et la qualité de la solution dépendent très fortement du maillage. C'est pourquoi il faut toujours rechercher le maillage optimal. C'est une opération très importante et elle consiste à diviser le maillage de base dans tout le domaine de calcul en une série de sous mailles. Donc, il est très important d'évaluer la dépendance des résultats sur le maillage utilisé en répétant le même calcul sur des maillages différents, figure (3.4) et en comparant les résultats en termes de temps de calcul et de précision.

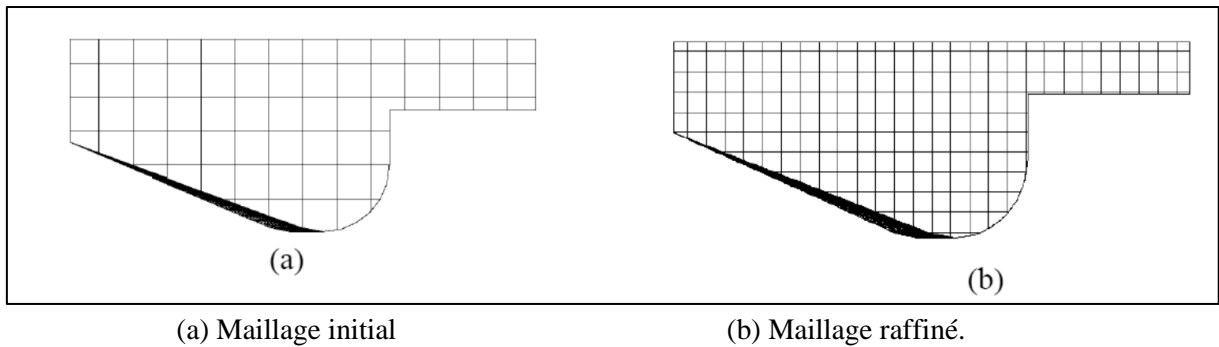


Figure 3.4 : Raffinement de maillage

3.10.3. Démarches numériques

Pour résoudre les équations aux dérivées partielles non-linéaires et fortement couplées qui régissent l'écoulement du fluide dans les MCI, nous adoptons la méthode RANS, avec l'algorithme PISO pour le traitement du couplage pression-vitesse dans les équations moyennées de Naviers-Stockes [72].

Le couplage Pression-Vitesse est traité en résolvant les équations de la quantité du mouvement et une équation pour la pression dérivée d'une combinaison de l'équation de continuité et celle de la quantité du mouvement. Converge V2.3 utilise l'algorithme de couplage PISO qui sera brièvement décrit ci-dessus [72].

L'algorithme PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) a été mis au point par Issa en 1984 cité dans la référence [82]. C'est une extension de l'algorithme SIMPLE ayant une étape de correction de plus. Il est basé sur une relation de degré élevé entre la correction de la vitesse et la correction de la pression. La méthode de résolution est la même que celle utilisée par l'algorithme SIMPLE qui a été mise en place et développée par Patankar et Spalding en 1972 [83]. Afin d'éviter les oscillations du champ de pression dans l'équation de quantité du mouvement, la technique d'interpolation de Rhie et Chow [80] est utilisée.

3.11. Fichiers de sortie et d'entrée dans Converge

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. Un schéma du fichier interaction avec converge est montré dans la figure 3.5 Ci-dessous [84].

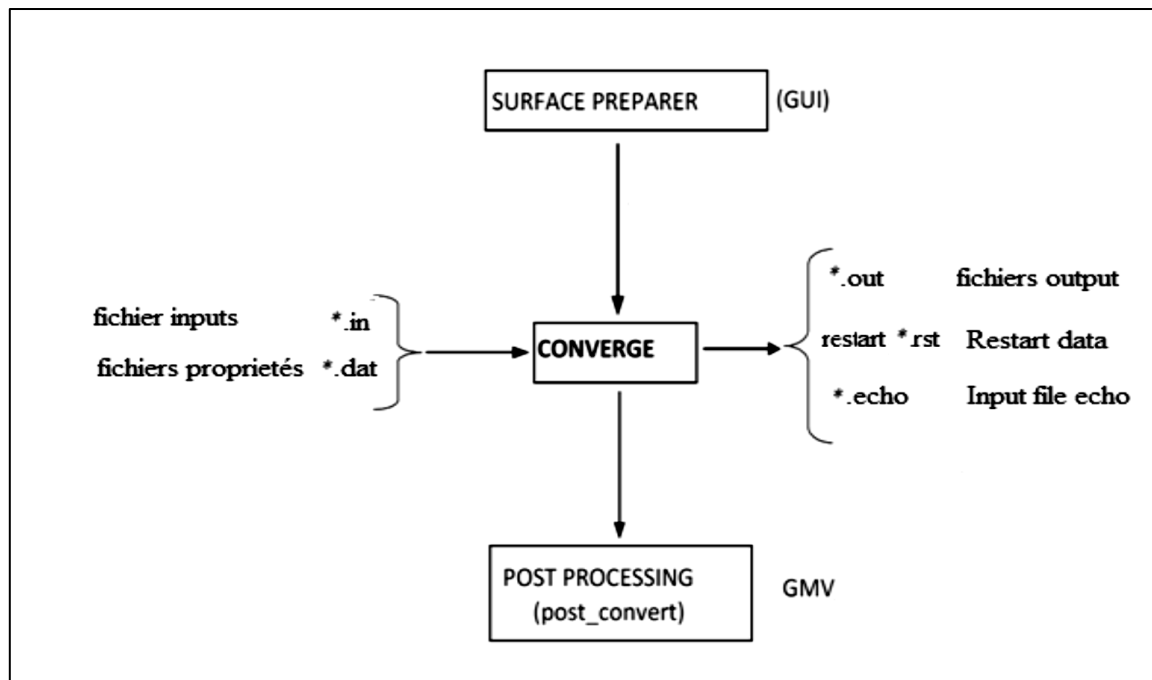


Figure 3.5 : Schéma de fichiers d'entrée, des données et de sortie (input, data, and output files) [84]

3.11.1. 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 n'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 3.3 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.

Tableau 3.3 : Les fichiers d'entrées [85]

Nom du 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.
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	Éléments, 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

3.11.2. Descriptions des fichiers de sortie

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

➤ 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.3.4 ci-dessous.

Tableau 3.4 : Fichiers de sortie [85]

Nom du 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.

3.12. Préparation des calculs par converge V 2.3

La simulation numérique par le code CONVERGE V 2.3 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, Squish, vitesse,...).
- Les conditions aux limites (température).
- Les conditions initiales (pression, température, fraction massique de gaz).
- Spécification de carburant (type, quantité, temps d’injection, durée d’injection...).

Donc on doit définir sur le fichier input.in tous les paramètres nécessaires. Le fichier spray.in, qui définit le carburant et système d’injection, surface.dat, le fichier du maillage, et ensuite l’exécution du programme (voir la structure standard de converge). Dans cette dernière étape l’ensemble des équations sont discrétisées et résolues. La dernière étape c’est le post-processeur qui permet de visualiser les différents résultats (champs de vitesse, lignes de courant, contours de la surface...). Finalement, le but de cette partie est de donner un aperçu sur la génération des géométries 3D, et de mettre en évidence les paramètres nécessaires pour de bons résultats; par la mise en application du code de calcul converge V 2.3.

3.13. Conclusion

Le but de ce chapitre c’est de présenter le code CONVERGE orienté vers la modélisation de combustion dans les moteurs à combustion interne, de donner un aperçu sur la stratégie de maillage AMR, la méthode de génération des géométries 3D et de mettre en évidence les paramètres nécessaires pour de bons résultats; par la mise en application du code de calcul CONVERGE V2.3.

Chapitre 4:
Résultats et discussion

Chapitre 4

Résultats et discussion

4.1. Introduction

Les méthodes numériques ont pour objectif de fournir une solution proche du comportement réel des phénomènes physiques qui possèdent des caractères très complexe : dimensionnels, temporelles et non linéaire. Alors, le rôle de modélisateur est de simplifier suffisamment le problème tout en conservant l'originalité du phénomène physique étudié.

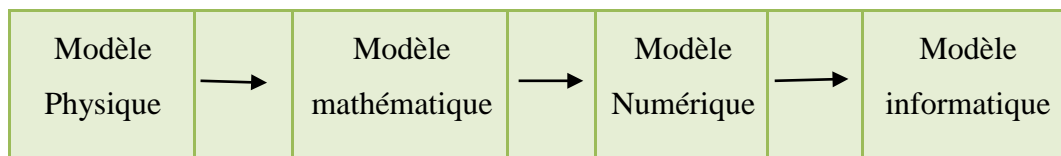


Figure 4.1 : Boucle de modélisation

Donc les écoulements des fluides, que ce soit on régime laminaire ou turbulent, sont décrits par le système d'équation aux dérivée partielle (E.D.P). Ainsi, tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie qu'il convient de résoudre pour les caractéristiques du champ d'écoulement et du champ thermique.

Les résultats de n'importe quelle simulation de la combustion .dans un moteur à combustion interne seront d'autant précis que si les modèles utilisés peuvent effectivement décrire les différents phénomènes qui auront lieu dans le processus de combustion.

Dans le présent chapitre, on expose une série des résultats issus de la simulation numérique de la combustion dans un moteur a essence, effectuée à l'aide du code de calcul converge V2.3.

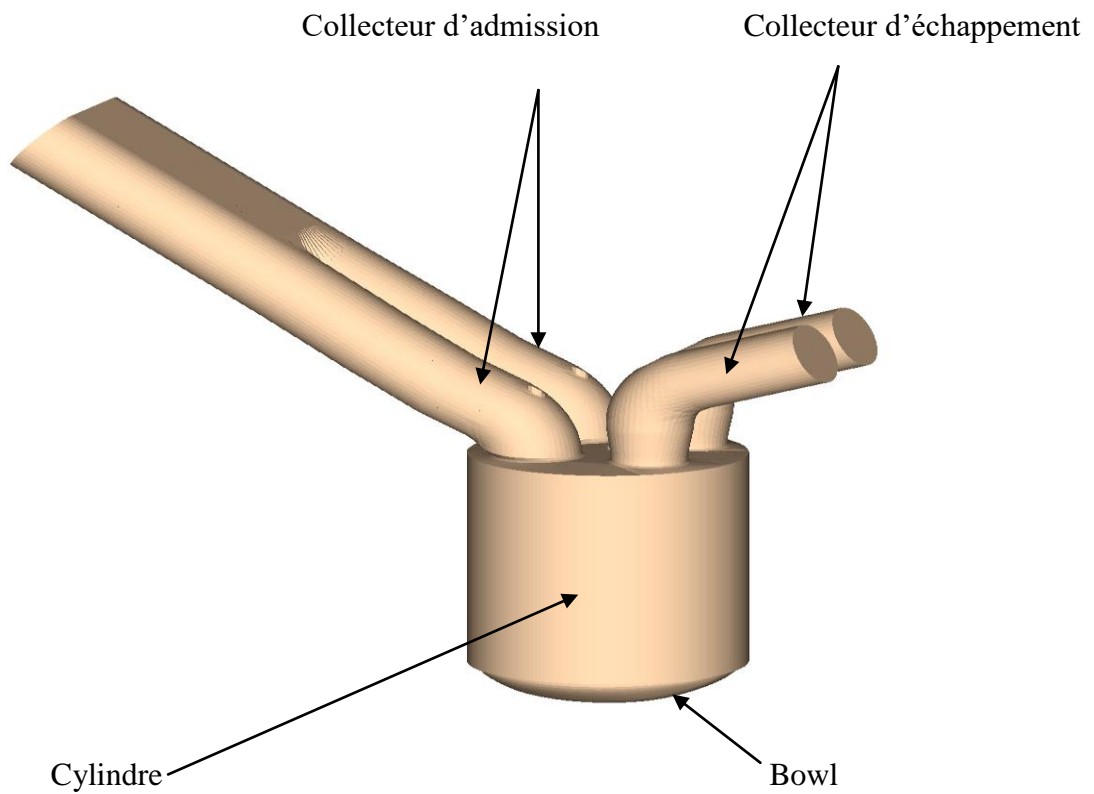
Pour valider les résultats numériques on se réfère au calage de la courbe de pression cylindre, tout en considèrent le moteur à moyenne charge. Enfin, on exposera les résultats numériques accompagnés des commentaires et des explications.

Les résultats seront comparés avec les données expérimentales.

4.2. Présentation du banc d'essais moteur

4.2.1. Spécifications du moteur

Pour valider les résultats de notre étude numérique on a choisi le moteur «si8-sage-pfi» qui est un moteur expérimental. Les spécifications de fonctionnement du moteur utilisé sont présentées ci-dessous dans le tableau (4.1).

**Figure 4.2** : Vue 3D du moteur**Tableau 4.1** : Description des caractéristiques géométriques du moteur étudié [63]

Géométrie de base	
Alésage de moteur	8.6 cm
Course du moteur	9.8 cm
longueur de la bielle	14.37 cm
Squish	0.01 cm
Nombre des valves	4 Valve
Vitesse de rotation	3000 tr/min

4.2.2. Spécifications d'injections

Tableau 4.2 : Description des caractéristiques du système d'injection du moteur étudié [63]

Système d'injection du carburant		
Carburant	C8H18	GPL
Température du fuel	338	335
Début d'injection	-170	-220
Durée d'injection	50	50
La masse de fuel	3	3,47
Nombre de bec	4	4
Le diamètre de bec	0.0002	0.0002
La longueur du bec	0.0012	0.0012

4.2.3. Distribution des valves :

Une valve est un organe mécanique de la distribution des moteurs thermiques à quatre temps permettant l'admission des gaz frais et l'évacuation des gaz brûlés. De manière générale, une soupape d'admission sépare le conduit d'admission de la chambre de combustion et une soupape d'échappement sépare celle-ci du conduit d'échappement.

