



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

N° d'enregistrement

.../.../...

Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Electromécanique

Spécialité: Maintenance industrielle

Thème

Étude de l'adaptation du GPL dans un moteur à essence

Présenté par :

RECHOUM Saber youb

KACIOUSALAH Hadj ahmed

Soutenu publiquement le : 13./06/2026

Devant le jury composé de:

Abdeslam KIFOUCH	MCA	Univ. Ghardaïa	Président
Charaf Abdelkarim MOSBAH	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
Belgacem BEKKAR	MCA	Univ. Ghardaïa	Encadrant
Brahim ZITANI	MAA	Univ. Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2025/2026

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude envers Dieu, notre Créateur, pour nous avoir donné la force et le courage nécessaires pour accomplir ce travail.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail avec équité et précision.

Nous exprimons notre sincère gratitude à nos superviseurs, le Dr. Belgacem BEKKAR et le Dr. Brahim ZITANI, pour leur confiance, leur soutien scientifique et leur accompagnement tout au long de ce projet. Leur expertise et leur compétence ont été essentielles à notre succès.

Nous adressons également nos remerciements profonds à tous les professeurs et employés de l'Université de Ghardaïa, pour les ressources et l'aide qu'ils nous ont fournies tout au long de notre parcours académique.

Un remerciement spécial à tous les membres du département d'automatique et électromécanique pour leur aide précieuse, leur attention constante et leur disponibilité permanente.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à nos amis pour leur soutien, leur patience, leur compréhension et leurs encouragements tout au long de cette période.

Enfin, nous n'oublions pas M. Ahmed LATRECHE, qui nous a accompagnés pendant notre stage pratique chez son atelier

Résumé

Cette étude examine l'adaptation du gaz de pétrole liquéfié (GPL) comme carburant alternatif pour les moteurs à essence afin de réduire l'impact environnemental. Elle décrit les principes de fonctionnement des systèmes bi-carburant et analyse les principaux composants impliqués, notamment le vaporisateur-régulateur et l'unité de commande électronique. Le travail présente également les principales étapes nécessaires à l'installation et à la maintenance sécurisées d'un kit GPL séquentiel sur un moteur à allumage commandé. Dans l'ensemble, la conversion au GPL est présentée comme une solution techniquement réalisable, économiquement avantageuse et écologiquement bénéfique pour prolonger l'utilisation des moteurs à combustion interne tout en contribuant à la réduction des émissions de carbone.

Mots-clés — Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), Carburant alternatif, Système bi-carburant, Moteur à essence, Injection séquentielle GPL, Moteur à combustion interne, Réduction des émissions, Transport durable.

ملخص

تتناول هذه الدراسة تكييف غاز البترول المميع (GPL) كوقود بديل لمحركات البنزين بهدف تقليل الأثر البيئي. كما تشرح مبادئ عمل أنظمة الوقود المزدوج وتحلل المكونات الرئيسية المستخدمة، بما في ذلك المبخر-المنظم ووحدة التحكم الإلكترونية. ويعرض هذا العمل كذلك المراحل الأساسية اللازمة للتركيب والصيانة الآمنة لنظام حقن تسلسلي لغاز البترول المميع على محرك ذي اشتعال بالشرارة. وبصفة عامة، يُعد تحويل المحركات للعمل بغاز البترول المميع حلاً قابلاً للتطبيق تقنياً وذا جدوى اقتصادية وفوائد بيئية، حيث يساهم في إطالة عمر استخدام محركات الاحتراق الداخلي مع الحد من انبعاثات الكربون.

الكلمات المفتاحية — غاز البترول المميع (GPL)، وقود بديل، نظام الوقود المزدوج، محرك البنزين، الحقن التسلسلي لغاز البترول المميع، محرك الاحتراق الداخلي، خفض الانبعاثات، النقل المستدام.

Abstract

This study examines the adaptation of liquefied petroleum gas (LPG) as an alternative fuel for gasoline engines with the objective of reducing environmental impact. It describes the operating principles of dual-fuel systems and analyzes the main components involved, including the vaporizer-regulator and the electronic control unit. The work also outlines the key procedures required for the safe installation and maintenance of a sequential LPG conversion kit on a spark-ignition engine. Overall, LPG conversion is presented as a technically feasible, economically attractive, and environmentally beneficial solution for extending the operational use of internal combustion engines while contributing to lower carbon emissions.

Keywords—Liquefied Petroleum Gas (LPG), Alternative Fuel, Dual-Fuel System, Gasoline Engine, Sequential LPG Injection, Internal Combustion Engine, Emission Reduction, Sustainable Transportation.

Sommaire

Remerciement.....	ii
Résumé	ii
Abstract.....	iii
Sommaire.....	iv
Liste de Figures	x
Introduction Générale	1
Chapitre 1. Généralités sur les moteurs à allumage commandé.....	1
1.1 Introduction	2
1.2 Définition du GPL	2
1.3 Origine du GPL	2
1.3.1 Extraction du gaz naturel.....	2
1.3.2 Raffinage du pétrole brut.....	3
1.4 Sources du GPL.....	3
1.5 Domaines d'utilisation du GPL	3
1.5.1 Transport : carburant GPL pour automobiles.....	3
1.5.2 Utilisation domestique et résidentielle	4
1.5.3 Industrie et artisanat	4
1.5.4 Matière première : application chimique.....	4
1.6 Composition du GPL.....	4
1.7 Comparaison entre essence et GPL	6
1.7.1 Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	6
1.7.2 Densité.....	6
1.7.3 Indice d'octane	6
1.7.4 Rapport air-carburant — AFR.....	7

1.8	Définition du moteur à allumage commandé	7
1.9	Historique	8
1.10	Les composants d'un moteur à essence.....	9
1.11	Les constituants de la structure du moteur	10
1.11.1	Le bloc-moteur	10
1.11.2	La culasse	10
1.11.3	Le carter d'huile	11
1.12	Les organes mobiles du moteur.....	11
1.12.1	Le piston.....	11
1.12.2	La bielle.....	12
1.12.3	Le vilebrequin.....	12
1.12.4	L'arbre à cames	12
1.12.5	Les soupapes.....	13
1.12.6	La courroie ou chaîne de distribution.....	13
1.13	Le système de démarrage et d'alimentation	13
1.13.1	La bougie d'allumage.....	13
1.13.2	Les injecteurs.....	14
1.14	Principe de fonctionnement.....	14
1.14.1	Admission.....	15
1.14.2	Compression.....	15
1.14.3	Combustion-détente.....	15
1.14.4	Échappement	15
Chapitre 2.	Systèmes GPL automobiles et architecture de conversion.....	16
2.1	Introduction au système GPL	17
2.2	Historique de l'utilisation du GPL dans l'automobile.....	17
2.3	Principe de fonctionnement d'un système GPL.....	18

2.4	Types d'injection de GPL.....	18
2.4.1	L'injection monopoint gazeuse	18
2.4.2	L'injection séquentielle gazeuse	19
2.4.3	L'injection liquide — LPi / LPdi	19
2.5	Les principaux composants d'un système GPL	20
2.5.1	Stockage du GPL : réservoirs et sécurité.....	20
2.5.2	Vanne solénoïde haute pression	22
2.5.3	Système de filtration à double étage.....	22
2.5.4	Vapo-détendeur	23
2.5.5	Rampe d'injection gazeuse.....	23
2.5.6	Unité de contrôle électronique — calculateur GPL	24
2.5.7	Boucle de régulation et capteurs	25
2.5.8	Bilan de la conversion GPL.....	25
2.6	Choix technologique retenu pour le véhicule du projet	25
2.7	Compatibilité du moteur avec le système GPL	25
2.7.1	Résistance des soupapes et des sièges de soupapes	26
2.7.2	Architecture d'injection : indirecte et directe.....	26
2.7.3	Moteurs à injection indirecte multipoint	26
2.7.4	Moteurs à injection directe	26
2.8	Gestion thermique et rapport volumétrique.....	27
2.9	Critères de choix de la technologie adoptée	27
2.10	Exigences environnementales et normes de dépollution.....	27
2.11	Objectifs de rendement thermodynamique.....	28
2.12	Avantages techniques de l'injection gazeuse séquentielle	28
2.12.1	Contrôle précis de la stœchiométrie	28
2.12.2	Ajustement dynamique des paramètres	28

2.12.3	Optimisation thermique	28
2.12.4	Préservation des performances moteur.....	29
2.12.5	Réduction des pertes de charge	29
2.12.6	Fiabilité et souplesse de fonctionnement.....	29
2.13	Intégration avec l'électronique embarquée	29
2.14	Longévité mécanique et impact environnemental.....	29
2.15	Intégration du GPL aux moteurs Diesel	30
2.15.1	Principe de fonctionnement.....	30
2.15.2	Perspectives du GPL avec les moteurs Diesel.....	31
Chapitre 3.	Installation d'un kit GPL sur le véhicule.....	32
3.1	Introduction	33
3.2	Présentation du véhicule et du moteur	33
3.3	Données techniques du moteur.....	34
3.4	Étapes d'installation du système GPL.....	34
3.4.1	Installation du vapo-détendeur	35
3.4.2	Installation de l'électrovanne	36
3.4.3	Installation de la rampe d'injection	36
3.4.4	Installation du filtre GPL.....	37
3.4.5	Installation du capteur de pression	37
3.5	Installation de la centrale de contrôle GPL	38
3.5.1	Installation du câblage électrique	38
3.6	Installation de la polyvanne.....	39
3.6.1	Installation du réservoir GPL	40
3.6.2	Installation des conduites de gaz	40
3.6.3	Installation de l'embout de remplissage	41
3.7	Installation du commutateur essence/GPL	41

3.8	Résultat final de l'assemblage	42
3.9	Logiciel LANDIRENZO Omegas	42
3.10	Conclusion.....	43
Chapitre 4. Étude comparative de performances [essence / GPL].....		44
4.1	Introduction	45
4.2	Comparaison de la consommation	45
4.2.1	Formule de calcul	45
4.2.2	Consommation en mode essence.....	45
4.3	Comparaison économique	46
4.3.1	Coût d'un plein.....	46
4.3.2	Coût pour 100 km.....	47
4.3.3	Projection des coûts selon la distance	47
4.4	Rentabilité de l'installation GPL.....	48
4.5	Comparaison des performances énergétiques	48
4.5.1	Définition du PCI	48
4.5.2	PCI massique et PCI volumique.....	48
4.5.3	Relation entre PCI et surconsommation volumique du GPL	49
4.6	Conclusion.....	49
Conclusion générale		50
Bibliographiques.....		51
ANNEXES.....		54
Annexe A :.....		55
1)	Maintenance et entretien des véhicules convertis au GPL	55
2)	Contrôle et réglage du circuit GPL.....	55
3)	Remplissage du réservoir GPL.....	55
4)	Panne de GPL.....	56

5) Entretien du moteur alimenté au GPL.....	56
6) Entretien périodique du système GPL.....	56
7) Diagnostic et localisation des pannes	57
8) Sécurité des opérations de maintenance	57

Liste de Figures

Figure 1-1: Cycle de Beau de Rochas	7
Figure 1-2: Moteur à allumage commandé	8
Figure 1-3: Chronologie de l'évolution du moteur.	9
Figure 1-4: Les composants d'un moteur à essence	10
Figure 1-5: Bloc-moteur.	10
Figure 1-6: Culasse.	11
Figure 1-7: Carter d'huile.	11
Figure 1-8: Piston.	11
Figure 1-9: La bielle	12
Figure 1-10: vilebrequin	12
Figure 1-11: Arbre à cames.	12
Figure 1-12: Soupapes.	13
Figure 1-13: Courroie et chaîne de distribution.	13
Figure 1-14: Bougie d'allumage.	13
Figure 1-15: Injecteur.	14
Figure 1-16: Cycle à quatre temps [14].	14
Figure 2-1 : Architecture générale d'un système GPL automobile.	17
Figure 2-2: Kit GPL séquentiel	20
Figure 2-3: Réservoir cylindrique.	20
Figure 2-4: Réservoir torique.	21
Figure 2-5: Polyvanne de sécurité.	21
Figure 2-6: Vanne solénoïde haute pression.	22
Figure 2-7: Filtre de phase liquide.	22
Figure 2-8: Filtre de phase gazeuse.	23

Figure 2-9: Vapo-détendeur.....	23
Figure 2-10 : Rampe d'injection gazeuse.	24
Figure 2-11: Calculateur GPL	24
Figure 2-12: Principe de fonctionnement d'un système Diesel–GPL.	30
Figure 3-1: Moteur Toyota 2UZ-FE.....	33
Figure 3-2 : Vapo-détendeur et ses composants.....	35
Figure 3-3 : Électrovanne GPL.....	36
Figure 3-4 : Installation des injecteurs GPL.....	36
Figure 3-5 : Filtre GPL.	37
Figure 3-6 : Capteur de pression GPL.....	37
Figure 3-7 : Centrale de contrôle GPL (ECU).....	38
Figure 3-8 : Câblage électrique du système GPL.....	39
Figure 3-9 : Polyvanne et ses composants.....	39
Figure 3-10: Réservoir GPL.....	40
Figure 3-11: Conduites de gaz du réservoir.....	40
Figure 3-12: Embout de remplissage GPL.....	41
Figure 3-13: Commutateur essence/GPL.....	41
Figure 3-14: Assemblage final du kit GPL.....	42
Figure 3-15 : Interface du logiciel LANDIRENZO Omegas.....	42
Figure 3-16 : Configuration des paramètres moteur.....	43
Figure 3-17: Paramètres de commutation du système GPL.....	43

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 : Caractéristiques physico-chimiques des GPL	5
Tableau 1-2: Comparaison entre essence et GPL	5
Tableau 3-1: Représentant les données techniques	34
Tableau 4-1: Comparaison de la consommation essence / GPL.	46
Tableau 4-2 : Coût d'un plein.....	46
Tableau 4-3 : Coût pour 100 km.....	47
Tableau 4-4 : Projection des coûts selon la distance.	47
Tableau 4-5 : Rentabilité de l'installation GPL	48
Tableau 4-6 : PCI massique et PCI volumique.....	48
Tableau 4-7 : Consommation volumique et énergie consommée.....	49

Introduction Générale

Le secteur des transports est aujourd'hui confronté à un double défi : répondre aux besoins croissants de mobilité tout en réduisant son impact sur l'environnement. Les moteurs thermiques alimentés par des carburants conventionnels demeurent une source importante d'émissions polluantes, ce qui encourage le développement de solutions énergétiques plus propres et plus durables.

Parmi les carburants alternatifs, le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) constitue une solution fiable et économique. Grâce à une combustion plus propre, il permet de réduire les émissions polluantes tout en offrant la possibilité d'adapter un moteur à essence existant à un système de bicarburant Essence/GPL. Cette conversion contribue à diminuer les coûts d'exploitation, à améliorer les performances environnementales du véhicule et à prolonger sa durée de vie.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'adaptation et la maintenance d'un kit GPL sur un moteur à essence, en mettant en évidence les aspects techniques, économiques et environnementaux de cette technologie.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier présente les généralités sur les moteurs à allumage commandé et leur fonctionnement. Le deuxième est consacré à l'étude des carburants, avec une comparaison entre l'essence et le GPL. Le troisième décrit les composants et le principe de fonctionnement d'un système GPL automobile. Enfin, le quatrième chapitre traite de l'installation, des réglages, des essais et des opérations de maintenance d'un kit GPL.

Cette étude vise ainsi à démontrer que l'adaptation d'un système GPL constitue une solution pertinente pour réduire les émissions polluantes tout en garantissant la fiabilité et les performances des moteurs à essence.

Chapitre 1. Généralités sur les moteurs à allumage commandé

1.1 Introduction

Le moteur constitue l'un des éléments fondamentaux du développement technologique moderne. Il a pour fonction principale de transformer une source d'énergie, qu'elle soit thermique, électrique ou chimique, en énergie mécanique utilisable. Cette transformation a joué un rôle déterminant dans l'évolution des transports, de l'industrie et des systèmes de production.

L'histoire des moteurs a débuté avec les premières machines à vapeur, avant l'apparition des moteurs thermiques, qui ont profondément transformé les moyens de déplacement et les activités industrielles. Aujourd'hui, le secteur connaît une nouvelle phase d'évolution avec le développement des motorisations électriques, hybrides et à hydrogène.

À chaque étape, l'objectif principal demeure l'amélioration du rendement énergétique, tout en réduisant l'impact environnemental. Ainsi, l'étude des moteurs ne se limite pas à leur fonctionnement mécanique ; elle permet également de comprendre les enjeux technologiques, économiques et environnementaux liés aux solutions de mobilité actuelles et futures.

1.2 Définition du GPL

Le GPL, ou gaz de pétrole liquéfié, désigne un mélange d'hydrocarbures légers, principalement composé de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}). Ces hydrocarbures, naturellement gazeux dans les conditions normales de température et de pression, peuvent être liquéfiés sous une pression modérée, ce qui facilite leur stockage, leur transport et leur utilisation comme carburant.

Le GPL provient principalement du traitement du gaz naturel, qui représente plus de 60 % de sa production. Le reste est obtenu lors du raffinage du pétrole brut, où il constitue environ 2 à 3 % de l'ensemble des produits raffinés [1].

1.3 Origine du GPL

Le GPL provient principalement de deux sources : le traitement du gaz naturel et le raffinage du pétrole brut.

1.3.1 Extraction du gaz naturel

L'extraction du gaz naturel à partir des gisements constitue la principale source de production du GPL, représentant plus de 60 % de l'offre mondiale. La composition du gaz extrait dépend de la nature géochimique du réservoir. Toutefois, un gaz naturel standard est généralement

constitué majoritairement de méthane **CH₄**, avec des proportions variables de propane **C₃H₈**, de butane **C₄H₁₀**, ainsi que de faibles quantités de gaz inertes et de condensats [2].

Lors du traitement du gaz naturel, les fractions les plus lourdes, notamment le propane et le butane, sont séparées du méthane afin d'obtenir le GPL.

1.3.2 Raffinage du pétrole brut

Le GPL est également obtenu lors du raffinage du pétrole brut. Le propane et le butane constituent les coupes les plus légères issues de la distillation. Ils représentent généralement entre 2 et 3 % de l'ensemble des produits raffinés.

Ces gaz peuvent aussi être récupérés lors d'opérations secondaires de traitement, réalisées après la distillation. Selon l'origine du pétrole brut, le traitement d'une tonne de pétrole peut produire environ 20 à 30 kg de GPL, composé approximativement de deux tiers de butane et d'un tiers de propane [3].

Ainsi, bien que le GPL constitue une ressource énergétique importante, sa part reste limitée dans l'ensemble des hydrocarbures disponibles à l'échelle mondiale.

1.4 Sources du GPL

Les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) proviennent de différentes sources, notamment :

- les champs pétroliers : 34 % ;
- les champs de gaz naturel : 60 % ;
- les raffineries de pétrole brut : 3 % ;
- les unités de traitement du gaz naturel : 3 %.

La charge d'alimentation est livrée par RTO (Région Transport Ouest) au complexe GP1Z sous forme de GPL brut, provenant de différents champs du Sud algérien, notamment Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Adrar, In Amenas, Tin Fouyé Tabankort et Rhourde Nous [4].

1.5 Domaines d'utilisation du GPL

1.5.1 Transport : carburant GPL pour automobiles

Le transport constitue l'application la plus répandue du GPL auprès du grand public. Le gaz de pétrole liquéfié est considéré comme l'un des carburants alternatifs les plus utilisés dans le monde [5].

Avantages : réduction importante des émissions de particules fines et d'oxydes d'azote ((NO_x)).

Champs d'application : voitures particulières, parcs de bus urbains et chariots élévateurs industriels.

1.5.2 Utilisation domestique et résidentielle

Le GPL est largement utilisé pour assurer les besoins énergétiques quotidiens, notamment dans les zones non raccordées au réseau de gaz naturel.

Cuisine : alimentation des plaques de cuisson et des fours à gaz à partir de bouteilles de GPL.

Chauffage : alimentation des chaudières individuelles et production d'eau chaude sanitaire à partir de citernes.

1.5.3 Industrie et artisanat

De nombreuses industries utilisent le GPL en raison de son pouvoir calorifique élevé et de sa combustion relativement propre.

- **Procédés thermiques** : métallurgie, verrerie et céramique.
- **Industrie alimentaire** : torréfaction du café et cuisson industrielle.
- **BTP** : travaux d'étanchéité au chalumeau et séchage des dalles.

1.5.4 Matière première : application chimique

En plus de son utilisation comme source d'énergie, le GPL sert également de matière première dans l'industrie pétrochimique. Il est utilisé pour produire des oléfines, telles que l'éthylène et le propylène, qui constituent des éléments de base pour la fabrication des plastiques, des solvants et des fibres synthétiques.

1.6 Composition du GPL

Les GPL sont constitués d'hydrocarbures saturés, principalement composés d'atomes de carbone et d'hydrogène. Il s'agit de chaînes hydrocarbonées stables dont la composition respecte des normes officielles définies par la réglementation.

La composition chimique du GPL peut varier selon les standards. (Comme le montre le tableau 1.1), les usages et les pays. En plus du propane et du butane, le GPL peut contenir de faibles quantités d'autres composés, tels que le propylène, le butène, le méthane, l'éthylène et

le pentane. Exceptionnellement, certains hydrocarbures comme le butadiène, l'acétylène et le méthylacétylène peuvent également être présents.

Tableau 1-1 : Caractéristiques physico-chimiques des GPL [6].

	Propane	Butane
Formule chimiques	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Equivalence (1L de gaz liquide est égale)	270 L De propane gazeux	239 L De butane gazeux
Pression de liquéfaction à 15 °C (Passage de l'état gazeux a l'état liquide)	7.5 bars	1.5 bar
Densité	0.58	0.51
Température d'ébullition	- 44°C	- 0.5 °C
Limite inférieure d'inflammabilité dans l'air	2.4%	1.8%
Limite supérieure d'inflammabilité	9.3%	8.8%
La masse volumique (Kg/m³)	PCI : 12.78 kWh/Kg PCS : 13.80 kWh/Kg	PCI : 12.66 kWh/kg PCS : 13 kWh/Kg
Température d'auto-inflammation	480°C	420°C
Nombre d'octane	96	89
PCI de GPL	46.1 MJ/Kg	

Tableau 1-2: Comparaison entre essence et GPL [7].

Paramètre	Essence (Sans Plomb)	GPL (Mélange Auto)	Impact Technique
PCI (Énergie)	43MJ/kg	46 MJ/kg	Le GPL contient plus d'énergie par kilogramme.
Densité	0,75kg/L	0,54kg/L	Le GPL est plus léger (expliquant la surconsommation en litres).
Indice d'Octane	95 - 98	105 – 110	Meilleure résistance au cliquetis (moteur plus "doux").
AFR (Mélange)	14,7:1	15,5:1	Nécessite plus d'air pour une combustion complète.

1.7 Comparaison entre essence et GPL

Le tableau 1.2 présente une comparaison entre l'essence sans plomb et le GPL automobile.

1.7.1 Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) désigne la quantité de chaleur dégagée lors de la combustion complète d'une unité de masse ou de volume d'un combustible, sans tenir compte de la chaleur latente contenue dans la vapeur d'eau produite par cette combustion.

Autrement dit, dans le calcul du PCI, l'eau issue de la combustion est supposée rester à l'état de vapeur. La chaleur liée à sa condensation n'est donc pas récupérée, contrairement au pouvoir calorifique supérieur (PCS), utilisé notamment dans le cas des chaudières à condensation.

1.7.2 Densité

La densité d'un corps, solide, liquide ou gazeux, correspond au rapport entre sa masse volumique et celle d'un corps de référence. Pour les liquides et les solides, le corps de référence est généralement l'eau pure à 4 °C. Pour les gaz, il s'agit généralement de l'air.

Contrairement à la masse volumique, exprimée en kilogrammes par mètre cube ((kg/m³)), la densité est une grandeur adimensionnelle, c'est-à-dire sans unité.

$$d = \frac{\rho_{\text{corps}}}{\rho_{\text{référence}}} \quad 1-1$$

avec :

- d : densité du corps ;
- ρ_{corps} : masse volumique du corps ;
- $\rho_{\text{référence}}$: masse volumique du corps de référence.

1.7.3 Indice d'octane

L'indice d'octane mesure la résistance d'un carburant au phénomène de cliquetis. Le cliquetis correspond à une combustion prématurée et incontrôlée du mélange air-carburant dans le cylindre, avant ou indépendamment de l'étincelle produite par la bougie.

Ce phénomène peut provoquer des contraintes mécaniques importantes et endommager des éléments du moteur, notamment le piston, les soupapes et la chambre de combustion.

Plus l'indice d'octane est élevé, plus le carburant est stable. Il peut alors supporter des taux de compression plus élevés sans s'enflammer spontanément.

1.7.4 Rapport air-carburant — AFR

L'AFR, ou *Air-Fuel Ratio*, désigne le rapport massique entre l'air et le carburant admis dans le moteur. L'AFR stœchiométrique correspond au rapport précis nécessaire pour obtenir une combustion complète, c'est-à-dire lorsque tout le carburant est brûlé et que tout l'oxygène disponible est consommé.

Lorsque le mélange contient un excès d'air, il est appelé **mélange pauvre** (*lean mixture*). À l'inverse, lorsque le mélange contient un excès de carburant, il est appelé **mélange riche** (*rich mixture*).

1.8 Définition du moteur à allumage commandé

Le moteur à essence, techniquement appelé **moteur à allumage commandé**, est un moteur à combustion interne qui transforme l'énergie chimique d'un carburant liquide volatil en énergie mécanique. Son fonctionnement repose sur le cycle thermodynamique de **Beau de Rochas**, également appelé **cycle à quatre temps**.

Comme le montre la **figure 1.1**, ce cycle est caractérisé par quatre phases principales :

- **Admission** : modélisée par une transformation isobare (0-1) ;
- **Compression** : représentée par la transformation (1-2), supposée adiabatique ;
- **Combustion et détente** : la combustion se déroule à volume constant entre (2-3), tandis que la détente (3-4) est adiabatique ;
- **Échappement** : l'ouverture de la soupape est modélisée par l'isochore (4-5), suivie de l'échappement représenté par l'isobare (5-0).