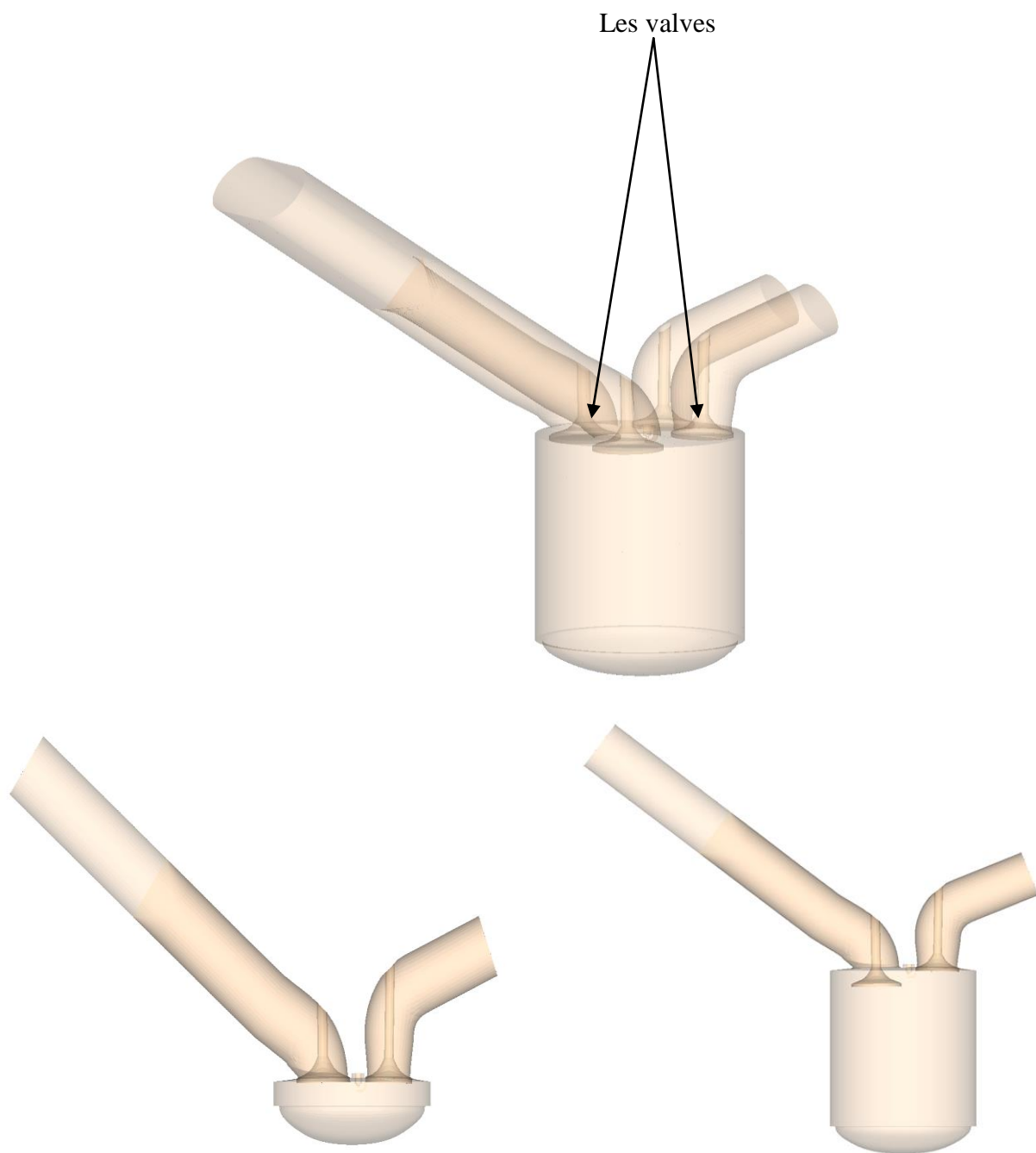


Figure 4.3 : Vues 3D des valves

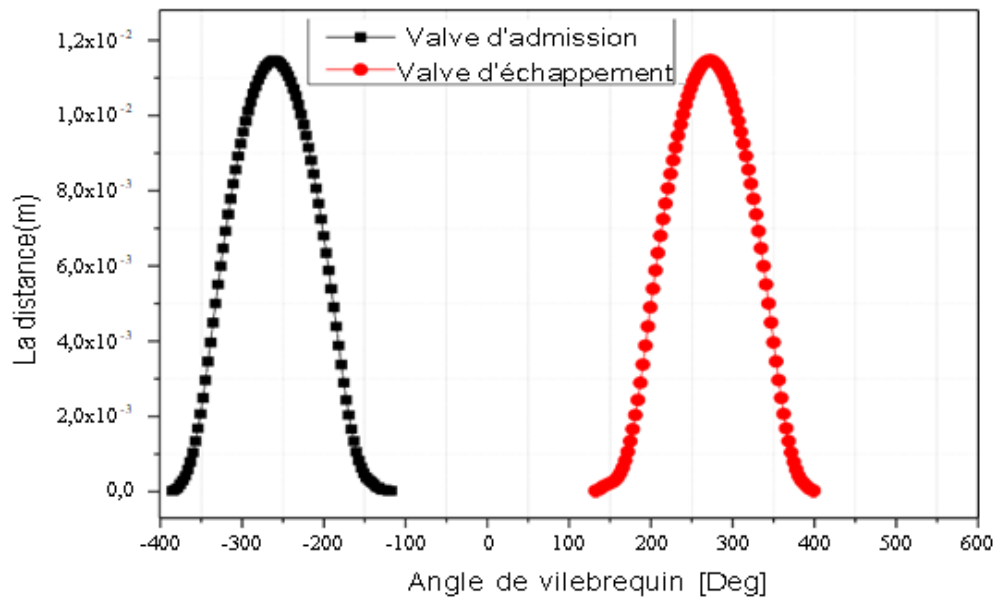


Figure 4.4 : Profil de distribution des soupapes

Tableau 4.3 : Soupapes d'admissions et d'échappements

	Soupape d'Admission	Soupape d'échappement
Avance ouverture	-385 °V	132°V
Retard de fermeture	-118°V	-321°V

4.2.4. Bougie

La bougie d'allumage est un dispositif électrique, présent sur les moteurs à allumage commandé, qui provoque l'inflammation du mélange gazeux dans la chambre de combustion. Pour cela, elle doit pouvoir générer des milliers d'arcs électriques par minute tout en résistant à la chaleur et à la pression engendrée par les explosions à l'intérieur du cylindre.

Le tableau (4.4) représente le système d'allumage du moteur étudié.

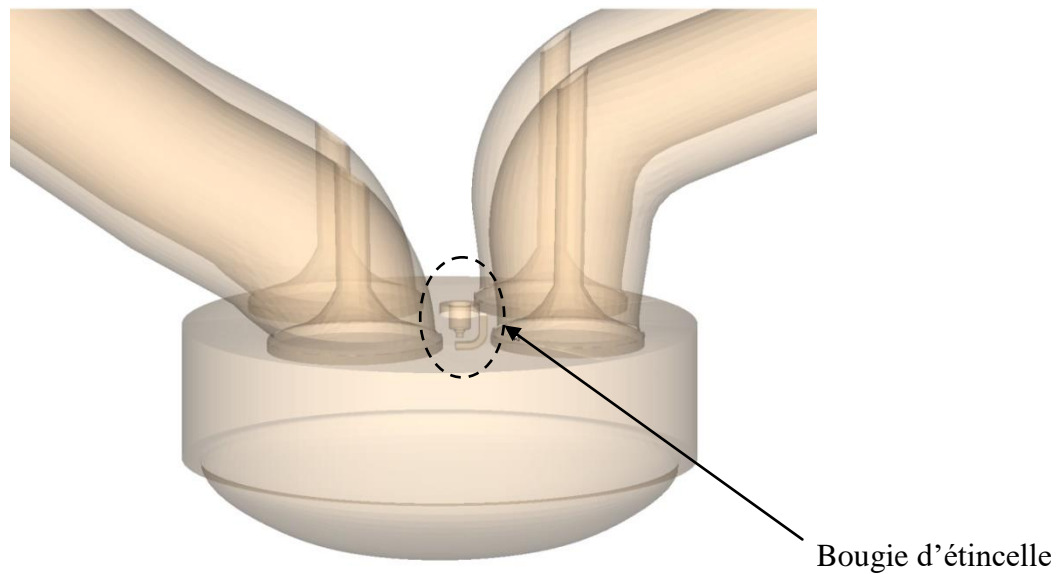


Figure 4.5 : Vue 3D de la bougie d'étincelle

Tableau 4.4 : Spécifications Système d'allumage [63]

Système d'allumage	
Mode d'allumage	allumage par étincelle
Angle d'étincelle	-15 deg
Durée d'étincelle	10 deg
Energie d'étincelle	50 000 VOLT
Début d'étincelle	-15.0 degré
Fin d'étincelle	-5 degré

4.3. Domaine du calcul

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.

La figure (4.6) contient un maillage structuré créé par le préprocesseur de CONVERGE, il contient environ 1081 764 cellules à -296V et 11 467 cellules à 21V.

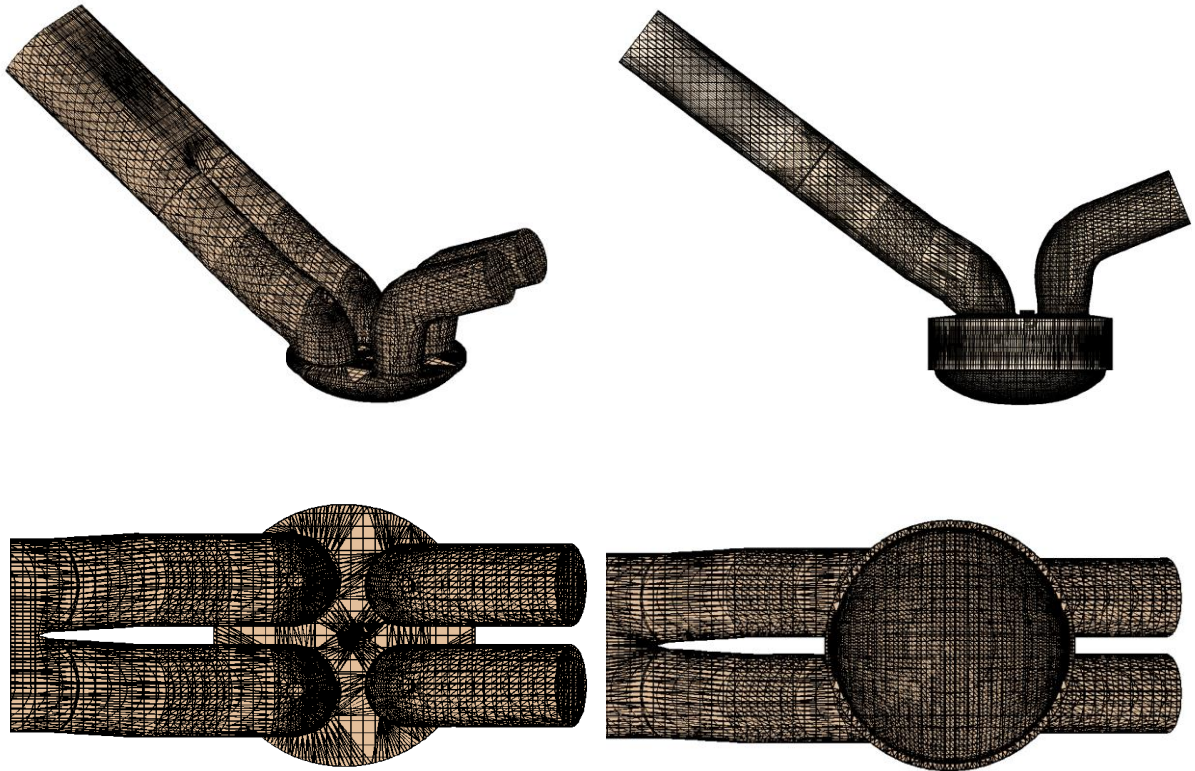


Figure 4.6 : Maillage du domaine de calcul

4.4. Présentation de l'expérience

4.4.1. Conditions initiales

Les conditions initiales introduites sont :

La pression «pres_init», la température de chambre «temp_init», l'énergie cinétique «tke_init», et le taux de dissipation «eps_init». Les données sont montrées dans le tableau (4.5).

Tableau 4.5 : Conditions initiales [63]

pres_init [MPa]	0.101325
temp_init [K]	363
tke_init [m2/s2]	5
eps_ini [m2/s3]	120

4.4.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont données par les températures de culasse (T_{cu}), du cylindre (T_{cy}) et du fond de piston (T_p). Les données sont montrées dans le tableau (4.6).

Tableau 4.6 : Conditions aux limites [63]

Température de la culasse (T_{cu}) [K]	450
Température du cylindre (T_{cy}) [K]	450
Température du piston (T_p) [K]	450
Température des valves (T_v) [K]	480
Température de la bougie (T_b) [K]	550

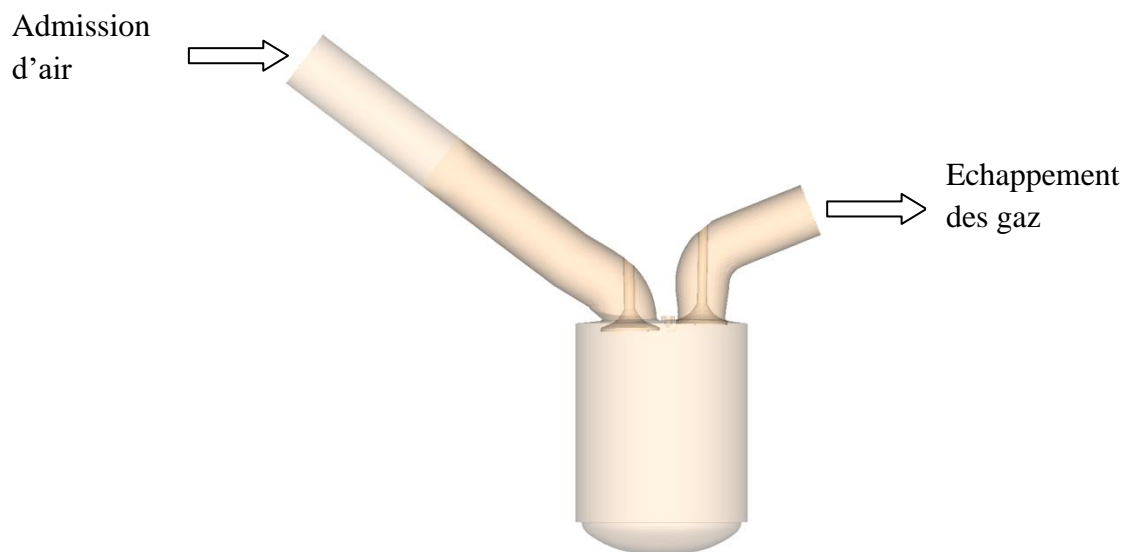


Figure 4.7 : Configuration adoptée pour imposer les conditions aux limites à l'entrée des collecteurs d'admissions et à la sortie des collecteurs d'échappements

4.4.3. Choix des modèles de simulation

Lors de ce travail, nous nous sommes basés sur les modèles présentés dans le tableau (4.7) afin de simuler la combustion au sein de la chambre de combustion d'un moteur essence à injection directe.