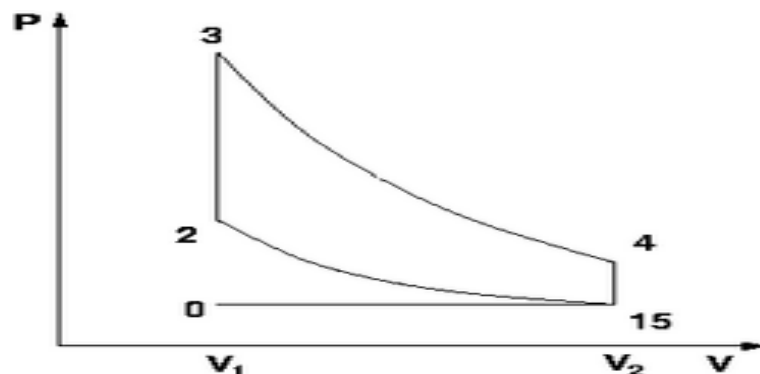


Figure 1-1: Cycle de Beau de Rochas [8].

Contrairement au moteur Diesel, le moteur à allumage commandé nécessite un système d'allumage externe. Une bougie produit une étincelle électrique qui déclenche la combustion du mélange air-carburant préalablement comprimé dans le cylindre. Cette combustion rapide provoque une augmentation de pression, qui repousse le piston et génère le mouvement rotatif nécessaire à la propulsion [9].

La **figure 1.2** présente un exemple de moteur à allumage commandé et illustre ses principaux éléments mécaniques.

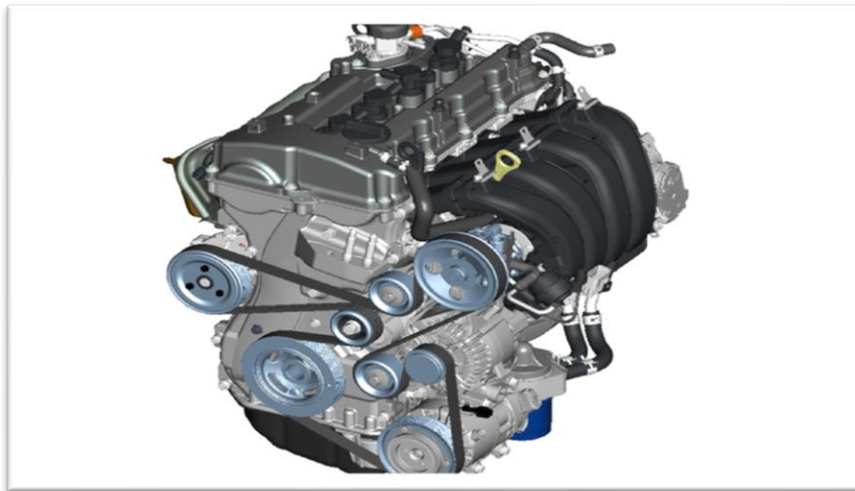


Figure 1-2: Moteur à allumage commandé [10]

1.9 Historique

L'évolution du moteur, sur près de deux millénaires, témoigne de l'ingéniosité et de l'innovation humaines. Elle remonte au Ier siècle après J.-C. avec l'éolipile de Héron d'Alexandrie, un dispositif utilisant la vapeur pour faire tourner une sphère.

Au XVIIIe siècle, James Watt améliore la machine à vapeur, ouvrant ainsi la voie à la révolution industrielle. En 1860, Étienne Lenoir propose le premier moteur à combustion interne viable. Il est suivi par Nikolaus Otto qui développe, en 1876, le moteur à quatre temps, encore largement utilisé aujourd'hui dans l'automobile.

Le XXe siècle est marqué par l'apparition et le développement des moteurs électriques, notamment grâce aux travaux de Nikola Tesla sur le moteur à courant alternatif en 1887. Les véhicules électriques apparaissent au début du XXe siècle, mais leur diffusion reste limitée en raison du développement rapide du moteur à combustion interne et de la disponibilité du pétrole à faible coût.

Aujourd’hui, sous l’effet des préoccupations environnementales et des avancées technologiques, les véhicules électriques connaissent un nouvel essor. Comme le montre la figure 1.3, l’évolution des moteurs s’oriente progressivement vers des solutions plus efficaces, durables et respectueuses de l’environnement [11].

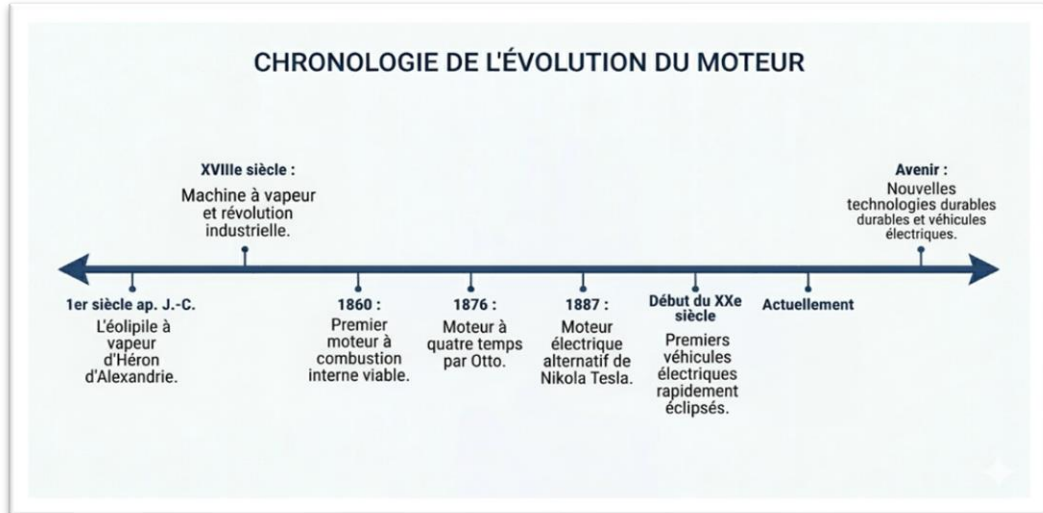


Figure 1-3: Chronologie de l’évolution du moteur.

1.10 Les composants d’un moteur à essence

Un moteur à essence est constitué de plusieurs organes mécaniques assurant l’admission, la compression, la combustion, la détente et l’échappement des gaz. Dans le cas d’un véhicule équipé d’un système de bicarburation, le même moteur peut fonctionner soit à l’essence, soit au gaz de pétrole liquéfié (GPL). Ainsi, les principaux composants mécaniques du moteur restent communs aux deux modes de fonctionnement.

La figure 1.4 présente les principaux composants d’un moteur à essence, notamment le bloc-cylindres, le piston, la bielle, le vilebrequin, les soupapes, l’arbre à cames, le collecteur d’admission, le collecteur d’échappement et le système d’allumage.

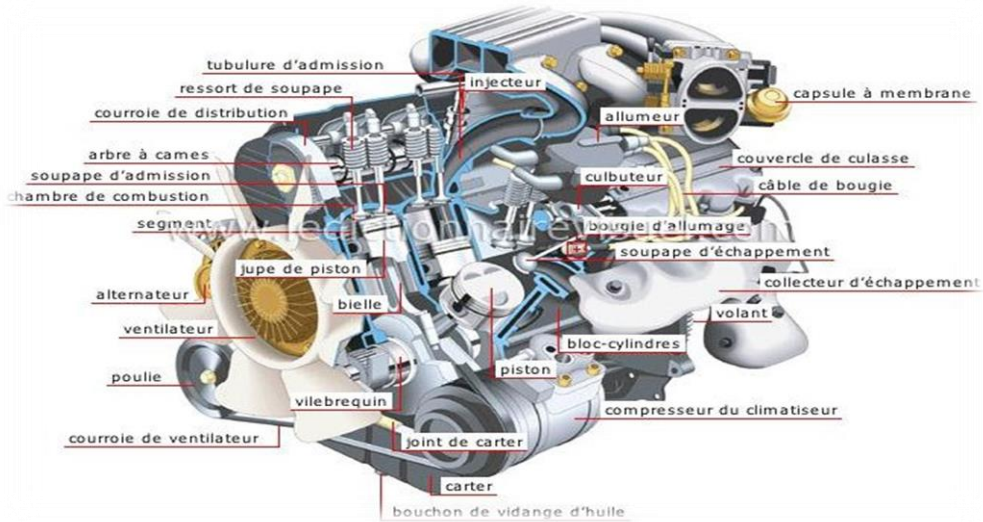


Figure 1-4: Les composants d'un moteur à essence [12]

1.11 Les constituants de la structure du moteur

1.11.1 Le bloc-moteur

Le bloc-moteur constitue le corps principal du moteur. Il est généralement fabriqué en fonte ou en aluminium. Il supporte les cylindres ainsi que plusieurs organes mécaniques essentiels.



Figure 1-5: Bloc-moteur.

1.11.2 La culasse

La culasse est située au-dessus du bloc-moteur. Elle ferme la partie supérieure des cylindres et participe à la formation de la chambre de combustion. Elle contient notamment les soupapes, les bougies d'allumage, ainsi que les conduits d'admission et d'échappement.

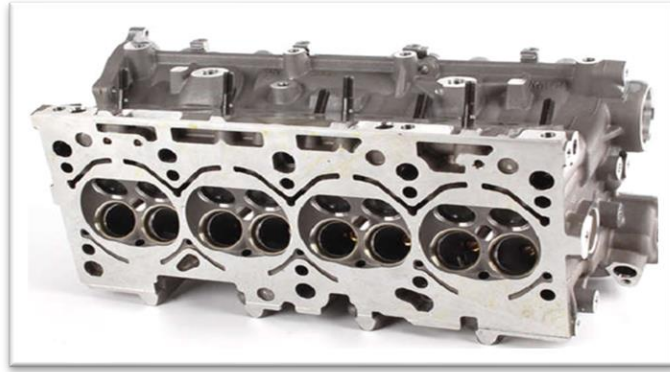


Figure 1-6: Culasse.

1.11.3 Le carter d'huile

Le carter d'huile est situé dans la partie inférieure du moteur. Il sert de réservoir pour l'huile de lubrification, nécessaire à la réduction des frottements et à la protection des organes mécaniques en mouvement.



Figure 1-7: Carter d'huile.

1.12 Les organes mobiles du moteur

Les organes mobiles assurent la transformation du mouvement alternatif du piston en mouvement rotatif transmis au système de transmission.

1.12.1 Le piston

Le piston est une pièce cylindrique qui se déplace de haut en bas et de bas en haut à l'intérieur du cylindre. Il permet de comprimer le mélange air-carburant et reçoit la pression des gaz lors de la combustion.



Figure 1-8: Piston.

1.12.2 La bielle

La bielle est une tige articulée qui relie le piston au vilebrequin. Elle transmet l'effort exercé sur le piston et participe à la transformation du mouvement alternatif en mouvement rotatif.



Figure 1-9: La bielle

1.12.3 Le vilebrequin

Le vilebrequin est l'axe principal tournant du moteur. Il reçoit les efforts transmis par les bielles et les transforme en couple moteur destiné à entraîner la boîte de vitesses.

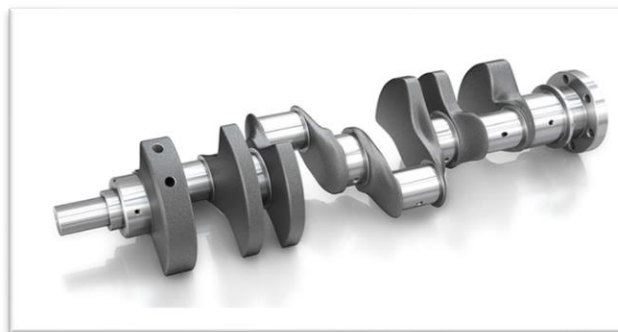


Figure 1-10: vilebrequin

1.12.4 L'arbre à cames

L'arbre à cames est un arbre muni de cames permettant de commander l'ouverture et la fermeture des soupapes au moment approprié du cycle moteur.



Figure 1-11: Arbre à cames.

1.12.5 Les soupapes

Les soupapes assurent l'entrée du mélange air-carburant et l'évacuation des gaz brûlés et la fermeture des soupapes donner la compression dans la chambre . La soupape d'admission permet l'introduction du mélange dans le cylindre, tandis que la soupape d'échappement permet l'évacuation des gaz de combustion.



Figure 1-12: Soupapes.

1.12.6 La courroie ou chaîne de distribution

La courroie ou chaîne de distribution synchronise le mouvement du vilebrequin avec celui de l'arbre à cames. Elle garantit l'ouverture et la fermeture des soupapes au bon moment.



Figure 1-13: Courroie et chaîne de distribution.

1.13 Le système de démarrage et d'alimentation

1.13.1 La bougie d'allumage

La bougie d'allumage produit une étincelle électrique destinée à enflammer le mélange air-carburant comprimé dans la chambre de combustion.



Figure 1-14: Bougie d'allumage.

1.13.2 Les injecteurs

Les injecteurs pulvérisent le carburant sous forme de fines gouttelettes dans le flux d'air ou directement dans le cylindre, afin d'assurer une meilleure homogénéité du mélange air-carburant.



Figure 1-15: Injecteur.

1.14 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un moteur à essence repose sur le principe du moteur à combustion interne à quatre temps. Il consiste à transformer l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique grâce à une succession de combustions contrôlées dans les cylindres.

Comme le montre la figure 1.14, le cycle à quatre temps comprend les phases suivantes :

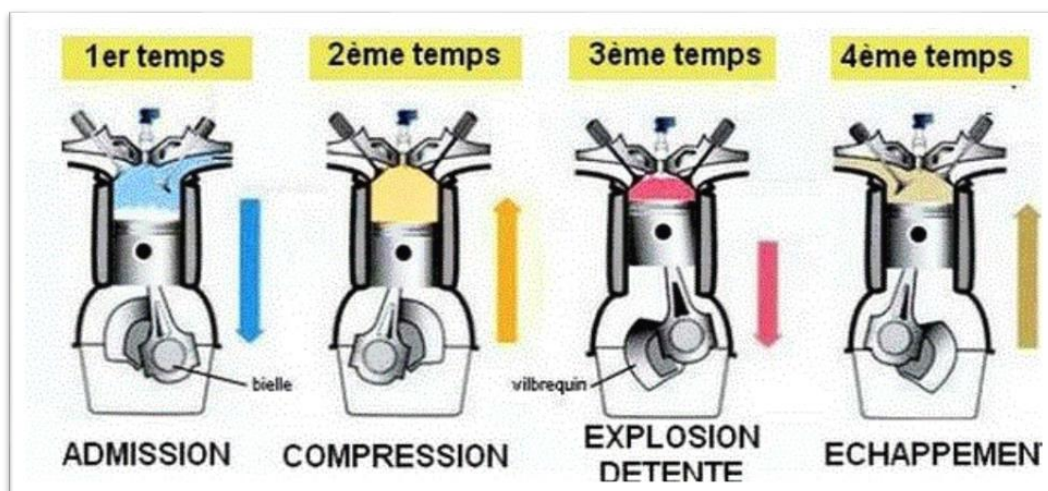


Figure 1-16: Cycle à quatre temps [14].

1.14.1 Admission

La soupape d'admission s'ouvre. Le piston descend et crée une dépression qui permet l'entrée du mélange air-essence dans le cylindre.

1.14.2 Compression

Les soupapes se ferment. Le piston remonte et comprime le mélange air-carburant, ce qui augmente sa pression et sa température.

1.14.3 Combustion-détente

La bougie d'allumage produit une étincelle qui enflamme le mélange comprimé. La combustion provoque une forte augmentation de pression, repoussant le piston vers le bas. Cette phase constitue le temps moteur, car elle produit le travail mécanique transmis au vilebrequin.

1.14.4 Échappement

La soupape d'échappement s'ouvre. Le piston remonte et expulse les gaz brûlés vers le système d'échappement [6].

Chapitre 2. Systèmes GPL automobiles et architecture de conversion

2.1 Introduction au système GPL

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) constitue aujourd'hui l'une des alternatives les plus concrètes aux carburants conventionnels dans le secteur automobile. Son utilisation s'explique par sa capacité à réduire l'impact environnemental des transports tout en diminuant les coûts d'exploitation des véhicules.

L'adaptation d'un moteur à allumage commandé au fonctionnement au GPL nécessite l'intégration d'un dispositif spécifique, appelé **kit GPL**. Comme le montre la **figure 2.1**, ce système comprend plusieurs éléments assurant le stockage sécurisé du carburant, la régulation de sa pression, sa vaporisation et son injection contrôlée dans le moteur.



Figure 2-1 : Architecture générale d'un système GPL automobile.

2.2 Historique de l'utilisation du GPL dans l'automobile

Le GPL a été introduit comme carburant automobile dans les années 1930. À cette période, il était principalement utilisé dans certains pays où l'essence était rare ou coûteuse.

Avec l'évolution des technologies automobiles et l'augmentation des préoccupations environnementales, l'utilisation du GPL s'est progressivement développée dans plusieurs régions du monde. Aujourd'hui, de nombreux véhicules sont équipés de systèmes GPL, soit directement par le constructeur, soit par conversion après fabrication [15].

2.3 Principe de fonctionnement d'un système GPL

Le fonctionnement du GPL dans un moteur thermique repose sur une chaîne technique organisée en plusieurs étapes principales :

1. **Stockage sécurisé** : le GPL est conservé à l'état liquide dans un réservoir renforcé, sous une pression de service généralement comprise entre 5 et 10 bar.
2. **Transfert du carburant** : des canalisations spécifiques acheminent le GPL du réservoir vers le compartiment moteur.
3. **Régulation et vaporisation** : le GPL liquide passe par le vapo-détendeur, où sa pression est réduite. Il est ensuite vaporisé grâce à l'apport thermique du circuit de refroidissement du moteur.
4. **Injection pilotée** : le GPL sous forme gazeuse est dosé puis introduit dans les conduits d'admission, ou directement dans les cylindres selon le type de système. Cette injection est commandée par un calculateur électronique dédié.

Ce dispositif fonctionne selon le principe de la **bicarburantion**. Le système GPL est installé en parallèle du circuit d'alimentation d'origine à essence, ce qui permet au conducteur de basculer entre les deux carburants, soit automatiquement par le système, soit manuellement à l'aide d'un commutateur [16].

2.4 Types d'injection de GPL

Il existe trois principaux types d'injection de GPL utilisés dans les véhicules automobiles. Chacun se distingue par son principe de fonctionnement, son niveau de précision et son domaine d'application.

2.4.1 L'injection monopoint gazeuse

Cette génération de systèmes a marqué une étape de transition avec l'apparition des premiers moteurs à gestion électronique [19].

Principe : la vaporisation du GPL s'effectue toujours à travers un détendeur. Cependant, le débit de gaz est contrôlé par un injecteur unique, ou par un actuateur électromécanique, placé à l'entrée du collecteur d'admission et commandé par un module électronique de gestion.

Caractéristiques : ce système offre une précision de dosage supérieure à celle du système Venturi. Toutefois, l'inertie liée au trajet du gaz dans le collecteur d'admission limite la

réactivité du moteur. Pour cette raison, l'injection monopoint gazeuse est aujourd'hui considérée comme une technologie obsolète.

2.4.2 L'injection séquentielle gazeuse

L'injection séquentielle gazeuse constitue aujourd'hui la solution la plus courante pour les moteurs équipés d'une injection essence indirecte.

Principe : après vaporisation dans le détendeur, le GPL est distribué vers une rampe d'injecteurs dédiée, avec un injecteur par cylindre. Un calculateur GPL spécifique synchronise l'ouverture des injecteurs en se basant sur les temps d'injection essence. Le gaz est ainsi injecté au plus près des soupapes d'admission.

Caractéristiques : cette technologie permet d'obtenir des performances proches de celles de l'essence, de limiter les risques de retour de flamme et de répondre aux normes environnementales strictes, notamment Euro 4, Euro 5 et Euro 6.

Référence industrielle : le dispositif VSI (*Vapour Sequential Injection*), développé par l'équipementier néerlandais Prins Autogas, est considéré comme une référence technologique pour ce type d'installation [20].

2.4.3 L'injection liquide — LPi / LPdi

Les technologies d'injection liquide, notamment LPi et LPdi, correspondent aux générations les plus avancées des systèmes GPL. Elles sont particulièrement adaptées aux motorisations modernes à injection directe, telles que les moteurs TSI, GDI ou TCe [21].

Principe : dans ce type de système, le vapo-détendeur est supprimé. Une pompe haute pression, généralement immergée dans le réservoir, propulse le GPL sous forme liquide jusqu'au moteur.

- **LPi (*Liquid Propane Injection*) :** le carburant est injecté sous forme liquide dans les conduits d'admission.
- **LPdi (*Liquid Propane Direct Injection*) :** le GPL liquide est injecté directement dans la chambre de combustion, en utilisant souvent les injecteurs haute pression d'origine du véhicule.

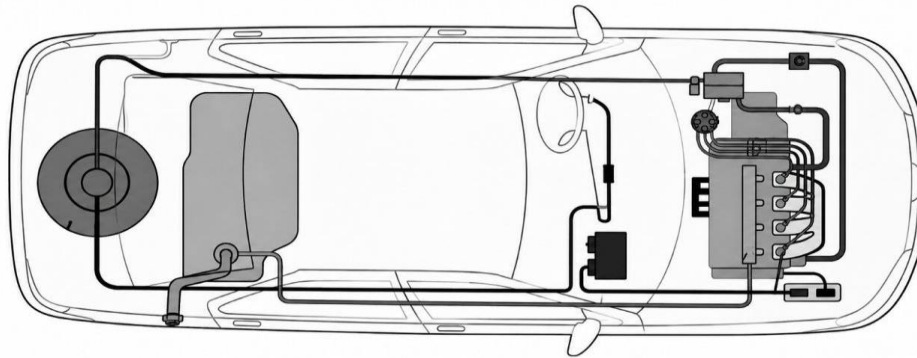


Figure 2-2: Kit GPL séquentiel

2.5 Les principaux composants d'un système GPL

2.5.1 Stockage du GPL : réservoirs et sécurité

2.5.1.1 Typologie des réservoirs

Le stockage du GPL à bord du véhicule est assuré par des réservoirs pressurisés. Ces réservoirs existent principalement sous deux formes, adaptées aux contraintes d'encombrement du véhicule.

Réservoir cylindrique : ce type de réservoir est généralement installé dans le coffre du véhicule. Comme le montre la figure 2.3, il offre une capacité de stockage importante, mais réduit l'espace de chargement disponible.



Figure 2-3: Réservoir cylindrique.

Réservoir torique : ce réservoir est conçu pour être placé dans l'emplacement de la roue de secours. Comme le montre la figure 2.4, il permet de conserver le volume utile du coffre, mais sa capacité est généralement plus limitée que celle d'un réservoir cylindrique.



Figure 2-4: Réservoir torique.

2.5.1.2 Polyvanne ou multivalve de sécurité

La polyvanne constitue un élément essentiel de sécurité du système de stockage GPL. Fixée directement sur le réservoir, elle regroupe plusieurs organes de protection et de contrôle, comme le montre la **figure 2.5**.



Figure 2-5: Polyvanne de sécurité.

Elle comprend principalement :

- une soupape de sécurité, destinée à évacuer la pression en cas de surchauffe extrême ;
- un limiteur de remplissage, qui bloque mécaniquement l'admission du gaz à 80 % de la capacité totale du réservoir afin de permettre l'expansion thermique du GPL ;
- une électrovanne d'arrêt, permettant d'isoler le réservoir et de couper l'alimentation en gaz à la source.

2.5.2 Vanne solénoïde haute pression

L'acheminement du GPL liquide, depuis le réservoir jusqu'au compartiment moteur, est assuré par une canalisation haute pression conçue pour résister aux contraintes mécaniques et chimiques.

Des électrovannes sont installées sur ce circuit afin d'assurer l'interruption immédiate et automatique du flux de gaz lors de l'arrêt du moteur ou du basculement vers l'alimentation essence. La **figure 2.6** illustre une vanne solénoïde haute pression [22].



Figure 2-6:Vanne solénoïde haute pression.

2.5.3 Système de filtration à double étage

La filtration du GPL est assurée par un dispositif à double étage, destiné à protéger les organes sensibles du système, notamment le vapo-détendeur et les injecteurs.

Filtre en phase liquide : placé en amont du vapo-détendeur, il retient les particules solides et les impuretés présentes dans le GPL liquide. La **figure 2.7** présente un exemple de filtre en phase liquide.



Figure 2-7: Filtre de phase liquide.

Filtre en phase gazeuse : installé en aval du vapo-détendeur, il protège la rampe d'injecteurs contre les résidus huileux, les paraffines et les impuretés fines présentes dans le GPL gazeux. La **figure 2.8** illustre ce type de filtre.



Figure 2-8: Filtre de phase gazeuse.

2.5.4 Vapo-détendeur

Le vapo-détendeur est un organe central du système GPL. Il assure trois fonctions principales :

1. réduire la pression du GPL provenant du réservoir ;
2. permettre le changement d'état du GPL, de la phase liquide vers la phase gazeuse ;
3. réguler et stabiliser la pression du gaz avant son admission dans la rampe d'injection.

Ce changement d'état étant fortement endothermique, le vapo-détendeur doit être raccordé au circuit de refroidissement du moteur afin d'assurer l'apport thermique nécessaire à la vaporisation du GPL. La **figure 2.9** présente un exemple de vapo-détendeur [23].



Figure 2-9: Vapo-détendeur.

2.5.5 Rampe d'injection gazeuse

La rampe d'injection gazeuse assure la distribution du GPL dans le collecteur d'admission, au plus près des soupapes. Chaque injecteur est commandé électroniquement de manière

individuelle afin de fournir, avec précision et réactivité, la quantité de carburant nécessaire à chaque cylindre. La **figure 2.10** présente un exemple de rampe d'injection gazeuse.



Figure 2-10 : Rampe d'injection gazeuse.

2.5.6 Unité de contrôle électronique — calculateur GPL

Le calculateur GPL, ou ECU, constitue l'unité de commande électronique du système. Il travaille généralement en interaction avec le calculateur d'injection essence du véhicule et assure les fonctions suivantes :

- calcul des temps d'injection du GPL ;
- gestion de la transition entre les modes essence et GPL ;
- ajustement du rapport air-carburant afin d'assurer une combustion correcte.

La **figure 2.11** illustre un calculateur GPL.



Figure 2-11: Calculateur GPL.

2.5.7 Boucle de régulation et capteurs

Afin d'optimiser la combustion, le calculateur GPL ajuste ses paramètres en temps réel à partir des informations fournies par plusieurs capteurs, notamment :

- les capteurs de pression et de température du gaz ;
- le capteur MAP, qui mesure la pression absolue dans le collecteur d'admission ;
- la sonde lambda, qui mesure la teneur en oxygène dans les gaz d'échappement ;
- les données disponibles via l'interface OBD du véhicule [24].