Tableau 4.7 : Choix des modèles [63]

Processus	Modèle
Combustion	SAGE
Turbulence	RNG $k-\varepsilon$
Atomisation	KH-RT
Transfert de la chaleur	Loi de paroi
NOx	Zeldovich
Suies	Hiroyasu

4.4.4. Temps de calcul

- Essence avec AMR : 9 jours 23 h 30 min
- Essence sans AMR : 43 min 37 s
- GPL avec AMR : 27 jours 16 h 1 min
- GPL sans AMR : 32 min 44 s

4.5. Résultats et discussions

4.5.1. Evolution de Pression

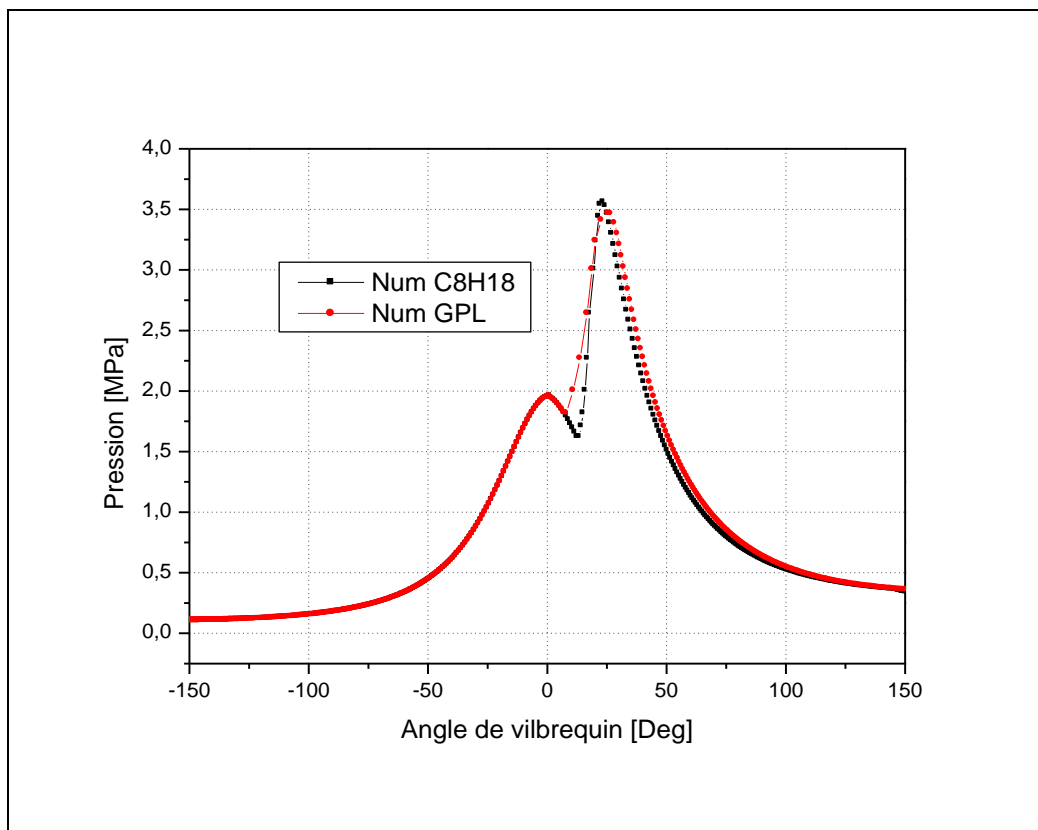


Figure 4.8 : Evolution de la pression en fonction de l'angle de vilebrequin

La figure (4.8) présente l'évolution de la pression dans la chambre de combustion en fonction de l'angle de vilebrequin durant un cycle complet pour deux carburants (essence et GPL).

En comparant les deux profils, on note une bonne concordance. On a essayé de garder la même pression de combustion pour avoir la même puissance en utilisant les deux différents carburants.

La pression commence à augmenter à -100° jusqu'à la valeur de 3,5 MPa (phase de combustion), puis elle diminue (phase de détente).

4.5.2. Evolution du taux de dégagement de chaleur

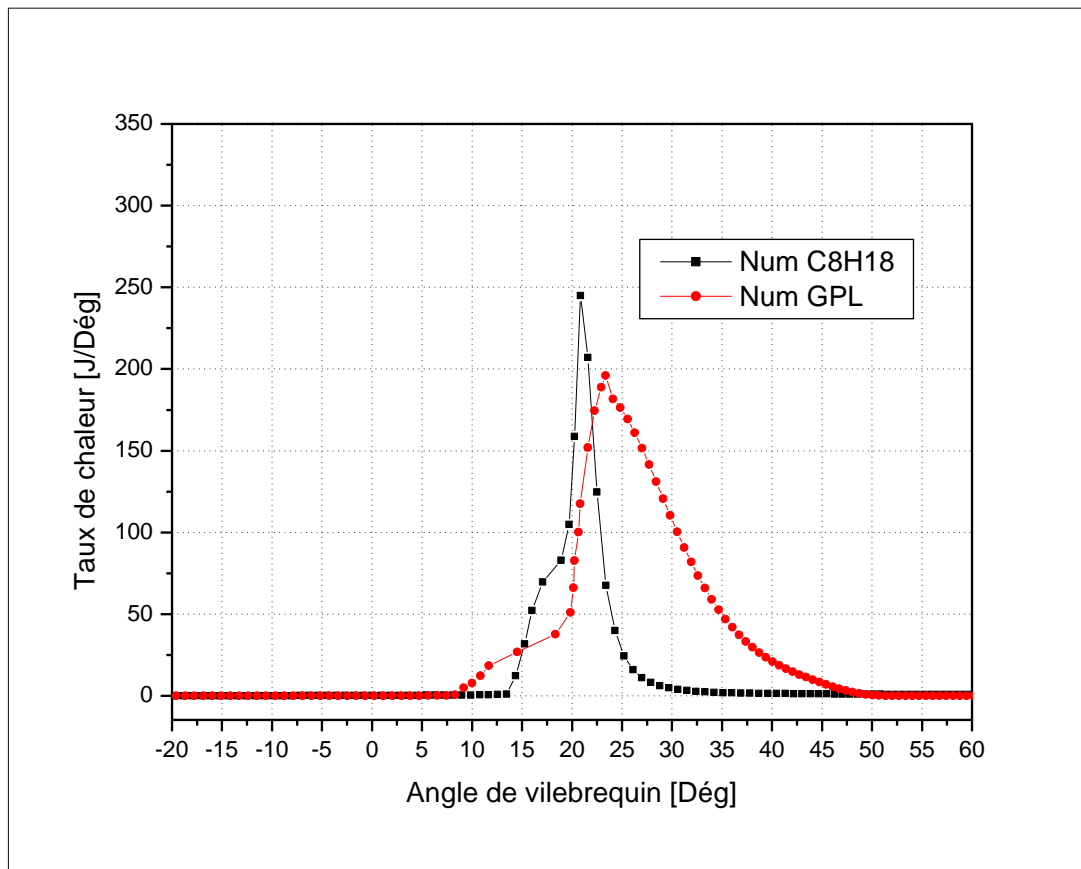


Figure 4.9 : Evolution du taux de chaleur en fonction de l'angle de vilebrequin

La figure (4.9) montre l'évolution du taux de chaleur dégagée en fonction de l'angle de vilebrequin pendant un cycle.

Pour le GPL (courbe rouge), On remarque qu'il n'y a pas de dégagement de chaleur jusqu'au huitième angle de vilebrequin, ensuite, une augmentation rapide jusqu'à 200 J/Deg.

Pour l'essence, on remarque aussi l'absence du dégagement de chaleur jusqu'à l'angle 14 de vilebrequin. A partir de cet angle, le taux de chaleur augmente rapidement et atteint la valeur de 250 J/Deg.

On note une différence de 50 J/Deg de plus pour le C8H18 par rapport au GPL, cette dernière est dû au pouvoir calorifique inférieur qui prend une valeur supérieure pour l'essence qu'au GPL (32,25 MJ/l et 23,64 MJ/l respectivement)

4.5.3. Evolution de la température

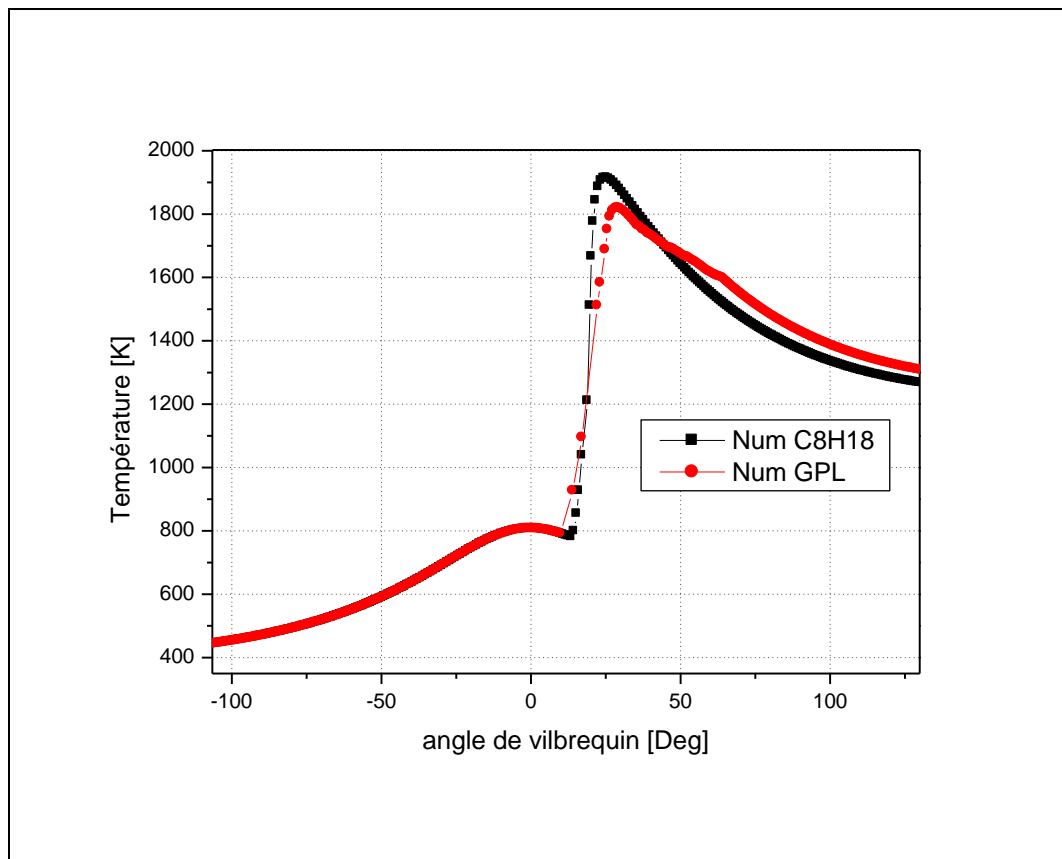


Figure 4.10 : Evolution de la température en fonction de l'angle de vilebrequin

Cette figure ci-dessus présente la variation de température à l'intérieur du cylindre en fonction de l'angle de vilebrequin.

Pour les deux profils, des deux carburants, on constate qu'ils sont presque identiques avec une petite différence de température maximale. Aussi, on remarque que cette variation consiste 2 pics :

- Le premier pic est de 800K pour le C8H18 et le GPL, au moment d'étincelle : c'est la température d'air comprimé de la phase de compression.
- La température augmente jusqu'au deuxième pic de l'ordre de 1900K pour l'essence, et de 1800 pour le GPL, cette augmentation de température est due au déclenchement de la phase de combustion : c'est la température de combustion.

Pendant la détente et l'échappement, la température diminue à une valeur moyenne de l'ordre de 1300K.