2.5.8 Bilan de la conversion GPL

La conversion d'un véhicule essence au GPL présente plusieurs avantages, mais aussi certaines contraintes techniques et économiques [25].

Avantages

- Réduction du coût d'exploitation, notamment du budget carburant.
- Amélioration du bilan environnemental, avec une diminution des émissions de CO₂ et une réduction importante des particules fines.
- Augmentation de l'autonomie globale du véhicule grâce à l'utilisation combinée des deux réservoirs.

Inconvénients

- Investissement initial nécessaire pour l'installation et l'homologation du kit GPL.
- Réduction possible du volume de chargement ou suppression de l'emplacement de la roue de secours.
- Nécessité d'un entretien périodique spécifique, notamment le remplacement des filtres et l'inspection du système GPL.

2.6 Choix technologique retenu pour le véhicule du projet

2.7 Compatibilité du moteur avec le système GPL

La compatibilité d'un moteur à essence, ou moteur à allumage commandé, avec un système de carburation au gaz de pétrole liquéfié (GPL) est généralement bonne. Toutefois, elle nécessite la prise en compte de plusieurs contraintes thermiques, mécaniques et électroniques.

2.7.1 Résistance des soupapes et des sièges de soupapes

Le GPL entre dans la chambre de combustion à l'état gazeux. Contrairement à l'essence liquide, il ne contient pas d'additifs lubrifiants et ne produit pas d'effet de refroidissement local lié à la vaporisation du carburant.

Cette absence de lubrification peut favoriser un phénomène de micro-soudure et d'arrachement de matière entre la soupape et son siège. Ce phénomène, appelé **récession des sièges de soupapes**, peut entraîner une perte d'étanchéité et une dégradation progressive du fonctionnement du moteur.

Les moteurs modernes équipés de sièges de soupapes renforcés tolèrent généralement bien le fonctionnement au GPL. Pour les moteurs plus sensibles, l'intégration d'un système de lubrification externe, tel qu'un kit d'additif de type *Flashlube*, peut être nécessaire afin de protéger les éléments de la distribution [26].

2.7.2 Architecture d'injection : indirecte et directe

Le choix du système GPL dépend fortement du type d'injection utilisé par le moteur d'origine. Les moteurs à injection indirecte sont généralement plus simples à convertir, tandis que les moteurs à injection directe nécessitent des solutions plus spécifiques.

2.7.3 Moteurs à injection indirecte multipoint

Les moteurs à injection indirecte multipoint sont les plus simples à convertir. Ils utilisent généralement des kits GPL séquentiels à injection gazeuse. Le calculateur GPL intercepte les signaux du calculateur essence afin de commander des injecteurs de gaz dédiés, placés sur le collecteur d'admission [27].

2.7.4 Moteurs à injection directe

La conversion des moteurs à injection directe, tels que les moteurs TSI, GDI ou THP, est plus complexe. Dans cette architecture, les injecteurs d'essence sont placés directement dans la chambre de combustion. S'ils sont totalement désactivés pendant le fonctionnement au GPL, ils peuvent être exposés à des températures élevées et risquent d'être endommagés [28].

Deux solutions principales sont utilisées :

- **Solution A : kit gazeux spécifique**

Ce système conserve de faibles micro-injections régulières d'essence, représentant environ 5 à 10 % du carburant total, afin de refroidir les injecteurs d'origine.

- **Solution B : injection liquide directe**

Dans cette solution, le GPL liquide est injecté directement dans la chambre de combustion via la pompe haute pression et les injecteurs d'essence d'origine du véhicule.

2.8 Gestion thermique et rapport volumétrique

L'indice d'octane du GPL est particulièrement élevé, généralement compris entre 104 et 110, contre 95 à 98 pour l'essence. Cette caractéristique lui confère une excellente résistance au cliquetis et permet un fonctionnement plus souple du moteur.

Cependant, le rapport volumétrique des moteurs à essence classiques, initialement optimisé pour l'essence, ne permet pas toujours d'exploiter pleinement le rendement théorique supérieur du GPL.

Dans les systèmes GPL séquentiels classiques, le carburant est stocké sous forme liquide dans le réservoir puis vaporisé avant l'injection. Cette vaporisation est assurée par le vapo-détendeur, qui utilise la chaleur du liquide de refroidissement du moteur. Par conséquent, le bon fonctionnement du système exige un circuit de refroidissement en parfait état ainsi qu'une sonde de température fonctionnelle afin de garantir la gestion correcte de la commutation essence/GPL.

2.9 Critères de choix de la technologie adoptée

Le choix de la technologie d'alimentation au GPL — système aspiré, injection gazeuse séquentielle ou injection liquide — dépend des caractéristiques du moteur d'origine. Cette sélection vise à optimiser le rendement thermique, préserver la fiabilité mécanique et respecter les normes d'émissions polluantes [30].

2.10 Exigences environnementales et normes de dépollution

Le niveau de précision nécessaire pour le dosage air-carburant dépend directement des normes antipollution appliquées, notamment les normes Euro. Pour satisfaire aux normes modernes telles qu'Euro 4, Euro 5 et Euro 6, le système GPL doit fonctionner en boucle fermée et communiquer avec le système OBD (*On-Board Diagnostics*) du véhicule. Le calculateur GPL ajuste alors en temps réel la richesse du mélange à partir des informations fournies par la sonde lambda, afin d'assurer un fonctionnement optimal du catalyseur.

Les anciens systèmes aspirés ne permettent pas ce niveau de contrôle, ce qui rend l'injection séquentielle pratiquement indispensable [31].

2.11 Objectifs de rendement thermodynamique

Les propriétés physiques du GPL influencent fortement le choix entre une injection gazeuse et une injection liquide.

Rendement volumétrique : l'injection de GPL gazeux occupe un certain volume dans le collecteur d'admission, ce qui peut provoquer une légère diminution théorique de puissance, généralement comprise entre 2 et 3 %.

Effet de refroidissement : à l'inverse, l'injection de GPL liquide bénéficie de la chaleur latente de vaporisation. Lors du changement d'état, le carburant refroidit l'air admis, augmente sa densité et permet de conserver, voire d'améliorer, les performances du moteur.

2.12 Avantages techniques de l'injection gazeuse séquentielle

L'utilisation d'un système GPL de quatrième génération à injection gazeuse séquentielle représente une évolution technologique importante par rapport aux anciennes solutions de carburation [32].

2.12.1 Contrôle précis de la stœchiométrie

Contrairement aux systèmes aspirés, l'injection séquentielle traite chaque cylindre individuellement, ce qui permet un dosage beaucoup plus précis du mélange air-carburant.

2.12.2 Ajustement dynamique des paramètres

Le calculateur GPL ne se limite pas à reproduire les signaux du calculateur essence. Il recalcule en permanence les temps d'injection en fonction de la pression et de la température réelles du gaz.

2.12.3 Optimisation thermique

Le maintien d'un rapport air-carburant optimal $\lambda = 1$ permet d'éviter un mélange trop pauvre. En effet, un appauvrissement excessif augmente la température de combustion, ce qui peut endommager progressivement les soupapes et leurs sièges.

2.12.4 Préservation des performances moteur

L'architecture de l'injection séquentielle a été conçue pour limiter les pertes de performances du moteur.

2.12.5 Réduction des pertes de charge

L'injection du GPL au plus près des soupapes réduit l'encombrement gazeux dans le collecteur d'admission. Les pertes de puissance restent ainsi très faibles, généralement inférieures à 3 %.

2.12.6 Fiabilité et souplesse de fonctionnement

Cette technologie élimine les phénomènes de trous à l'accélération et réduit fortement les risques de retour de flamme (*backfire*), problème fréquent sur les anciennes générations de systèmes GPL.

2.13 Intégration avec l'électronique embarquée

Le système GPL moderne fonctionne comme une extension intelligente du système électronique d'origine du véhicule.

Compatibilité logicielle : le calculateur GPL travaille en coordination avec l'ECU d'origine, tout en conservant les stratégies de protection du constructeur, telles que la gestion du cliquetis et les limiteurs de régime.

Maintenance prédictive : grâce à la compatibilité avec les protocoles OBD II, le système peut détecter certaines anomalies, corriger des dérives de fonctionnement et générer des codes de diagnostic facilitant les opérations de maintenance.

2.14 Longévité mécanique et impact environnemental

Au-delà de l'aspect économique, le GPL séquentiel contribue également à préserver le moteur et à améliorer le bilan environnemental du véhicule [33].

Combustion plus propre : la structure moléculaire du GPL favorise une combustion plus complète, entraînant une réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de 10 à 15 %, ainsi qu'une diminution importante des NO_x et des particules fines.

Protection de l'huile moteur : le GPL étant injecté sous forme gazeuse, il ne provoque pas de dilution de l'huile moteur par du carburant liquide imbrûlé. L'huile conserve ainsi plus longtemps ses propriétés lubrifiantes, ce qui améliore la protection des pièces mécaniques.

2.15 Intégration du GPL aux moteurs Diesel

2.15.1 Principe de fonctionnement

Dans un moteur Diesel classique, l'allumage du carburant se produit par auto-inflammation sous l'effet de la forte compression.

Le GPL ne possédant pas les mêmes caractéristiques d'auto-inflammation, son utilisation dans un moteur Diesel nécessite généralement un fonctionnement en mode bi-carburant (*dual fuel*) [34].

Comme le montre la **figure 2.12**, le fonctionnement repose sur les étapes suivantes :

Admission d'air et de GPL :

le GPL est introduit dans l'air d'admission afin de former un mélange air-GPL avant la compression.

Injection pilote de gazole :

une faible quantité de gazole est injectée en fin de compression. Cette injection pilote s'enflamme spontanément.

Combustion du mélange :

la combustion du gazole enflamme ensuite le mélange air-GPL, permettant le fonctionnement du moteur avec les deux carburants.

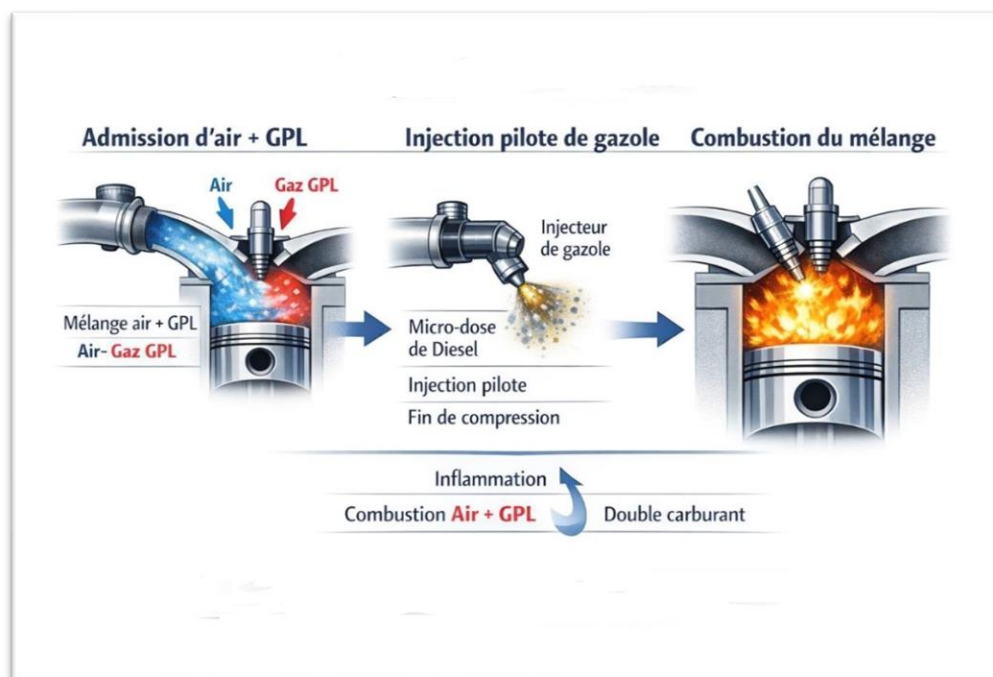


Figure 2-12: Principe de fonctionnement d'un système Diesel-GPL.

2.15.2 Perspectives du GPL avec les moteurs Diesel

1. Avantages potentiels

- Réduction partielle de la consommation de gazole ;
- Diminution possible des émissions de particules ;
- Combustion plus propre dans certaines conditions ;
- Réduction potentielle des coûts d'exploitation selon le prix local du GPL ;
- solution de transition avant l'électrification complète.

2. Limites techniques

- Les moteurs Diesel conventionnels ne fonctionnent généralement pas à 100 % GPL ;
- Une injection pilote de gazole reste nécessaire ;
- La gestion électronique doit être très précise afin d'éviter :
 - Le cliquetis ;
 - Les combustions incomplètes ;
 - L'augmentation des émissions de NOx dans certains régimes.

L'intégration du GPL nécessite également l'ajout de plusieurs composants :

- réservoir GPL ;
- vapo-détendeur ;
- injecteurs GPL ;
- calculateur de gestion.

3. Perspectives futures

L'avenir du GPL associé aux moteurs Diesel repose principalement sur :

- Les systèmes *dual fuel* intelligents ;
- L'optimisation électronique de l'injection séquentielle ;
- La réduction des émissions polluantes ;
- L'adaptation aux véhicules utilitaires, poids lourds, groupes électrogènes et applications agricoles.

À long terme, le GPL peut être considéré comme :

- Une solution intermédiaire de réduction des émissions ;
- Une alternative intéressante dans les régions où le Diesel reste dominant ;
- Une technologie complémentaire au GNV, au biodiesel, aux systèmes hybrides et aux motorisations électriques.

Chapitre 3. Installation d'un kit GPL sur le véhicule

3.1 Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous abordons l'aspect pratique de ce travail, consacré à l'installation d'un système GPL sur un moteur thermique. Après avoir présenté les bases théoriques relatives au GPL et aux moteurs à combustion interne, cette partie traite de la mise en œuvre expérimentale du système sur un moteur réel, en l'occurrence le moteur Toyota 2UZ-FE. L'objectif principal est d'étudier les différentes étapes d'intégration du kit GPL, ainsi que les contraintes techniques liées à l'installation, au réglage et au fonctionnement du système sur le véhicule.

3.2 Présentation du véhicule et du moteur

Le moteur Toyota 2UZ-FE est un moteur thermique à essence de type V8, d'une cylindrée de 4,7 litres. Introduit au début des années 2000, il a été principalement utilisé sur les véhicules tout-terrain et les modèles haut de gamme de la marque Toyota.

Comme le montre la **figure 3.1**, ce moteur possède une architecture en V à huit cylindres, reconnue pour sa robustesse, son couple élevé et sa fiabilité dans des conditions d'utilisation sévères. La version développant 238 ch a été utilisée notamment sur le Toyota Land Cruiser 100 V8 4.7 équipé d'une boîte de vitesses automatique. Les versions les plus récentes du moteur ont atteint une puissance d'environ 288 ch avec un couple maximal de 445 Nm. Le moteur 2UZ-FE a été principalement monté sur des véhicules tout-terrain tels que le Toyota Land Cruiser. Il répond aux normes environnementales Euro 3 et Euro 4 selon les versions et les années de production.



Figure 3-1: Moteur Toyota 2UZ-FE.

3.3 Données techniques du moteur

Les principales caractéristiques techniques du moteur Toyota 2UZ-FE sont présentées dans le tableau 3.1. Ces données permettent d'identifier l'architecture du moteur, ses performances et ses principaux paramètres de fonctionnement.

Tableau 3-1: Représentant les données techniques [36].

Désignation	Caractéristique
Type de moteur	2UZ-FE
Principe de fonctionnement	Cycle Otto
Position de montage	Moteur avant
Architecture	Moteur en V
Cylindrée	4,7 L ((4664 cm ³))
Nombre de cylindres	8
Nombre de soupapes	32 soupapes
Soupapes par cylindre	4
Commande des soupapes	DOHC / VVT-i
Formation du mélange	Injection multipoint
Alésage × course	94 mm × 84 mm
Rapport alésage/course	1,12
Taux de compression	9,6:1 à 10:1
Puissance	238 à 288 ch ((175 à 212 kW))
Couple maximal	434 à 445 Nm
Carburant	Essence sans plomb
Quantité d'huile moteur	6,2 L
Transmission	Boîte de vitesses automatique
Constructeur	Toyota
Période de production	2002 à 2009

3.4 Étapes d'installation du système GPL

L'installation d'un système GPL constitue une opération technique nécessitant une préparation préalable du véhicule et du moteur. Avant toute intervention, il est indispensable de vérifier le bon fonctionnement du moteur à essence, l'absence de défauts mécaniques ou

électroniques, ainsi que la propreté du compartiment moteur afin d'éviter toute contamination du système GPL.

Cette opération doit être réalisée par des techniciens qualifiés, conformément aux exigences de sécurité et aux normes d'installation des systèmes GPL automobiles.

Les principales étapes d'installation sont présentées dans les sections suivantes.

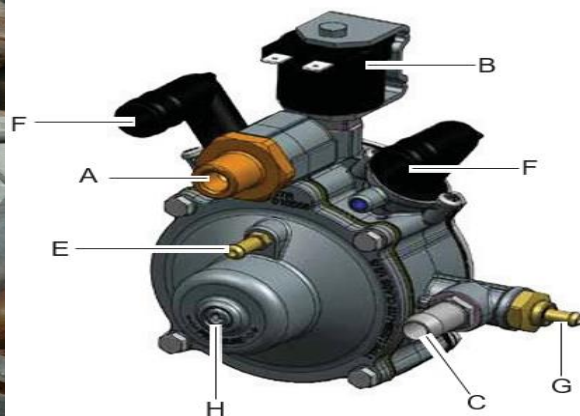
3.4.1 Installation du vapo-détendeur

Le vapo-détendeur est l'un des éléments centraux du système GPL. Son installation nécessite le choix d'un emplacement adapté dans le compartiment moteur, généralement sur le châssis interne du véhicule.

L'emplacement retenu doit répondre à plusieurs critères :

- être protégé contre les vibrations et les sources de chaleur excessives ;
- permettre un raccordement correct au circuit de refroidissement ;
- rester facilement accessible pour les opérations de maintenance et de remplacement.

Comme le montre la **figure 3.2**, le vapo-détendeur assure la détente, la vaporisation et la régulation de la pression du GPL avant son admission dans le moteur.



- **A** : Entrée du gaz
- **B** : Vanne solénoïde
- **C** : Sortie du gaz
- **D** : Points de fixation du régulateur
- **E** : Prise de compensation MAP
- **F** : Raccords du circuit de chauffage du régulateur
- **G** : Soupape de surpression
- **H** : Régulateur de pression

Figure 3-2 : Vapo-détendeur et ses composants. [37]

3.4.2 Installation de l'électrovanne

Après l'installation du vapo-détendeur, l'étape suivante consiste à installer l'électrovanne dans le compartiment moteur. Cet élément doit être placé dans une zone protégée des contraintes thermiques et mécaniques afin d'assurer un fonctionnement fiable du système GPL.

La **figure 3.3** présente l'électrovanne utilisée dans l'installation.



Figure 3-3 : Électrovanne GPL.

3.4.3 Installation de la rampe d'injection

L'installation de la rampe d'injection nécessite le perçage du collecteur d'admission afin de créer les points d'alimentation de chaque cylindre. Des raccords sont ensuite montés sur chaque conduit d'admission.

Les injecteurs GPL sont fixés sur le châssis à l'aide d'un support métallique, dans un emplacement facilement accessible. Ils sont ensuite reliés aux conduits d'admission par des tuyaux haute pression de faible longueur afin d'assurer une injection homogène et rapide du gaz.

La **figure 3.4** illustre l'installation des injecteurs GPL.

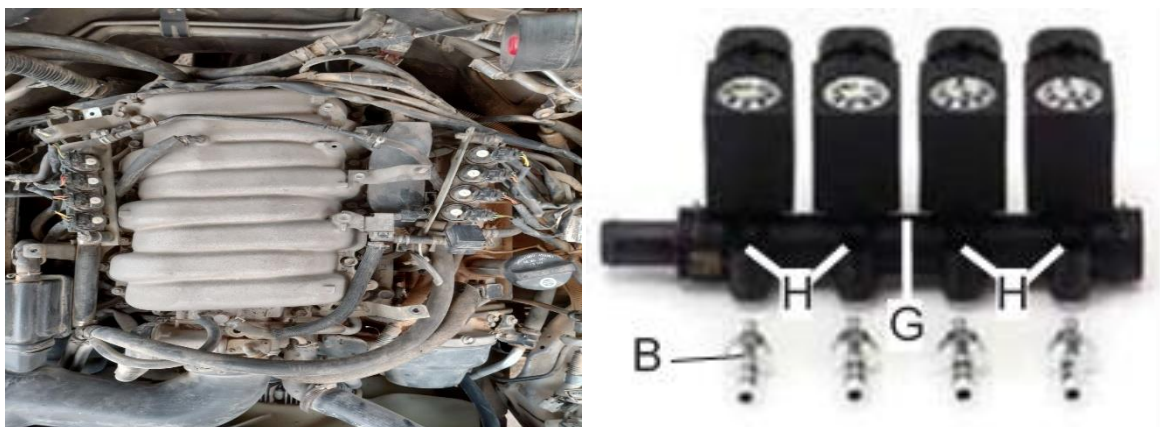


Figure 3-4 : Installation des injecteurs GPL. [37]

3.4.4 Installation du filtre GPL

Le filtre GPL est installé entre le vapo-détendeur et la rampe d'injection. Son rôle est d'éliminer les impuretés présentes dans le GPL gazeux afin de protéger les injecteurs et d'améliorer la qualité de combustion. Comme le montre la **figure 3.5**, le filtre est fixé solidement sur une partie stable du compartiment moteur.



Figure 3-5 : Filtre GPL.

3.4.5 Installation du capteur de pression

Le capteur de pression et de température du gaz est installé à la sortie du vapo-détendeur, avant la rampe d'injection. Il permet de mesurer la pression du GPL gazeux ainsi que sa température afin d'assurer le contrôle précis du système par le calculateur électronique.

Les informations fournies par ce capteur sont utilisées pour ajuster les temps d'injection et surveiller le bon fonctionnement du vapo-détendeur. La **figure 3.6** présente le capteur de pression installé sur le circuit GPL.



Figure 3-6 : Capteur de pression GPL.

3.5 Installation de la centrale de contrôle GPL

La centrale de contrôle, ou calculateur GPL (ECU), est installée dans le compartiment moteur à proximité du système électrique du véhicule. Elle est fixée mécaniquement à l'aide de vis afin d'assurer une bonne stabilité.

Le calculateur est relié électriquement aux différents composants du système GPL, notamment :

- le vapo-détendeur ;
- les injecteurs ;
- le capteur de pression ;
- le commutateur essence/GPL ;
- l'électrovanne du réservoir.

La **figure 3.7** montre la centrale de contrôle utilisée dans cette installation.

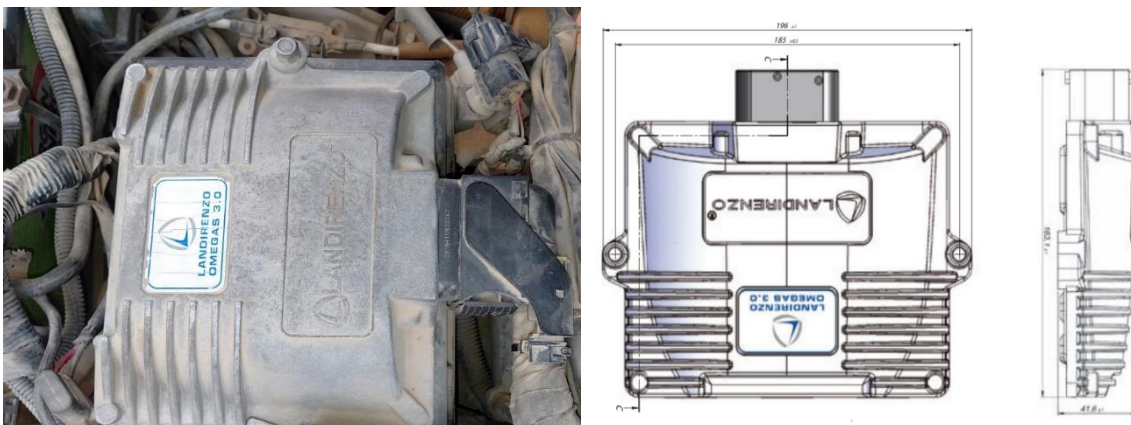


Figure 3-7 : Centrale de contrôle GPL (ECU). [37]

3.5.1 Installation du câblage électrique

Le faisceau électrique assure la liaison entre le calculateur GPL et l'ensemble des composants du système. Il comprend les connexions des injecteurs, des capteurs, des électrovannes et du commutateur de commande.

Le câblage doit être correctement protégé et fixé afin d'éviter les vibrations, les échauffements et les courts-circuits.

La **figure 3.8** présente le faisceau électrique du système GPL.

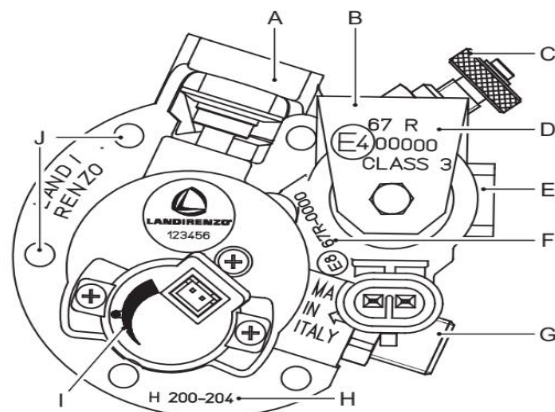


Figure 3-8 : Câblage électrique du système GPL.

3.6 Installation de la polyvanne

La polyvanne est installée sur le réservoir GPL. Elle assure plusieurs fonctions de sécurité et de contrôle, notamment la mesure du niveau de carburant, la limitation du remplissage et la coupure de l'alimentation en gaz.

La **figure 3.9** présente la polyvanne ainsi que ses principaux composants.



- A** : Soupape de surpression / fusible thermique
- B** : Solénoïde de sécurité de coupure de gaz
- C** : Robinet manuel de coupure de gaz
- D** : Homologation du solénoïde
- E** : Sortie du gaz
- F** : Homologation de la multivalve
- G** : Entrée du gaz

- H** : Identification de la multivalve
- I** : Indicateur de niveau de carburant
- J** : Trous de fixation
- K** : Tube de surpression
- L** : Flotteur
- M** : Tube d'aspiration
- N** : Joint
- O** : Protection externe de la multivalve

Figure 3-9 : Polyvanne et ses composants. [37]

3.6.1 Installation du réservoir GPL

Le réservoir GPL est installé dans la partie arrière du véhicule et fixé solidement à l'aide de supports et de vis de fixation adaptés.