4.5.4. Evolution de la quantité de combustible

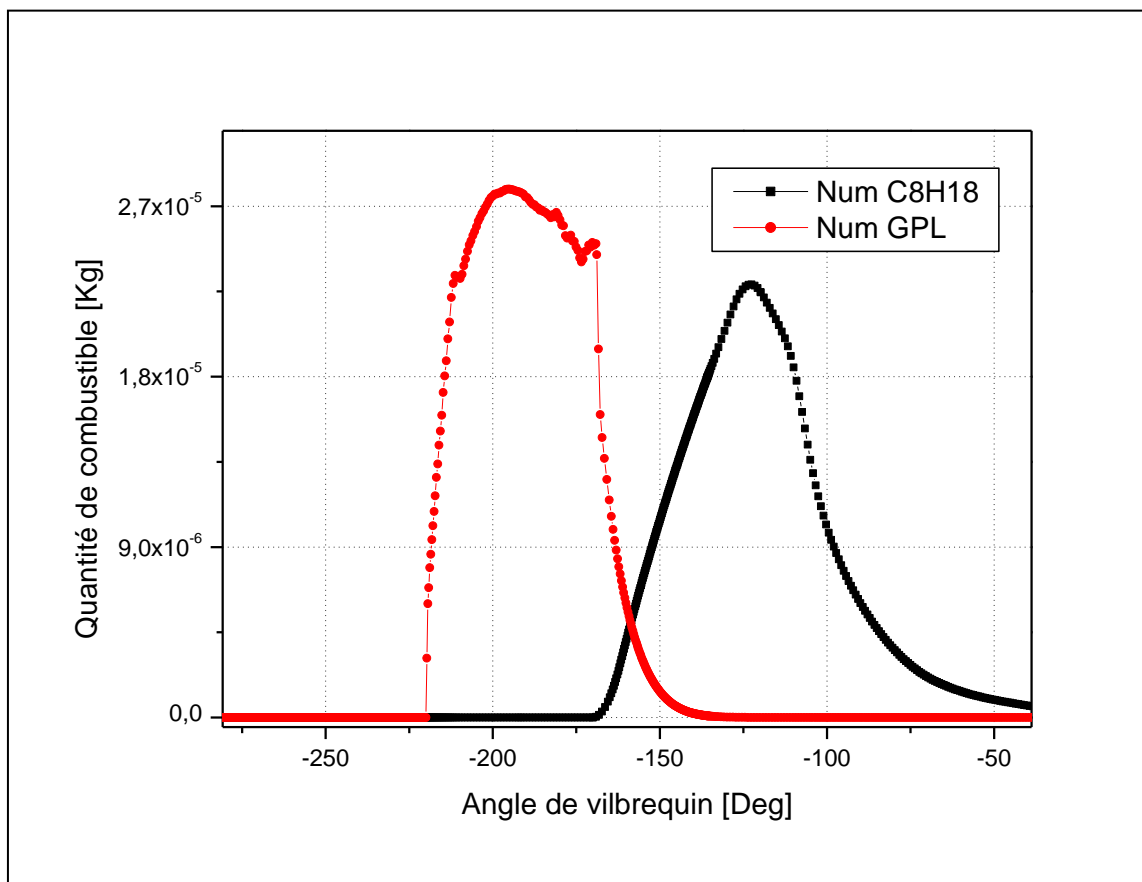


Figure 4.11 : Evolution de la température en fonction de l'angle de vilebrequin

La figure (4.11) représente le développement de la quantité de combustible en fonction de l'angle de vilebrequin dans la chambre de combustion.

Pour le GPL, on remarque que l'augmentation de la quantité de combustible déclenche à -220°V : début d'injection, pour atteindre la valeur de $2,8 \cdot 10^{-5}$, puis elle diminue.

Pour le deuxième carburant, l'essence, le temps de début d'injection diffère, alors on voit que la quantité de carburant augmente à partir de -170°V pour arriver à une valeur maximale de $2,3 \cdot 10^{-5}$ et elle diminue ensuite.

En comparant les deux courbes, on constate que la quantité du GPL est plus élevée que celle du C8H18, car on a injecté 20% de plus de GPL que l'essence pour avoir la même puissance dans les deux cas.

4.5.5. Emissions du cycle

➤ Emissions moyennes d'oxydes d'azote (NOx)

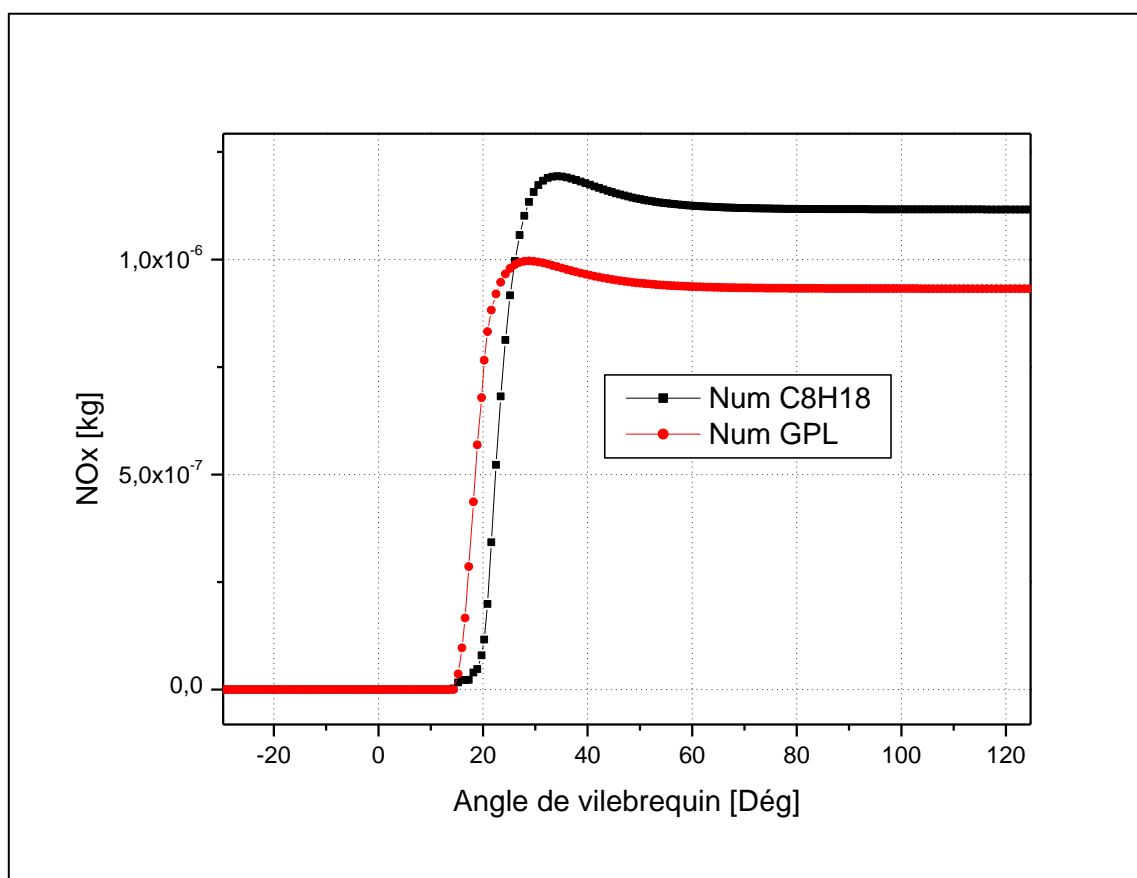


Figure 4.12 : Evolution des NOx en fonction de l'angle de vilebrequin

La figure (4.12) montre l'évolution d'oxyde d'azote en fonction de l'angle de vilebrequin pour l'essence et le GPL.

L'émission des NOx prend une valeur nulle jusqu'à l'angle 15 de vilebrequin (début de combustion), en arrivant à cet angle les émissions développent rapidement dû aux températures élevées atteintes au moment de la combustion.

On remarque aussi que la courbe d'essence (noir) prend des valeurs supérieures que celle du GPL (courbe rouge) avec un pourcentage de 16,5%. Les valeurs maximales sont $1,55 \cdot 10^{-6}$ et $1 \cdot 10^{-6}$ Kg respectivement.

Ensuite, on remarque une diminution lors de la phase de détente (chute de température).

L'oxyde nitrique NO et le dioxyde d'azote NO₂ sont traditionnellement regroupés sous le terme NO_x. Dans un moteur, le NO est cependant le plus susceptible de se former aux températures rencontrées durant la phase de combustion. Sa formation est contrôlée par les mécanismes différents qui sont décrits dans la littérature :

- Le NO thermique correspond à une oxydation de l'azote atmosphérique décrite par le mécanisme de Zeldovitch. Ce mécanisme représente la voie prédominante de formation des NO pendant la combustion.
- Le fuel-NO est lié à la décomposition du combustible qui peut libérer des composés NOx. La teneur en azote des carburants est aujourd'hui si infime que cette voie de formation des NO peut être négligée.

➤ **Emissions des suies**

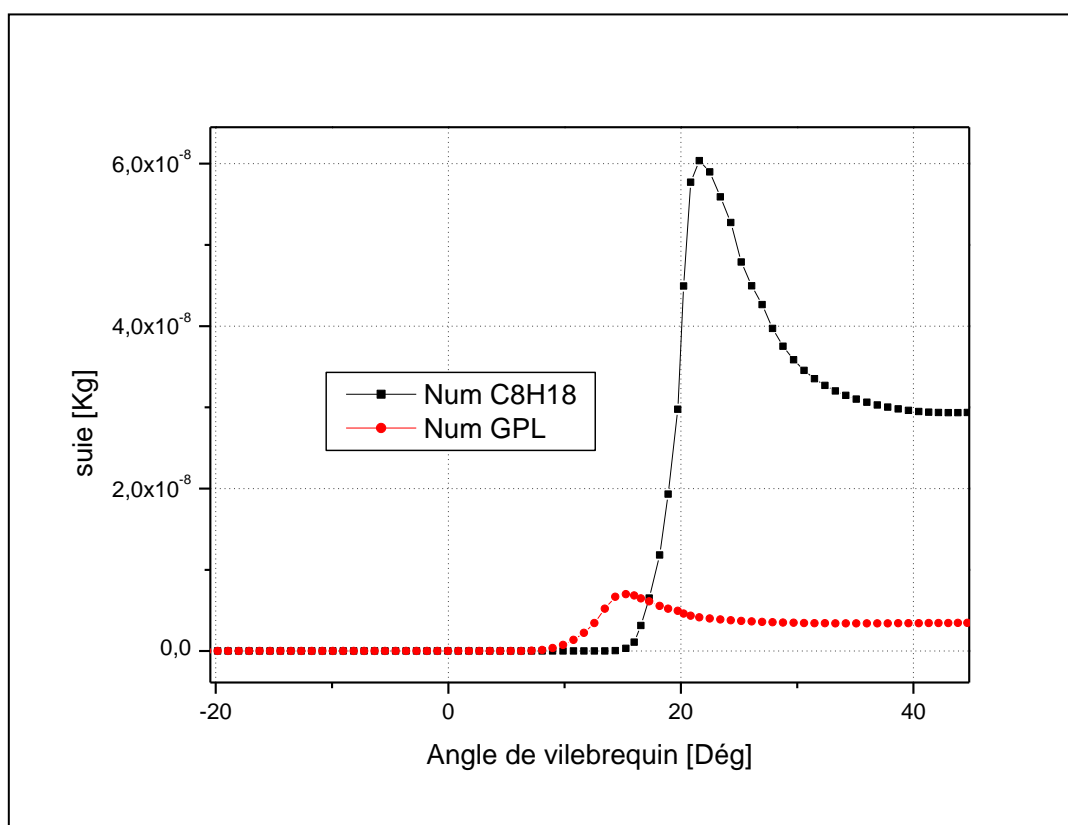


Figure 4.13 : Evolution des suies en fonction de l'angle de vilebrequin

La figure représente l'évolution de formation des suies en fonction de l'angle de vilebrequin. D'après le profil, et pour le cas d'essence, le dégagement des suies prend une valeur nulle jusqu'à l'angle 15 de vilebrequin où il commence à augmenter rapidement : cette augmentation signifie le déclenchement de la combustion) jusqu'au pic à 30°V avec une valeur maximale de 6.10^{-8} Kg, puis elle diminue.

Pour le GPL, la courbe augmente légèrement à l'angle 10, et atteint le $0,8.10^{-8}$ Kg, puis elle diminue et stabilise à une valeur de $0,4.10^{-8}$ Kg.

L'émission des suies pour l'essence est huit fois plus grande que le GPL.

➤ Emissions de monoxyde de carbone (CO)

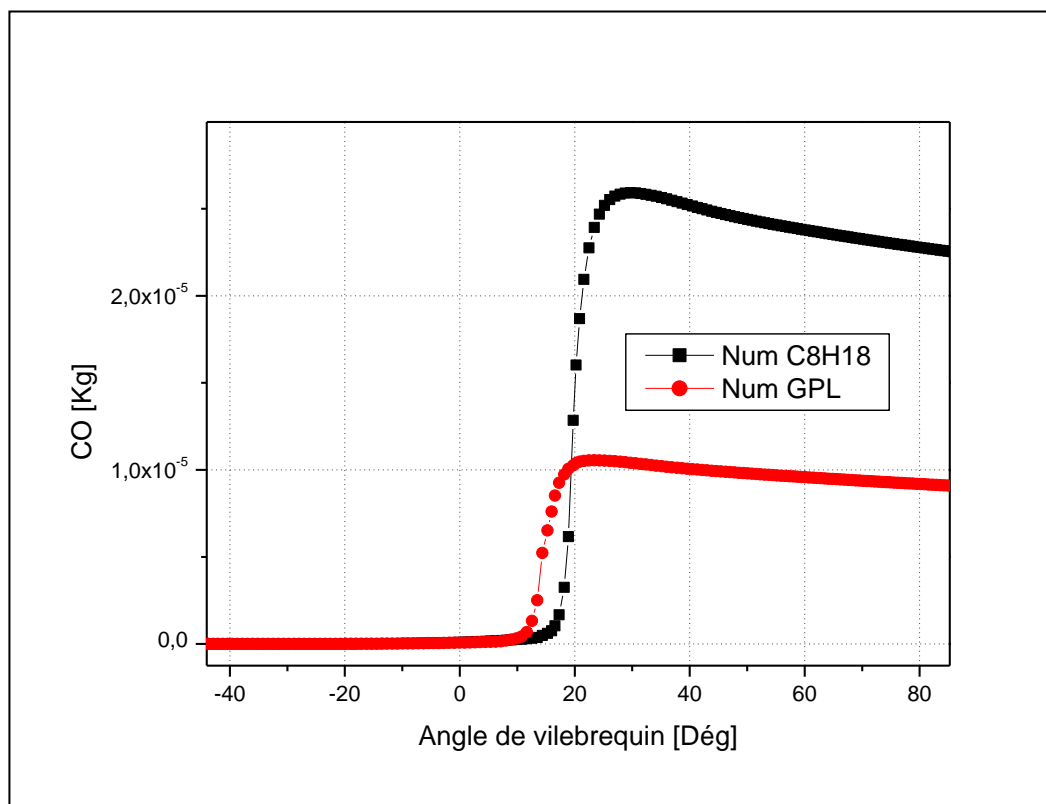


Figure 4.14 : Evolution CO en fonction de l'angle de vilebrequin

La figure ci-dessus montre le profil des émissions de monoxyde de carbone (CO) en fonction de l'angle de vilebrequin.