La multivalve montée sur le réservoir est reliée à deux conduites haute pression :

- une conduite reliée à l'embout de remplissage ;
- une conduite reliée au vapo-détendeur.

La **figure 3.10** montre le réservoir GPL installé sur le véhicule.



Figure 3-10: Réservoir GPL.

3.6.2 Installation des conduites de gaz

Les conduites haute pression assurent le transport du GPL entre le réservoir et le compartiment moteur.

Comme illustré sur la **figure 3.11**, ces conduites doivent être installées à distance des sources de chaleur et du système d'échappement. Elles sont fixées solidement au châssis à l'aide de colliers afin d'éviter les vibrations et les frottements.



Figure 3-11: Conduites de gaz du réservoir.

3.6.3 Installation de l'embout de remplissage

L'embout de remplissage est généralement installé à proximité de la trappe du réservoir d'essence. Cette disposition facilite les opérations de remplissage du GPL tout en conservant une bonne accessibilité. La **figure 3.12** présente l'embout de remplissage du système GPL.



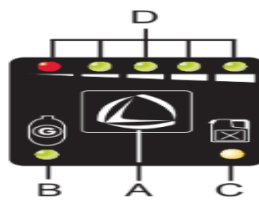
Figure 3-12: Embout de remplissage GPL.

3.7 Installation du commutateur essence/GPL

Le commutateur de sélection essence/GPL est installé dans l'habitacle, dans une position facilement accessible et visible par le conducteur.

Comme le montre la **figure 3.13**, ce dispositif permet :

- de sélectionner le mode essence ou GPL ;
- d'afficher le niveau de carburant GPL dans le réservoir ;
- d'indiquer le mode de fonctionnement du véhicule.



- A** : Bouton de commutation essence/GPL
B : LED verte : fonctionnement au GPL
C : LED jaune : fonctionnement à l'essence
D : Indicateur de niveau de GPL dans le réservoir

Figure 3-13: Commutateur essence/GPL. [37]

3.8 Résultat final de l'assemblage

Après l'installation et le raccordement de tous les composants, le système GPL est intégré au véhicule et prêt pour les opérations de configuration et de calibration.

La **figure 3.14** présente le résultat final de l'installation du kit GPL sur le moteur Toyota 2UZ-FE.



Figure 3-14: Assemblage final du kit GPL.

3.9 Logiciel LANDIRENZO Omegas

Le logiciel LANDIRENZO Omegas constitue l'outil principal de configuration et de diagnostic des systèmes GPL à injection séquentielle. Il permet la communication entre le calculateur GPL et le moteur du véhicule afin d'optimiser les paramètres de fonctionnement.

La **figure 3.15** montre l'interface principale du logiciel.

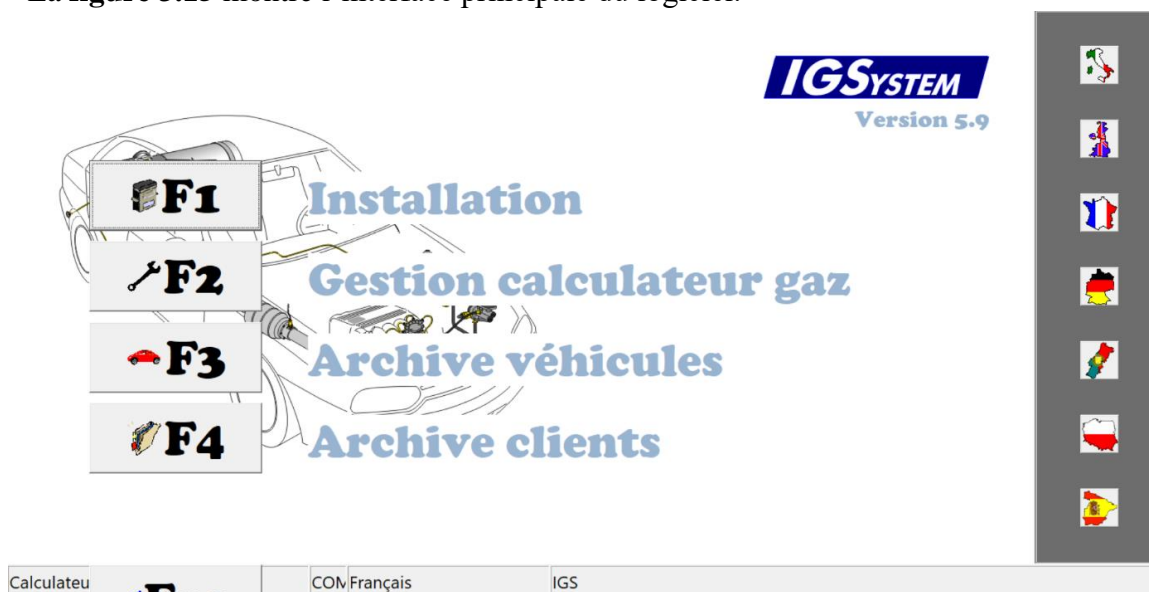


Figure 3-15 : Interface du logiciel LANDIRENZO Omegas.

La **figure 3.16** présente la fenêtre de configuration des paramètres moteur, notamment le type de carburant, le nombre de cylindres et les paramètres de la sonde lambda.

Type de carburant	GPL
Nombre de cylindres	8
Cylindrée	4700
Type de sonde lambda	0.8 - 1.6V
TPS linéaire	Droit
TPS switch (en plus du linéaire)	Absent
Hystérésis TPS	0.14

Figure 3-16 : Configuration des paramètres moteur.

La **figure 3.17** illustre les paramètres de commutation entre les modes essence et GPL.

Changement y compris avec sonde Lambda f

Température minimum pour commutation	40	C°
Temps de superposition	500	Milliseconde
Régime minimum pour la commutation	1600	RPM
Seuil hors régime	4500	RPM

Commutation en décélération
 Commutation en accélération

Figure 3-17: Paramètres de commutation du système GPL.

3.10 Conclusion

Ce chapitre a permis de passer de l'approche théorique à la mise en œuvre pratique du système GPL sur un moteur réel, à savoir le moteur Toyota 2UZ-FE.

Les différentes étapes d'installation ont été présentées, depuis l'intégration des composants mécaniques jusqu'au raccordement électrique et à la configuration électronique du système. Cette étude pratique met en évidence la faisabilité technique de la conversion GPL ainsi que l'importance du respect des procédures d'installation afin d'assurer la sécurité, la fiabilité et les performances du véhicule converti.

Chapitre 4. Étude comparative de performances

[essence / GPL]

4.1 Introduction

Le secteur du transport terrestre connaît aujourd'hui une transformation majeure, marquée par la diminution progressive des ressources fossiles et les préoccupations environnementales croissantes. Dans ce contexte, le choix du carburant ne dépend plus uniquement des performances mécaniques, mais également des critères économiques, énergétiques et environnementaux.

Ce chapitre présente une étude comparative entre l'essence et le gaz de pétrole liquéfié (GPL) appliqués au moteur Toyota V8 2UZ-FE. L'objectif est d'évaluer les différences de consommation, de coût d'exploitation et de rendement énergétique afin de déterminer la solution la plus avantageuse.

4.2 Comparaison de la consommation

4.2.1 Formule de calcul

La consommation volumique du véhicule est déterminée par la relation suivante :

$$\text{Consommation (L/100, km)} = \frac{\text{Volume consommé}}{\text{Distance parcourue}} \times 100 \quad (4-1)$$

4.2.2 Consommation en mode essence

La consommation en mode essence est calculée comme suit :

$$C_{\text{essence}} = \frac{120}{600} \times 100 = 20, L/100km \quad (4-2)$$

Le véhicule consomme donc 20 litres d'essence pour parcourir 100 km.

La distance parcourue avec un litre d'essence est :

$$\frac{600}{120} = 5, km/L$$

Consommation en mode GPL

La consommation en mode GPL est donnée par :

$$C_{\text{GPL}} = \frac{160}{600} \times 100 = 26,67, L/100km \quad (4-3)$$

Le véhicule consomme ainsi environ 26,67 litres de GPL pour parcourir 100 km.

La distance parcourue avec un litre de GPL est :

$$\frac{600}{160} = 3,75, km/L$$

Le **tableau 4.1** présente la comparaison des consommations entre les deux carburants.

Tableau 4-1: Comparaison de la consommation essence / GPL.

Paramètre	Essence	GPL
Volume consommé pour 600 km	120 L	160 L
Consommation	20 L/100 km	26,67 L/100 km
Distance par litre	5 km/L	3,75 km/L
Différence de consommation	Référence	+6,67 L/100 km
Augmentation volumique	Référence	+33,35 %

Cette comparaison montre que la consommation volumique du GPL est plus élevée que celle de l'essence. Cette augmentation s'explique principalement par le fait que le GPL possède une énergie volumique inférieure à celle de l'essence.

4.3 Comparaison économique

4.3.1 Coût d'un plein

Le coût d'un plein est calculé à partir de la relation suivante :

$$\text{Coût du plein} = \text{Capacité du réservoir} \times \text{Prix du litre} \quad (4-4)$$

Le **tableau 4.2** présente le coût d'un plein pour les deux carburants.

Tableau 4-2 : Coût d'un plein.

Carburant	Capacité	Prix du litre	Coût du plein
Essence	120 L	47 DA/L	5 640 DA
GPL	160 L	12 DA/L	1 920 DA

Pour une autonomie d'environ 600 km, l'économie réalisée avec le GPL est :

$$5640 - 1920 = 3720 \text{ DA}$$

4.3.2 Coût pour 100 km

Le coût pour 100 km est déterminé par :

$$\text{Coût pour 100 km} = \text{Consommation} \times \text{Prix du litre} \quad (4-5)$$

Essence

$$20 \times 47 = 940, \text{ DA}/100\text{km}$$

GPL

$$26,67 \times 12 \approx 320, \text{ DA}/100\text{km}$$

Le **tableau 4.3** compare les coûts d'utilisation.

Tableau 4-3 : Coût pour 100 km.

Paramètre	Essence	GPL	Économie avec GPL
Coût pour 100 km	940 DA	320 DA	620 DA

Le GPL permet donc une réduction importante du coût d'exploitation, avec une économie d'environ 620 DA pour chaque tranche de 100 km parcourus.

4.3.3 Projection des coûts selon la distance

Le **tableau 4.4** présente l'évolution des coûts selon la distance parcourue.

Tableau 4-4 : Projection des coûts selon la distance.

Distance	Coût essence	Coût GPL	Économie
100 km	940 DA	320 DA	620 DA
500 km	4 700 DA	1 600 DA	3 100 DA
600 km	5 640 DA	1 920 DA	3 720 DA
1 000 km	9 400 DA	3 200 DA	6 200 DA
10 000 km	94 000 DA	32 000 DA	62 000 DA
20 000 km	188 000 DA	64 000 DA	124 000 DA
30 000 km	282 000 DA	96 000 DA	186 000 DA

4.4 Rentabilité de l'installation GPL

La distance nécessaire pour amortir le coût d'installation du kit GPL peut être estimée par :

$$\text{Distance rentable} = \frac{\text{Coût d'installation}}{\text{Économie par km}} \quad (4-6)$$

Dans cette étude, l'économie moyenne est estimée à :

$$6.2 \text{ DA/km}$$

Le **tableau 4.5** présente la distance de rentabilisation selon le coût d'installation.

Tableau 4-5 : Rentabilité de l'installation GPL.

Coût d'installation du kit GPL	Distance rentable
50 000 DA	≈ 8 065 km
60 000 DA	≈ 9 677 km
80 000 DA	≈ 12 903 km
100 000 DA	≈ 16 129 km

4.5 Comparaison des performances énergétiques

4.5.1 Définition du PCI

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) représente l'énergie libérée lors de la combustion complète d'un carburant, sans récupération de la chaleur contenue dans la vapeur d'eau produite.

Dans la littérature anglophone, cette grandeur correspond au *Lower Heating Value (LHV)*.

4.5.2 PCI massique et PCI volumique

Le PCI massique s'exprime en (MJ/kg), tandis que le PCI volumique s'exprime en (MJ/L).

Pour une étude de consommation en litres par 100 km, le PCI volumique est le paramètre le plus pertinent. Le **tableau 4.6** présente les valeurs de référence utilisées dans cette étude.

Tableau 4-6 : PCI massique et PCI volumique.

Carburant	Masse volumique	PCI massique	PCI volumique
Essence SP	0,74 kg/L	42,7 MJ/kg	31,6 MJ/L
GPL	0,54 kg/L	46,1 MJ/kg	24,9 MJ/L

Le GPL possède un PCI massique légèrement supérieur à celui de l'essence. Toutefois, son PCI volumique reste plus faible en raison de sa densité plus faible.

4.5.3 Relation entre PCI et surconsommation volumique du GPL

La surconsommation volumique du GPL s'explique principalement par sa plus faible énergie par litre.

Le rapport énergétique entre les deux carburants est :

$$\frac{PCI_{essence}}{PCI_{GPL}} = \frac{31.6}{24.9} \approx 1,27 \quad (4-7)$$

Cela signifie qu'il faut environ 1,27 litre de GPL pour fournir l'énergie contenue dans 1 litre d'essence. Ainsi, pour une consommation de : 20 L/100km en essence, la consommation théorique en GPL devient :

$$C_{GPL} = 20 \times 1.27 = 25.4 \text{ L/100km}$$

Le **tableau 4.7** compare l'énergie consommée dans les deux cas.