D'après le profil de C8H18 on voit que le CO commence à augmenter avec le début de la combustion (15°V) jusqu'à $2,7 \cdot 10^{-6}$ Kg, cette augmentation est causée par la richesse de mélange carburé (excès d'O₂).

Pour le GPL, on remarque d'après le profil que la valeur de CO dans ce cas est inférieure avec un pourcentage de 59,3% en comparant avec l'essence. A la fin de combustion il y a une diminution à cause de la pauvreté du mélange.

Les émissions de CO sont formées au cœur de la flamme avec d'autres produits intermédiaires de la combustion. La plupart de ces produits sont ensuite convertis en CO₂, si bien que la présence de CO à l'ouverture des soupapes d'échappement démontre l'existence d'un processus d'oxydation incomplet.

➤ Les émissions de CO₂

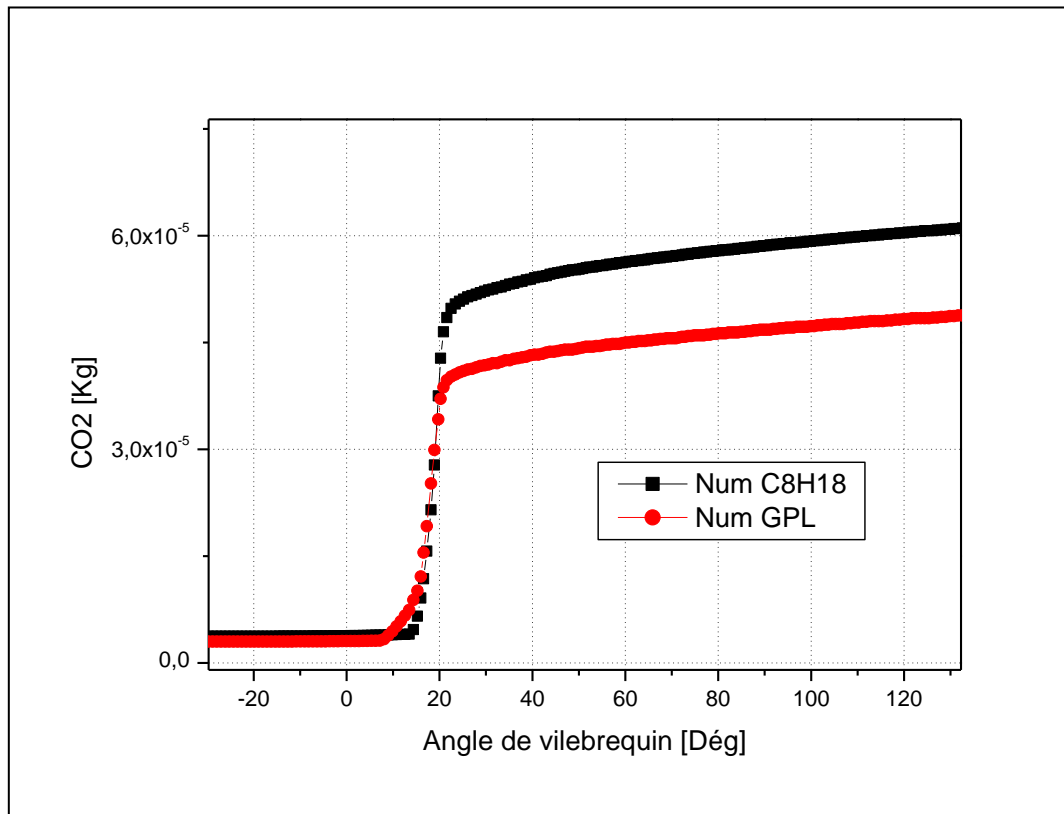


Figure 4.15 : Evolution CO₂ en fonction de l'angle de vilebrequin

La figure ci-dessus montre l'évolution de dioxyde de carbone en fonction de l'angle de vilebrequin.

A cause de la richesse du mélange, on remarque qu'il y a une augmentation au début de combustion pour les deux carburants.

La courbe rouge (GPL) augmente à 10°V et atteint une valeur de $4 \cdot 10^{-5}$ Kg, bien que la courbe noire (essence) commence à augmenter à 15°V et atteint les $5 \cdot 10^{-5}$ Kg.

On constate une différence de 20,2% entre les deux courbes.

A la fin de la combustion, la valeur de CO₂ reste stable car ce dernier est un constituant nécessaire dans les produits de réaction chimique.

4.6. Contours

4.6.1. Evolution du Jet (la quantité du carburant injecté)

Les figures ci-dessous présentent la progression massique des carburants (C₈H₁₈ et GPL) dans différents angles de vilebrequin.

➤ Essence

- Spray à -170°V (instant d'injection)

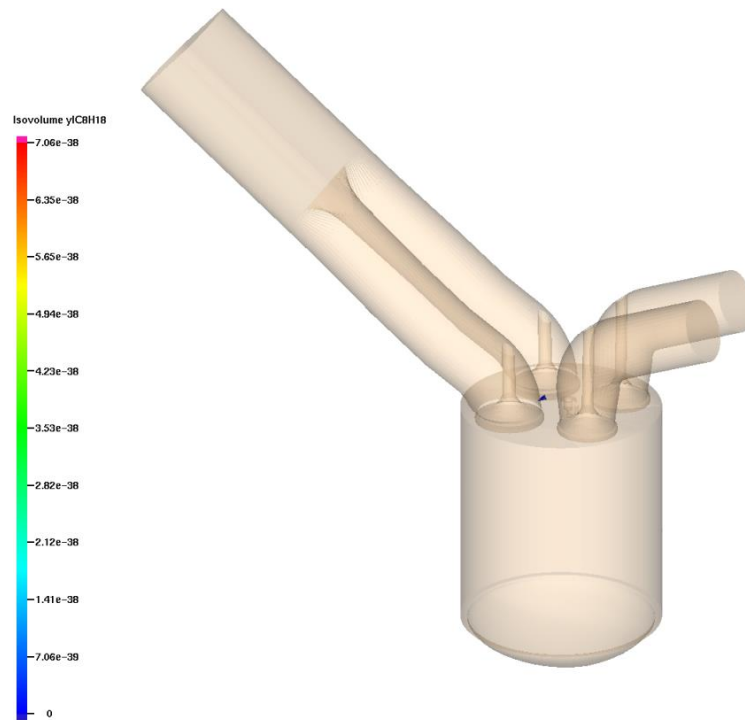


Figure 4.16 : Contours de spray à -170°V

- Spray à -165°V

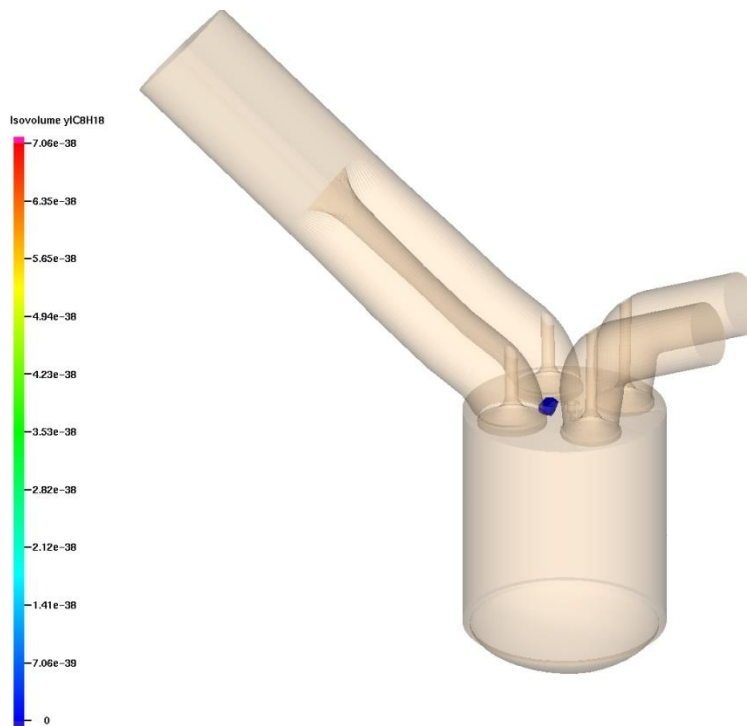


Figure 4.17 : Contours de spray à -165°V

- Spray à -160°V

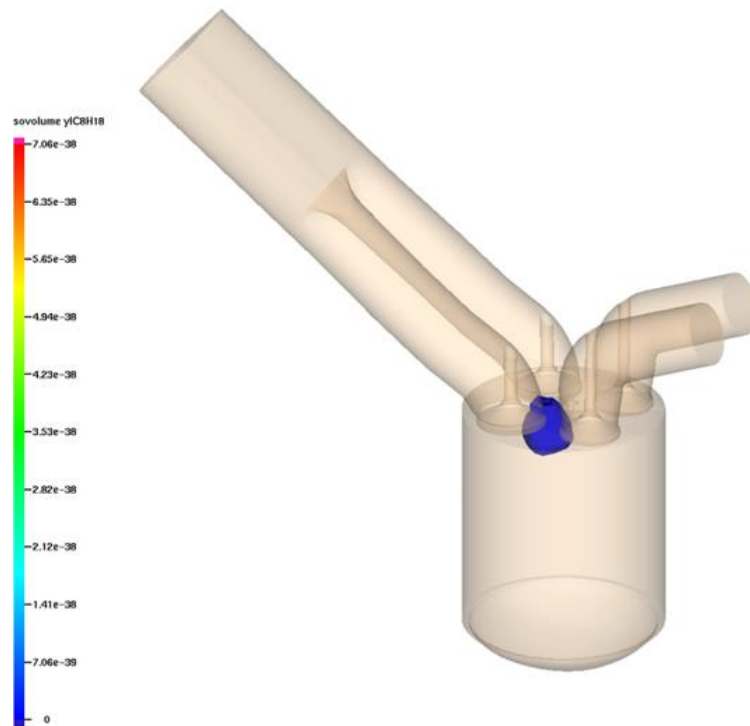


Figure 4.18 : Contours de spray à -160°V

- Spray à -150°V

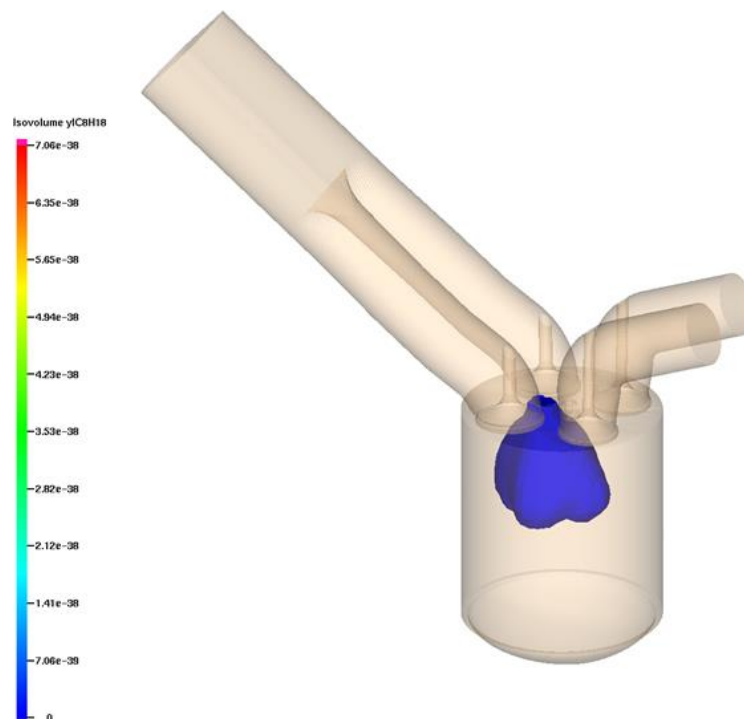


Figure 4.19 : Contours de spray à -150°V

- Spray à -140°V

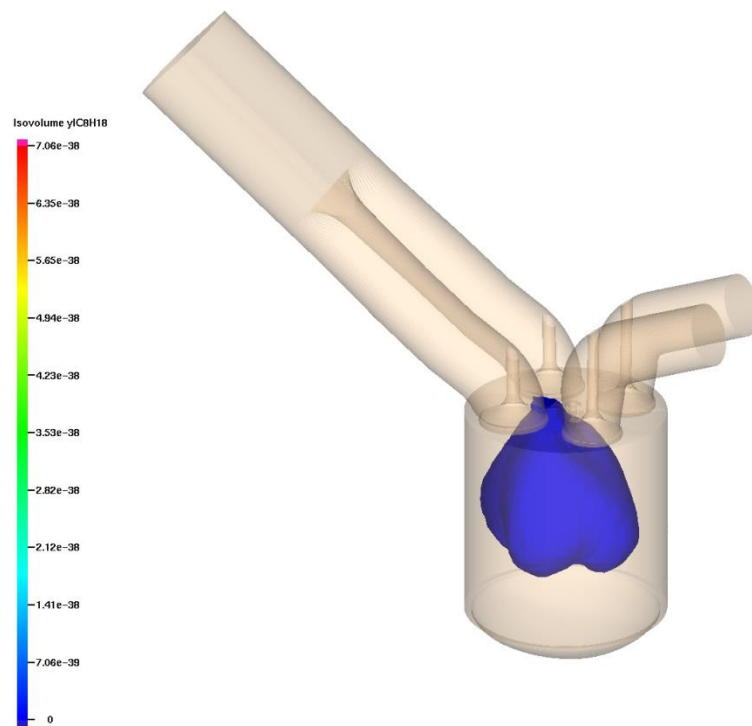


Figure 4.20 : Contours de spray à -140°V

- Spray à -130°V

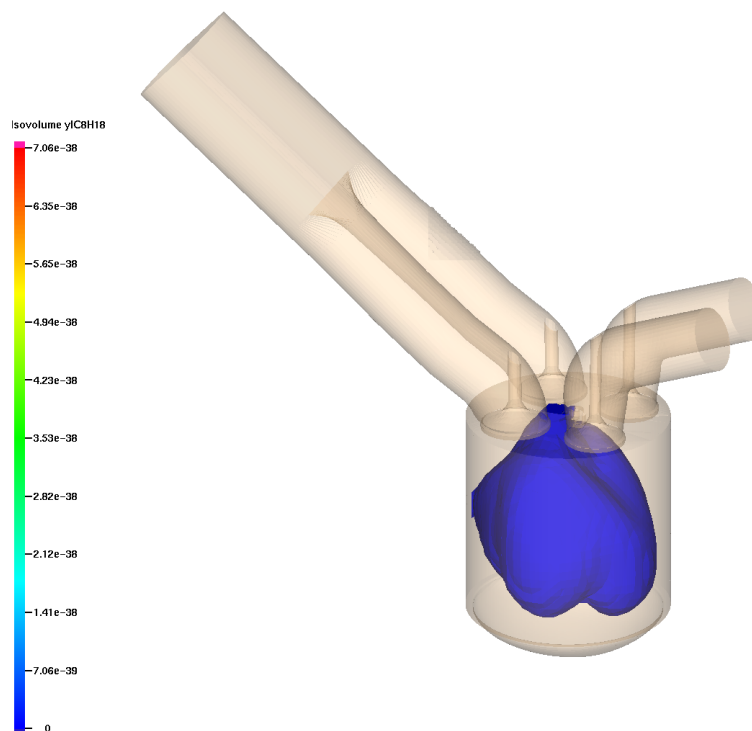


Figure 4.21 : Contours de spray à -130°V

- Spray à -120°V

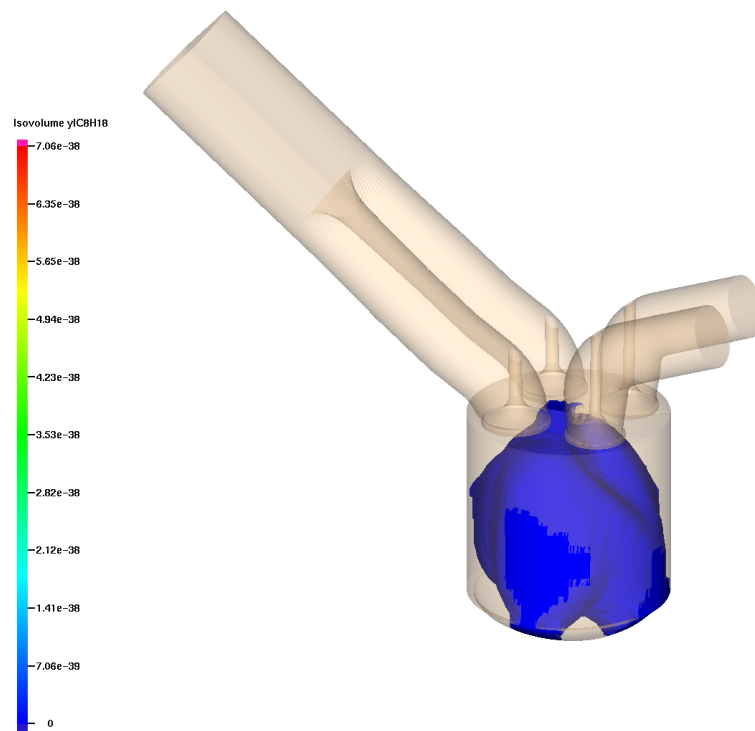


Figure 4.22 : Contours de spray à -120°V

- Spray à -100°V

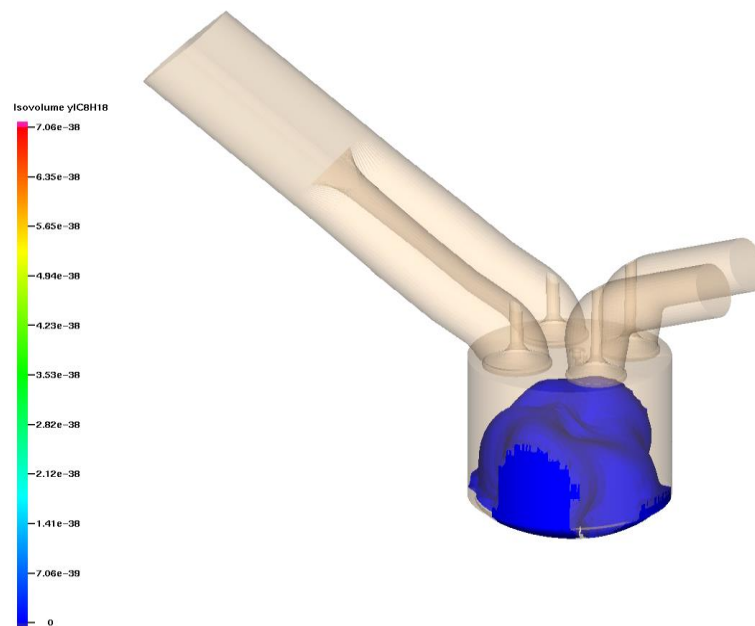


Figure 4.23 : Contours de spray à -100°V

➤ GPL

- Spray à -220°V (début de l'injection)

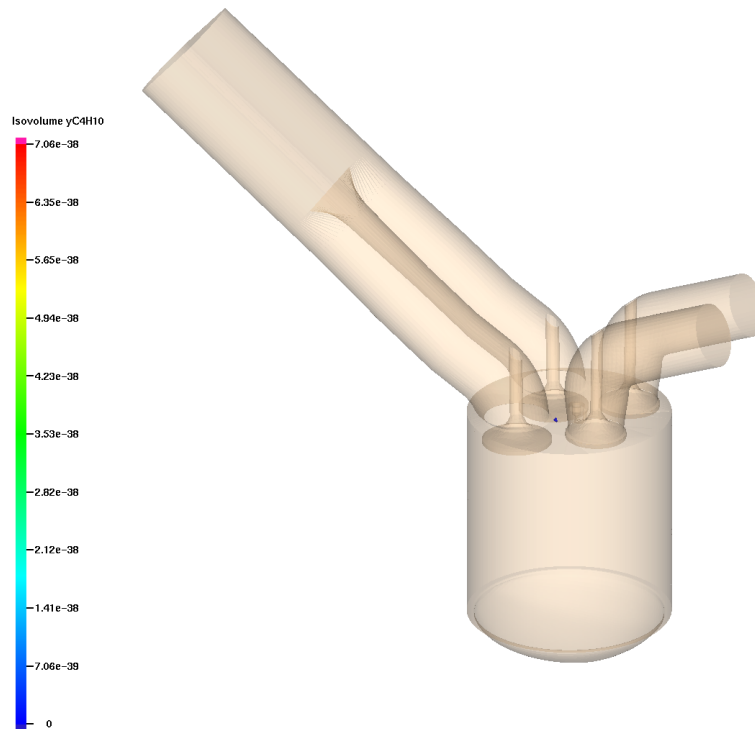


Figure 4.24 : Contours de spray à -220°V

- Spray à -216°V

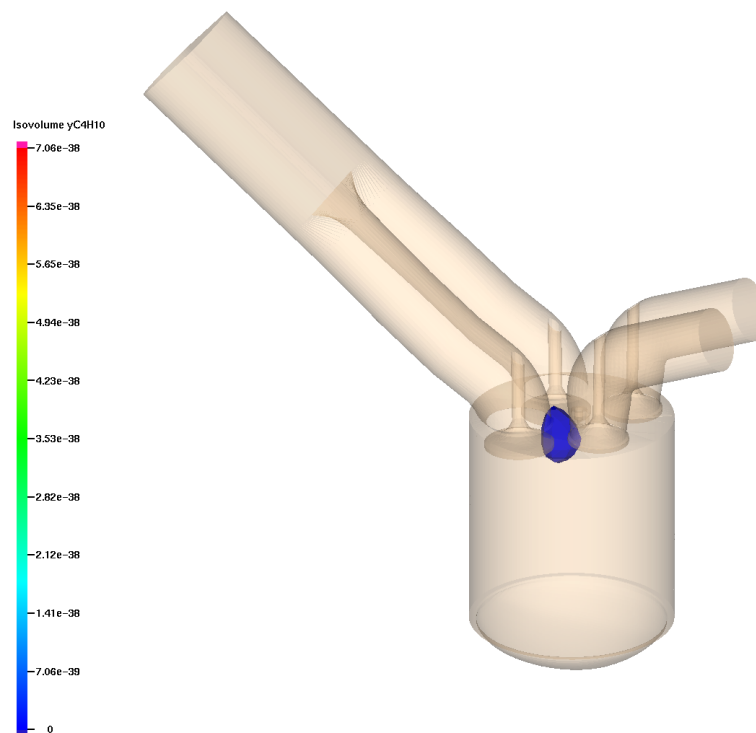


Figure 4.25 : Contours de spray à -216°V

- Spray à -210°V

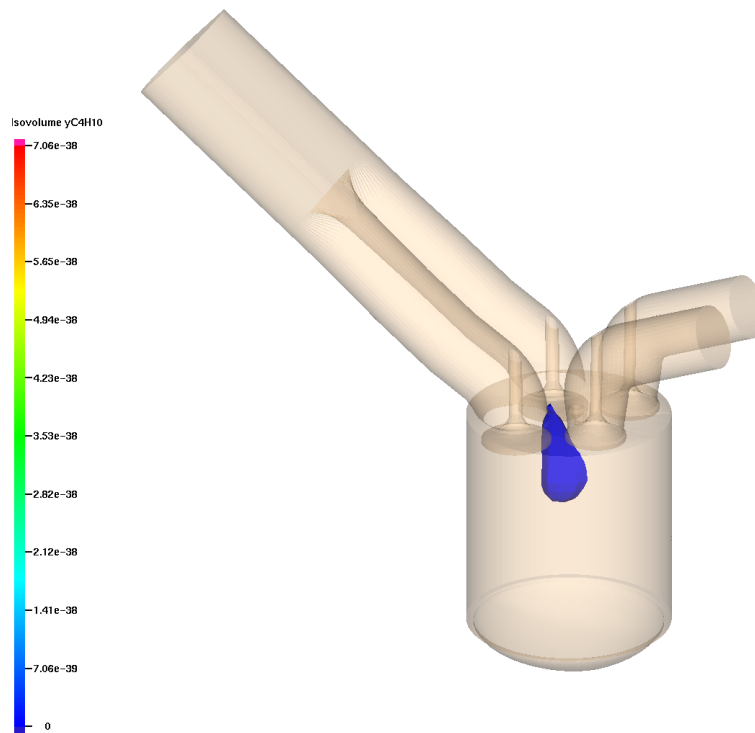


Figure 4.26 : Contours de spray à -210°V

- Spray à -200°V

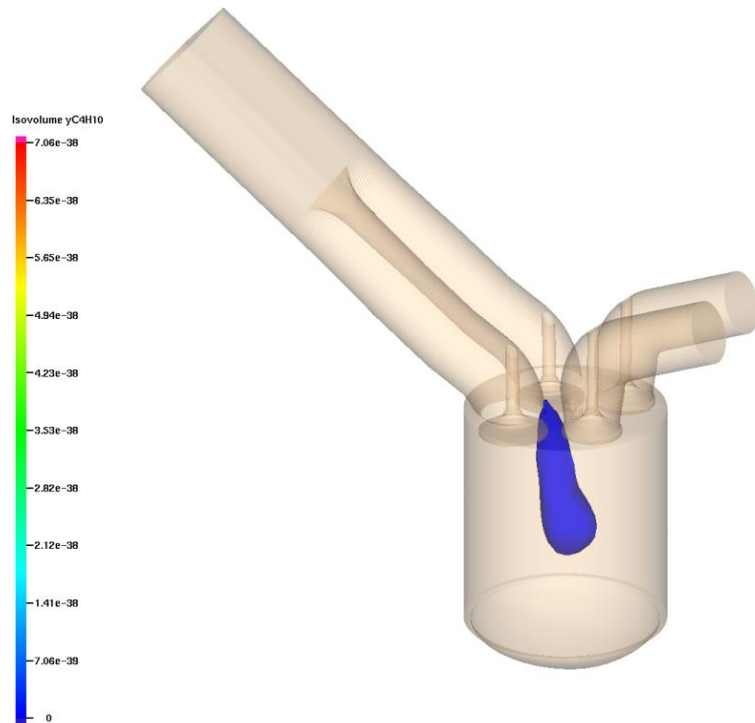


Figure 4.27 : Contours de spray à -200°V

- Spray à -180°V

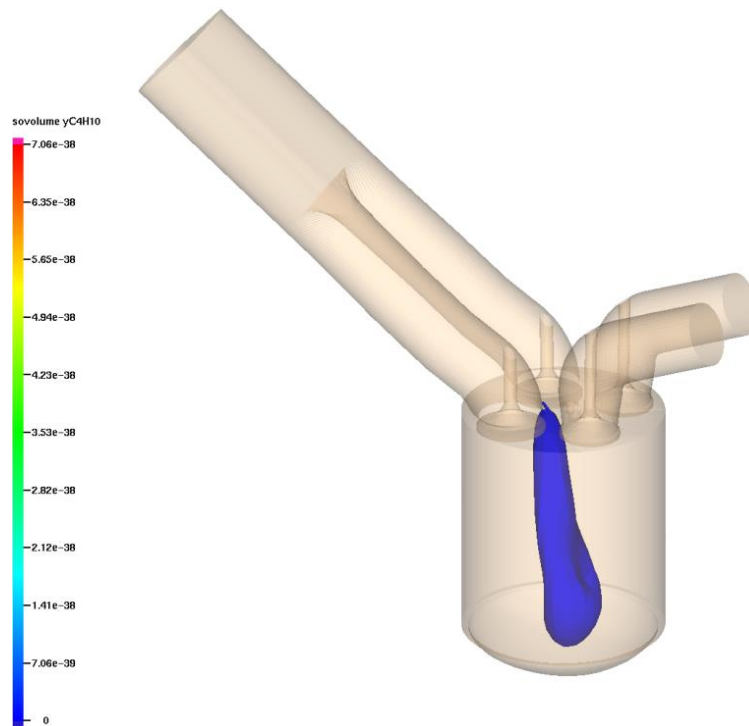


Figure 4.28 : Contours de spray à -180°V

- Spray à -170°V

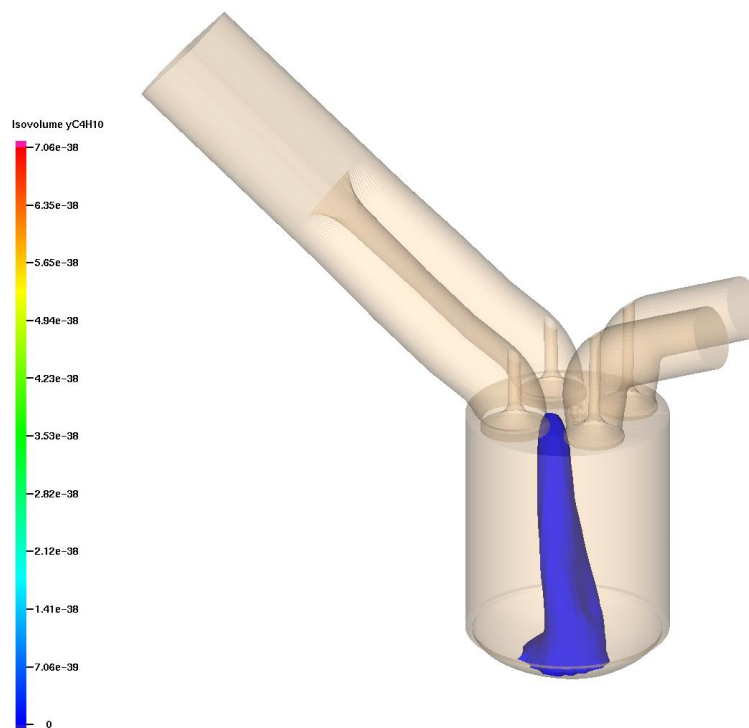


Figure 4.29 : Contours de spray à -170°V

- Spray à -160°V

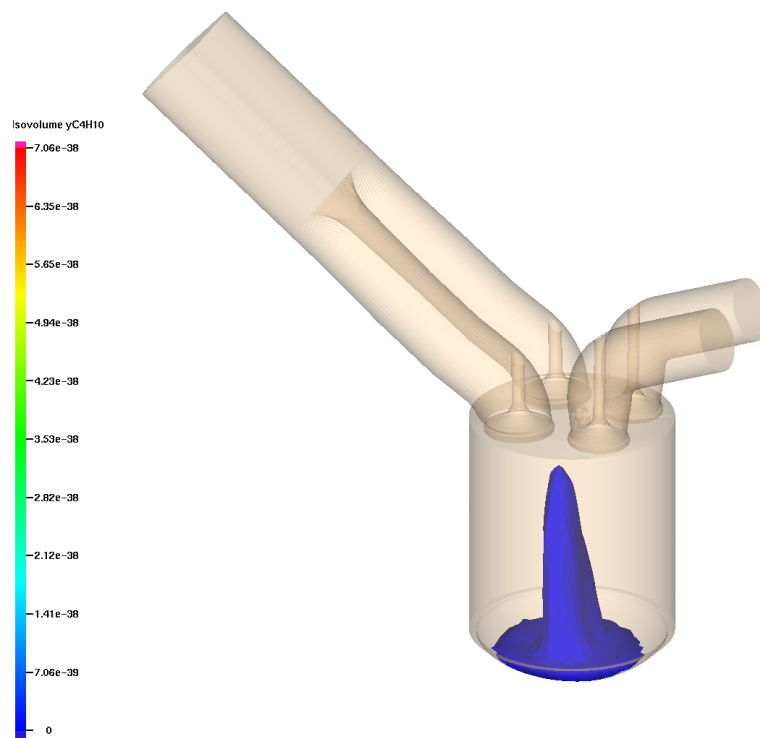


Figure 4.30 : Contours de spray à -160°V

- Spray à -150°V

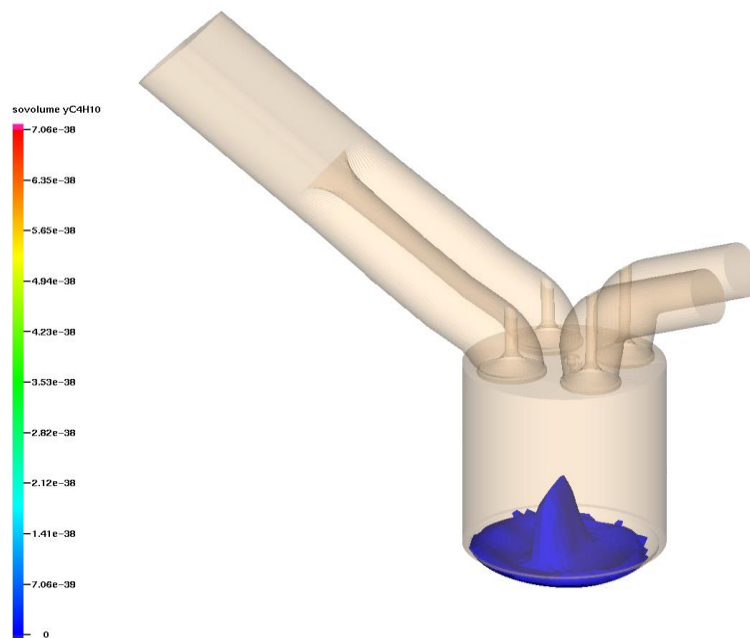


Figure 4.31 : Contours de spray à -150°V

En comparant les contours obtenus en utilisant l'essence et ceux en utilisant le GPL, on remarque une différence de forme de carburant lors de son injection.

Cette différence est due à la densité : le GPL est moins dense que l'essence, leurs valeurs sont 0.51 et 0.72 respectivement, c'est pour ça on remarque que l'essence prend une forme bien définie et occupe plus de volume dans la chambre de combustion.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a validé les résultats numériques de la combustion dans un moteur à allumage commandé et un moteur GPL à injection directe; en utilisant une version de CONVERGE 2.3V

On a présenté les résultats de la simulation sous forme de profils et e contours, ils ont abouti aux remarques suivantes :

- Ce travail constitue un outil supplémentaire à l'effet de comprendre le processus de combustion dans les moteurs essence et les moteurs GPL.
- Les modèles utilisés dans ce travail pour représenter les phénomènes à l'intérieur de la chambre de combustion (dégagement de chaleur, Température, Allumage, Combustion,...) donnent des bons résultats.
- Le modèle SAGE est fort capable de prédire le phénomène de combustion au sein de la chambre de combustion.
- Le GPL peut être considéré comme un carburant alternatif pour les moteurs à combustion interne grâce à ses avantages environnementaux et sa réduction des émissions polluantes : c'est un composé quasiment pur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Provoquée par le rejet intempestif de substances diverses dans l'atmosphère, la pollution atmosphérique constitue sans aucun doute la plus évidente des dégradations de l'environnement. Les moteurs thermiques, par leur développement gigantesque ces dernières décennies, représentent actuellement une source très importante de ces émissions gazeuses ou particulaires envoyées dans l'atmosphère.

Pour cela une utilisation des sources d'énergie de substitution plus écologiques que les produits pétroliers conventionnels est nécessaire.

Dans ce cadre, le GPL bénéficie d'un grand intérêt en tant que carburant alternatif propre. Ce carburant est devenu de plus en plus demandé par les secteurs utilisant ce dernier comme source d'énergie. Les deux tiers environ de GPL dans le monde sont produits à partir des usines de gaz naturel et un tiers est issu des raffineries de pétrole brut.

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude de la combustion turbulente dans une chambre de combustion cylindrique en utilisant l'essence et le GPL.

L'étude est purement numérique, basée sur l'approche de simulation numérique qui est un outil très important et moins coûteux que les mesures expérimentales et qui nous permet, aussi, 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 modèles récents de combustion rend l'association entre l'approche numérique et le travail expérimental de plus en plus 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.

Alors, notre étude émane de la nécessité de comprendre et de maîtriser le code de calcul puissant «CONVERGE» utilisé surtout pour la simulation de combustion des moteurs. Tout d'abord on a installé le code CONVERGE V2.3. Ensuite, la maîtrise du code à travers les trois volets pré-processing, processing et post-processing. De plus, des logiciels sont utilisés pour le post-traitement des résultats, tels que: Origin et Ansys Mesa pour les illustrations 2D et 3D.

Il est nécessaire de connaître les conditions de fonctionnement du moteur ainsi que les modèles physiques et chimiques utilisés pour la prédiction du cycle moteur. La masse du carburant, le type du carburant, les propriétés du carburant,...etc influent beaucoup sur les résultats de simulation aux niveaux de combustion et les performances du moteur.

Ce travail préparé au Laboratoire de Recherche en Technologie de l'Environnement (LTE) nous a permis de bien comprendre le processus de combustion au sein de la chambre et aussi l'influence des paramètres d'injection comme l'instant d'injection, la durée d'injection et le nombre des becs dans un moteur à essence et au GPL à injection directe.

Après la présentation des moteurs à allumage commandé dans la première partie, de la conversion des moteurs essence au GPL dans le deuxième chapitre, des détails des modèles physiques et chimiques et de l'historique du code de calcul converge afin de simuler la combustion au sein de la chambre de combustion du moteur étudié dans la troisième partie, on a exposé dans le dernier chapitre l'application et des résultats obtenus.

La validation du CFD se base sur une comparaison entre les résultats du moteur à allumage commandé et ceux issus du moteur fonctionnant au GPL.

Les résultats rapportés montrent clairement le processus de combustion et de formation des gaz polluants dans un moteur essence et un moteur GPL à injection directe et aussi l'évolution de la température, la pression, le taux de chaleur et les gaz polluants durant la combustion.

En prenant compte de cette étude, on peut dire que les résultats que nous avons obtenus, sont satisfaisants, on a pu montrer que le GPL comme une solution alternative, contribue à la diminution de la pollution atmosphérique qui devient une préoccupation et un enjeu majeur dans le monde entier grâce à ses caractéristiques respectueuses de l'environnement, et aux niveaux d'émission de polluants relativement bas comparés aux autres combustibles fossiles comme l'essence à titre d'exemple. Avec une consommation de GPL d'environ 20% de plus, ce dernier engendre 18% moins de dioxyde de carbone, et dix fois moins de particules fines.

Malgré les efforts et de travaux des recherches fournis par tous les constructeurs moteurs du monde, il reste encore un champ important pour l'amélioration de l'utilisation et la production des biocarburants à partir de différentes natures.

Références

Références

- [1] M. Gratadour , «Moteurs thermiques : Introduction aux moteurs alternatifs», 10 mai 1995.
- [2] J. Trapy, Moteur à allumage commandé, Techniques de l'Ingénieur, 1992, vol BM2540, 20p.
- [3] R. Maamri, « Modélisation et expérimentation des moteurs a combustion fonctionnant avec différents carburants de substitution et mélanges », thèse de doctorat, Université du Quebec, Octobre 2014.
- [4] A. Merabet, « Contribution à l'étude des échanges thermiques dans un moteur diesel atmosphérique à taux de compression variable », thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine.
- [5] A. Charles, «le moteur à combustion interne», Edition 04/08/2008.
- [6] H .Bousbaa. , « Les moteurs à combustion interne, cours de master 2 », 2015/2016.
- [7] P. Sovanna, « Moteurs thermiques »: fonctionnement du moteur, moteurs à cycle deux temps, 2004.
- [8] Dr. M. Bencherif «Moteurs à combustion interne, combustion et éléments de carburation », photocopié destiné aux étudiants de Licence et Master LMD, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohammed Boudiaf, 2018.
- [9] J. Foussard et E. Julien, éd. Dunod «Thermodynamique», Paris 2005.
- [10] A. Medellel, «Etude de cycle et de performances d'un moteur à combustion interne », thèse de mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [11] Pulkrabek, W.W. Engineering fundamentals of the internal combustion engine, Prentice- Hall, New Jersey, USA, 2004.
- [12] H. Mazet, « Moteur à allumage commandé (Composants et stratégie de contrôle) ». 2001, BM2970.
- [13] G. Delay, analyse des écoulements transitoires dans les systèmes d'injection directe essence effets sur l'entraînement d'air instationnaire du spray, 23 mars 2005.
- [14] www.techni-tacot.com/fiches/carbu.htm [consulté le 21/04/2021].
- [15] E.Goncalvès da Silva, Jean-Paul Thibault, «Cycles thermodynamiques des machines thermiques», Octobre 2008.

- [16] M. Hubert, C. Bruno, « technologie fonctionnelle de l'automobile-Tome 1 », édition DUNOD, 2014.
- [17] A.Tiago, L.Nabais, « commande et contrôle d'injection des moteurs à essence », University of Applied Sciences, Western Switzerland, 2008.
- [18] P. Sovanna. Cours moteurs thermiques: Système d'alimentation, ITC/GIM, Editor, 2004, 14p.
- [19] M. Miard, Cours moteurs, L'injection essence .
- [20] P. Sovanna, Cours moteurs thermiques: Système d'allumage, ITC/GIM, Editor, 2004, 11p.
- [21] P. Sovanna, Cours moteurs thermiques: Système de lubrification, ITC/GIM, Editor, 2004, 7p.
- [22] P. Sovanna, Cours moteurs thermiques: Système de refroidissement, ITC/GIM, Editor, 2004, 7p.
- [23] S. Kabar, « étude numérique de l'effet du type de carburant sur les émissions polluantes dans un moteur», thèse de mémoire de magister, 29/11/2006.
- [24] I. Caplain, « Mesure des émissions polluantes automobiles - Application à la modélisation eulérienne 3D de la formation des oxydants photochimiques dans la troposphère », thèse de doctorat, université des sciences et technologies de LILLE, 11 mai 2005.
- [25] S. Touchard « Construction et validation de modèles cinétiques détaillés pour la combustion de mélange de modèles des essences. », thèse de doctorat, E.N.S.I.C. – NANCY, 12 Octobre 2005.
- [26] S. Kabar , « étude numérique de l'effet du type de carburant sur les émissions polluantes dans un moteur», thèse de mémoire de magister, 29/11/2006
- [27] Mohammed, S.E.; Baharom, M.B.; Aziz, A.R.A.; and Firmansyah, F. (2011). International Journal of Hydrogen Energy, 36(18), 11997-12006
- [28] Szybist, J, & Bunting, B. Chemistry Impacts in Gasoline HCCI, Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- [30] J. Lompo, «Analyse et dimensionnement des procédés de production des carburants du futur: les procédés d'estérification », Mémoire de fin de formation d'ingénieur, Master2, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2007-2008.
- [31] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biocarburant>
- [32] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz> [consulté le 17/04/2021].

- [33] « Moteur 1,6 l BICARBURATION », Cahier didactique n° 134, 9 Juin 09.
- [34] Comité Français Butane Propane, GPL carburant historique, site web www.cfbp.fr, [consulté le 20/04/2021].
- [35] Gaz de pétrole liquéfiés, site web www.naftal.dz, [consulté le 17/04/2021].
- [36] NAFTAL, « La sécurité dans la conversion SIRGHAZ », document de lecture, KHROUB 2017.
- [37] « Moteur 1,6 l BICARBURATION », Cahier didactique n° 134, 9 Juin 09.
- [38] A.I. Abdeldjalil, M. Djelti, Optimisation de la distribution des bouteilles en gaz butane (B13) : Cas de l'entreprise Naftal GPL Tlemcen, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie-industriel, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, 2015/ 2016.
- [39] A.I. Abdedjalil, Rapport de stage dans le centre d'enfûtage Naftal GPL Tlemcen : Génie industrielle, université Abou Bakr Belkaid : TLEMCCEN : 2013.
- [40] L. Chebli et Y. Abbassi, calcul des paramètres de fonctionnement du dépropaniseur (UNITÉ (38) ; traitement de GPL), module III à Hassi R'mel : génie des procédés : Biskra : Université Mohamed Khider Biskra : 2012.
- [41] Y. Dalil, GPL techniques et problématiques\raffinerie de SBAA(ADRAR) : Mémoire de projet fin d'étude : Génie des procédés : Ourgla, université Kasdi Merbah Ouargla : 2012.
- [42] Propriétés du GPL, Température d'ébullition et tension de vapeur, site web www.cfbp.fr [consulté le 20/04/2021].
- [43] Source www.primagaz.fr [consulté le 15/04/2021].
- [44] Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail.
- [45] S. Benaoui, M. Kesraoui, Optimisation de la distribution du GPL/C (Gaz de Pétrole Liquéfié/Carburant) Cas d'étude : NAFTAL Tlemcen, Projet de fin d'étude : Génie Industriel, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2018/2019.

- [46] N. Mouni, Simulation et optimisation des paramètres technologiques de l'unité de fonctionnement des GPL à Houad Berkaoui, mémoire de magister, Génie des procédés : Boumerdes, université M'hamed Bougara – Boumerdas, 2012/2013.
- [47] N. Allal et A. Magroud, optimisation des paramètres de marche de la section de stabilisation du condensat (module « 0 » au niveau de hassi r'mel) : Génie de procédés : Ouargla, université Kasdi Merbah Ouargla : 2010.
- [48] <https://www.antargaz.fr/gpl-carburant/avantages> [consulté le 21/04/2021].
- [49] A. Mezrague et N. Ounnas, «Simulation numérique du comportement thermique d'un réservoir de stockage de propane », thèse de master, Université Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou, 2014/2015
- [50] « Véhicules fonctionnant au GPL Mesures de prévention contre le risque explosion », l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), ED 6093 juillet 2011.
- [51] « Revue Algérienne de l'Energie », 2015.
- [52] H. Aliaoui, A. Mostefaoui, Etude de la combustion turbulente dans un moteur à gaz alimenté en CH₄, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master en génie mécanique, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2014/2015.
- [53] Bobmarleyponge.free.fr
- [54] M. Ouameur, « la conversion des véhicules au GPL/C »
- [55] Landirengo, Manuel des composants et d'installation LANDIRENZO OMEGAS/GI
- [56] E.Naudin, Document Renault (étude du système), GPL 2 étude-du système
- [57] <https://www.dacia.fr/gpl/fonctionnement-bicarburant-essence-gpl.html> [consulté le 24/04/2021].
- [58] <https://www.primagaz.fr/guide-choisir-energie/projet-gaz-propane/gpl-carburant/moteurs-gplcarburant/moteurs-gpl> [consulté le 17/04/2021].
- [59] <https://www.autonews.fr/green/dossiers/rouler-au-gpl-avantages-et-inconvenients-du-carburant-93151#:~:text=Les%20avantages,fois%20moins%20de%20particules%20fines> [consulté le 21/04/2021].

- [60] Association européenne des gaz de pétrole liquéfiés, site web : www.aegpl.eu, (Mai 2010).
- [61] 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 1.4), Convergent Science, Inc., Middleton, WI. (2008).
- [62] 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.
- [63] K.J. Richards, P.K. Senecal, and E.Pomraning, CONVERGE Manual, CONVERGE CFD 2.3, Convergent Science, Inc., Middleton, WI. (2017).
- [64] Numerical Mathematics Group Computing & Mathematics Research Division Lawrence Livermore National Laboratory, California, 1992.
- [65] R. Aglave, CFD Simulation of Combustion Using Automatically Reduced Reaction Mechanisms: A Case for Diesel Engine., thèse de doctorat, University of Heidelberg 2007.
- [66] D. Khiar , «Modélisation et commande d'un moteur thermique à allumage commandé», Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007. Français.
- [67] C. Correa , « combustion simulation in diesel engines using reduced reaction mechanism », thèse de doctorat, university of Heidelberg 2000.
- [68] B. Zuo , A.M. Gomes and C.J. Rutland, Studies of Superheated Fuel Spray Structures and Vaporization in GDI engines, 11th International Multidimensional engine Modeling User's Group Meeting, [Http://www.erc.wisc.edu](http://www.erc.wisc.edu), 2001.

- [69] C. Baumgarten , « Mixture Formation in Internal Combustion Engines, Springer- Verlag Berlin Heidelberg», New York, 2006.
- [70] R. D. Reitz , « Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays» Atomisation and Spray Technology, Vol. 3, p. 309, 1987.
- [71] J. Xin , L Ricart. and R. D., Reitz, « Computer Modeling of Diesel Spray Atomization and Combustion», Combust. Sci. and Tech., Vol. 137, p. 171, 1998.
- [72] 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 2.2), Convergent Science, Inc., Middleton, WI. (18 may 2015).
- [73] P. J .O'Rourke, « Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays», Ph.D. Thesis, Princeton University, 1981.
- [74] C. Baumgarten, Mixture Formation in Internal Combustion Engines, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2006.
- [75] A. Amsden, P. J .O'Rourke. and , T. D Butler., « KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays», Los Alamos National Laboratory Report No. LA-11560-MS, 1989.
- [76] Z. Han. and, R. D. Reitz., « A Temperature Wall Function Formulation for Variable Density Turbulence Flow with Application to Engine Convective Heat Transfer Modeling», Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 40, 1997.
- [77] .J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, Inc., 1988.
- [78] H. Hiroyasu and T.Kadota, «Models for Combustion and Formation of Nitric Oxide and Soot in DI Diesel Engines», SAE Paper No. 760129, 1976.
- [79] N. L. Johnson. The Legacy and Future of CFD at Los Alamos, proceedings of the 1996 Canadian CFD Conference Invited talk. Ottawa, Canada June 3-4, 1996.

- [80] A. Amsden, T. D. Butler, P. J. O'Rourke, J. D. Ramshaw. « KIVA-A comprehensive model for 2-D and 3-D engine simulations», S4E Paper 850554, 1985.
- [81] A. Amsden, T. D. Butler, P. J. O'Rourke , J. D. Ramshaw. « KIVA-A comprehensive model for 2-D and 3-D engine simulations», S4E Paper 850554, 1985.
- [82] N. Kong. Kiva note_part3: the computer program, 1999.
- [83] R. I. Issa, « Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operatorsplitting».1980.
- [84] C. M. Rhie and W. L. Chowt, « numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation», Vol. 21, N. 11, 1983.
- [85] M. Jia, and M. Xie, « A Chemical Kinetics Model of Iso-Octane" Oxidation for HCCI Engines», Fuel, Vol. 85, pp. 2293-2604, 2006.

ملخص

كان اختراع محرك الاحتراق بالشرارة خطوة مهمة في تاريخ محركات الاحتراق الداخلي. في السنوات الأخيرة ، شهدت محركات البنزين تطوراً لا يمكن إنكاره بفضل كفاءتها الاستثنائية. ومع ذلك ، فإنها تنبعث منها ملوثات مثل أكسيد النيتروجين وجزئيات السخام. أصبح تطبيق معايير انبعاث الملوثات أكثر صرامة. في هذا السياق ، تم إجراء قدر كبير من العمل البحثي لتحديد مصادر الطاقة البديلة الأكثر إيكولوجية من المنتجات البترولية التقليدية. يتمتع غاز البترول المسال باهتمام كبير. الاستهلاك العالمي لهذا الأخير في تزايد مستمر بسبب سجله الاقتصادي الموثوق به كوقود نظيف وفعال للمستقبل. الهدف من هذا العمل هو إتقان أداة محاكاة CFD ، للسماح بفهم متعمق لخصائص الاحتراق ، وأيضاً ، ملاحظة تشكل الملوثات بتكلفة أقل. في هذه الدراسة اعتمدنا على كود CONVERGE 2.3 لدراسة الظواهر التي تظهر في الأسطوانة أثناء مرحلة الاحتراق على وجه الخصوص. تم استخدام نهج RANS. تم وصف الاحتراق بواسطة نموذج SAGE ، والرش بواسطة نموذج KH-RT ، والاضطراب ، والاشتعال ، وتكوين أكسيد النيتروجين والسخام بواسطة نماذج k-RNG ، و Hiroyasu ، و Zeldovich على التوالي. ستتم مقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها بواسطة رمز الكمبيوتر هذا لمحرك البنزين بالحقن المباشر مع نتائج محرك غاز البترول المسال الذي يعمل بنفس نوع الحقن. **الكلمات المفتاحية :** محرك الإشعال بالشرارة ، غاز البترول المسال ، الحقن المباشر ، الاحتراق ، CONVERGE V2.3 ، المحاكاة الرقمية.

ABSTRACT

The invention of the spark ignition engine was an important step in the history of internal combustion engines. In recent years, gasoline engines have undergone an undeniable development thanks to their exceptional efficiency. However, they emit pollutants such as NOX and soot particles. The application of pollutant emission standards is becoming more and more stringent.

In this context, a great deal of research work has been carried out with the aim of identifying alternative energy sources that are greener than conventional petroleum products.

LPG enjoys great interest. Global fuel consumption is steadily growing due to its reliable economic record as a clean and efficient fuel for the future.

The objective of this work is to master a CFD simulation tool, to allow a thorough understanding of the characteristics of combustion and also provides for the formation of pollutants at a lower cost.

In this study, we have based on the CONVERGE code 2.3 to study the phenomena which appear in the cylinder during the combustion phase in particular. The RANS approach is used. Combustion is described by the SAGE model, the spray by the KH-RT model, turbulence, ignition, formation of NOX and soot by the RNG models k-ε, Hiroyasu, and Zeldovich respectively.

The numerical results obtained by this computer code for a direct injection gasoline engine will be compared with results for an LPG engine operating with the same type of injection.

Keywords: Spark ignition engine, Liquefied Petroleum Gas, direct injection, combustion, CONVERGE V2.3, digital simulation.

Résumé

L'invention du moteur à allumage commandé était un pas important dans l'histoire des moteurs à combustion interne. Ces dernières années, les moteurs à essence ont connu une incontestable évolution grâce à leur rendement exceptionnel. Cependant, ils émettent des polluants tels que les NO_x et les particules des suies. L'application de normes d'émission de polluants devient de plus en plus sévère.

Dans ce contexte, un grand nombre de travaux des recherches ont été menés dans le but d'identifier des sources d'énergie de substitution plus écologiques que les produits pétroliers conventionnels.

Le GPL bénéficie d'un grand intérêt. La consommation mondiale de ce dernier est en croissance continue due à son bilan économique fiable en tant qu'un carburant propre et efficace pour l'avenir.

L'objectif de ce travail est de maîtriser un outil de simulation CFD, pour permettre une compréhension approfondie des caractéristiques de la combustion et prévoit également la formation des polluants à un moindre coût.

Dans cette étude, on a basé sur le code converge 2.3 pour étudier les phénomènes qui se manifestent dans le cylindre durant la phase de combustion notamment. L'approche RANS est utilisée. La combustion est décrite par le modèle SAGE, le spray par le modèle de KH-RT, la turbulence, l'allumage, la formation des NO_x et des suies par les modèles RNG k-ε, Hiroyasu, et Zeldovich respectivement.

Les résultats numériques obtenus par ce code de calcul pour un moteur essence à injection directe seront comparés avec des résultats d'un moteur GPL fonctionnant avec le même type d'injection.

Mots-clefs : Moteur à allumage commandé, Gaz Pétroliers Liquéfiés, injection directe, combustion, CONVERGE V2.3, simulation numérique.