Tableau 4-7 : Consommation volumique et énergie consommée.

Carburant	Consommation	PCI volumique	Énergie consommée
Essence SP	20 L/100 km	31,6 MJ/L	≈ 632 MJ/100 km
GPL	25,38 L/100 km	24,9 MJ/L	≈ 632 MJ/100 km

Cette comparaison montre que les deux carburants fournissent pratiquement la même quantité d'énergie pour parcourir 100 km, mais avec des volumes différents.

4.6 Conclusion

L'étude comparative réalisée sur le moteur Toyota 2UZ-FE montre que le GPL présente une consommation volumique supérieure à celle de l'essence, avec une augmentation d'environ 33,35 %. Toutefois, cette surconsommation est compensée par le faible coût du GPL, permettant une réduction importante des coûts d'exploitation pouvant atteindre environ 66 %.

L'analyse énergétique montre également que cette différence de consommation est principalement liée au PCI volumique plus faible du GPL, et non à une baisse significative des performances du moteur.

Ainsi, le GPL apparaît comme une solution économiquement avantageuse et techniquement adaptée, tout en contribuant à la réduction des émissions polluantes et de l'empreinte carbone du véhicule.

Conclusion générale

Ce travail a permis de démontrer que la conversion d'un moteur à essence vers un système de bicarburation GPL constitue une solution techniquement fiable, économiquement avantageuse et compatible avec les exigences environnementales actuelles.

L'étude théorique réalisée a d'abord mis en évidence les propriétés physico-chimiques du GPL ainsi que son intérêt énergétique et environnemental par rapport aux carburants conventionnels. L'analyse des différentes architectures d'injection a montré que les systèmes modernes à injection séquentielle permettent d'assurer un fonctionnement stable du moteur tout en respectant les normes de dépollution actuelles.

La partie pratique a ensuite permis de mettre en œuvre l'installation complète d'un kit GPL sur un moteur Toyota 2UZ-FE. Les différentes étapes d'intégration mécanique, électrique et électronique ont été étudiées et appliquées avec succès. Les opérations de réglage et de calibration du calculateur GPL ont confirmé la compatibilité du moteur avec ce type de carburation.

L'étude comparative des performances a également montré que, malgré une consommation volumique plus élevée, le GPL offre une réduction très importante des coûts d'exploitation grâce à son faible prix de vente. Les résultats obtenus mettent en évidence une économie significative sur le coût du carburant, tout en conservant des performances de fonctionnement proches de celles obtenues en mode essence.

Par ailleurs, l'utilisation du GPL contribue à la réduction des émissions polluantes, notamment le dioxyde de carbone et les particules fines, ce qui en fait une solution intéressante dans le contexte actuel de transition énergétique et de réduction de l'empreinte carbone des transports.

En conclusion, le GPL apparaît comme une alternative crédible et immédiatement exploitable pour prolonger l'utilisation des moteurs thermiques dans des conditions plus économiques et plus respectueuses de l'environnement. Cette technologie représente ainsi une solution intermédiaire pertinente entre les motorisations conventionnelles et les futures solutions de mobilité entièrement décarbonées.

Bibliographiques

- [1] Mouni, N. (2013). *Simulation et optimisation des paramètres technologiques de l'unité de fractionnement des GPL à Haoud Berkaoui* (Thèse de doctorat). Université M'Hamed Bougara de Boumerdès.
- [2] Benali, M., & Khadir, A. (2021). Optimisation des procédés de traitement et de fractionnement des hydrocarbures légers : Analyse des performances des unités GPL. *Revue des Sciences et Technologies de l'Énergie*, 14(2), 112–128.
- [3] SONATRACH. *Manuel opératoire de l'unité de traitement de gaz de Guellala (UTG-GLA), Haoud Berkaoui*.
- [4] Direction Production SONATRACH. (2023). *Optimisation des flux de transport par canalisation : Cas du réseau RTO vers le complexe de séparation GPL d'Arzew (GP1Z)* (Mémoire de Master). Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO-MB).
- [5] Kaci, S., & Rahmani, F. (2024). Évaluation des performances environnementales et énergétiques des carburants alternatifs : Le cas du GPL-c dans le transport urbain. *Revue des Énergies Renouvelables et de l'Environnement*, 22(1), 74–89.
- [6] Belaid, H. (2019). *Étude de la possibilité de récupération des gaz torchés au niveau des champs de Haoud Berkaoui* (Mémoire de Master). Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [7] Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education.
- [8] Brown, T. L., LeMay, H. E., & Bursten, B. E. *Chemistry: The Central Science*. Chapitre 5 : Gases.
- [9] Techniques de l'Ingénieur. (2024). *Moteurs à allumage commandé : Principes et technologies*.
- [10] *Moteur essence à injection directe Hyundai*. Disponible sur : [Le Moniteur Automobile](#)
- [11] Dumas, M., & Lefebvre, T. (2024). *Histoire et prospective des machines thermiques : De la vapeur aux motorisations décarbonées*. Éditions des Sciences Industrielles.

- [12] Latreche, I. E. (2025). *Effets du carburant sur les performances des moteurs à combustion interne : Étude comparative entre l'essence et le GPL* (Mémoire de Master). Université 8 Mai 1945 – Guelma.
- [13] *Les moteurs 4 temps : fonctionnement et avantages expliqués*. Disponible sur : [Stuffcc](#)
- [14] *Tout savoir sur le moteur 4 temps*. Disponible sur : [IXTEM Moto](#)
- [15] Moreau, L., & Dubois, P. (2023). Évolution des systèmes d'injection alternative : Du carburateur au séquentiel gazeux. *Revue Internationale du Génie Automobile*, 12(4), 210–225.
- [16] Bouchafa, B., & Hamidi, A. (2022). Modélisation et analyse des paramètres d'injection des systèmes GPL séquentiels : Optimisation du mélange air-carburant. *Revue Internationale de Mécanique Appliquée et de Thermodynamique*, 15(4), 142–158.
- [17] Anine, B. (2021). *Étude et calcul de vérification d'un kit GPL* (Mémoire de Master académique). Université de Tissemsilt.
- [18] Bosch, R. (2014). Systèmes d'alimentation par mélangeur et principes de la dynamique des fluides. Dans *Manuel de technologie automobile* (28e éd., pp. 540–545). Lavoisier.
- [19] Guibet, J.-C. (1997). *Carburants et moteurs* (Tome 2). Éditions Technip.
- [20] Al-Rousan, A. (2010). Reduction of fuel consumption and drive emissions by converting gasoline engines to LPG. *International Journal of Thermal & Environmental Engineering*, 1(1), 37–43.
- [21] Vial, R. (2021). *Évolutions des systèmes d'injection : Du multipoint à l'injection directe liquide*. ETAI.
- [22] Association Française du Gaz (AFG). (2022). *Réglementation et sécurité des installations de gaz de pétrole liquéfié dans les véhicules routiers (Règlement R67-01)*. AFG Éditions.
- [23] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamique : Une approche pragmatique*. McGraw-Hill Education.
- [24] Guzzella, L., & Onder, C. (2010). *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer.
- [25] Johnson, E. (2021). *LPG: The Alternative Fuel for a Greener Future — Technical and Economic Analysis*.

- [26] Stone, R. (2012). *Introduction to Internal Combustion Engines* (4e éd.). Palgrave Macmillan.
- [27] Basshuysen, R. V., & Schäfer, F. (2016). *Internal Combustion Engine Handbook*. SAE International.
- [28] Zhao, F., Harrington, D. L., & Lai, M.-C. (2002). *Automotive Gasoline Direct Injection Engines*. SAE International.
- [29] Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2e éd.). McGraw-Hill Education.
- [30] Erjavec, J., & Thompson, R. (2014). *Automotive Technology: A Systems Approach*. Cengage Learning.
- [31] Reif, K. (2014). *Fundamentals of Automotive and Engine Technology: Standard Drives, Hybrid Drives and Vehicle Systems*. Springer Vieweg.
- [32] Ribbens, W. B. (2017). *Understanding Automotive Electronics: An Engineering Perspective*. Butterworth-Heinemann.
- [33] Guibet, J.-C., & Faure-Birchem, A. (1999). *Carburants et moteurs*. Éditions Technip.
- [34] Srinivasan, K. K., & Krishnan, S. R. (2021). *Dual-Fuel Engines*. CRC Press.
- [35] Latusek, R., & Pietras, D. (2020). LPG-Diesel dual fuel system as a method of reducing operating costs and emissions in compression ignition engines. *Combustion Engines*.
- [36] Motorinsel. *Moteur Toyota 2UZ-FE : caractéristiques et spécifications*. Disponible sur
- [37] LANDIRENZO Omegas

ANNEXES

Annexe A :

1) Maintenance et entretien des véhicules convertis au GPL

Le bon fonctionnement d'un système GPL dépend directement de la qualité de l'installation, du réglage initial et du respect des opérations de maintenance périodique. Un entretien régulier permet d'assurer la sécurité du véhicule, de préserver les performances du moteur et de prolonger la durée de vie des composants du système GPL.

Les opérations de maintenance doivent être réalisées par des techniciens qualifiés, notamment pour les interventions sur le circuit GPL sous pression. Les organismes spécialisés dans la sécurité des véhicules GPL recommandent également des procédures de contrôle strictes pour les systèmes de stockage, de vaporisation et d'injection.

2) Contrôle et réglage du circuit GPL

Après l'installation du système GPL, plusieurs opérations de vérification doivent être réalisées :

- mise sous pression du circuit GPL afin de contrôler l'étanchéité des raccords ;
- vérification de l'absence de fuite à l'aide d'une solution savonneuse ;
- contrôle de l'étanchéité de la polyvanne du réservoir ;
- vérification du bon fonctionnement du système automatique de limitation du remplissage à 80 % ;
- réglage du débit gaz/air au ralenti et à pleine charge ;
- contrôle du fonctionnement du moteur en conditions réelles après essai routier.

Un bon réglage du système GPL ne peut être obtenu que si le moteur fonctionne correctement en mode essence. Il est également recommandé de ne jamais modifier les réglages de sécurité de la polyvanne ou de la soupape de sécurité.

3) Remplissage du réservoir GPL

Le remplissage du réservoir doit respecter les limites imposées par les normes de sécurité. Un remplissage excessif peut entraîner une augmentation anormale de la pression interne du réservoir. Pour cette raison, les systèmes GPL automobiles utilisent un limiteur automatique bloquant le remplissage à environ 80 % du volume total.

4) Panne de GPL

En cas d'épuisement du GPL dans le réservoir, le moteur ne s'arrête généralement pas de manière instantanée. La perte d'alimentation se manifeste progressivement sur quelques kilomètres par une diminution des performances du moteur avant le basculement vers le mode essence.

5) Entretien du moteur alimenté au GPL

Le moteur fonctionnant au GPL ne nécessite pas de réglages particuliers supplémentaires par rapport au fonctionnement à l'essence. Toutefois, certains éléments doivent être maintenus en bon état afin d'assurer une combustion correcte :

- circuit d'allumage ;
- bougies ;
- filtre à air ;
- système d'admission ;
- système de refroidissement.

Les recommandations techniques internationales insistent également sur l'importance des inspections périodiques du système GPL afin d'éviter les fuites et les anomalies de fonctionnement. ([EMS Department](#))

6) Entretien périodique du système GPL

L'entretien périodique comprend principalement les opérations suivantes :

1. vérification de l'état des conduites et des raccords GPL ;
2. contrôle de la pression du réducteur-vaporisateur ;
3. inspection des tuyaux basse pression ;
4. nettoyage du trou de compensation de pression ;
5. contrôle du système électrique et des connexions ;
6. vérification de l'absence de dépôts huileux dans le réducteur ;
7. révision générale du vapo-détendeur selon les intervalles recommandés.

Les organismes spécialisés recommandent également des inspections régulières des réservoirs GPL et des composants de sécurité afin de garantir la conformité du système et la sécurité du véhicule.

7) Diagnostic et localisation des pannes

En cas de dysfonctionnement du système GPL, il est recommandé d'effectuer un contrôle complet du moteur ainsi que des circuits essence et GPL.

Les principaux éléments à vérifier sont :

- le système d'allumage ;
- la batterie ;
- les prises d'air ;
- l'alimentation en carburant ;
- l'état général du moteur.

Les pannes les plus fréquentes concernent :

- le non-fonctionnement des électrovannes ;
- l'obstruction des conduites ;
- les problèmes de pression du GPL ;
- les défauts de carburation ;
- les anomalies de ralenti ou de puissance moteur.

8) Sécurité des opérations de maintenance

Les interventions sur les véhicules GPL doivent respecter des règles de sécurité strictes. Les ateliers spécialisés doivent être équipés de dispositifs de détection des gaz inflammables et assurer une ventilation adaptée afin d'éviter toute accumulation de GPL.

Il est également recommandé :

- d'éviter toute source de flamme ou d'étincelle à proximité du véhicule ;
- de ne jamais purger le GPL à l'air libre dans une zone fermée ;
- de contrôler régulièrement les flexibles et raccords ;
- d'effectuer les réparations du réservoir uniquement dans des ateliers agréés.



غرداية في : 2026/06/28

شعبة : الكهروميكانيك
تخصص: صيانة صناعية

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الاستاذ(ة) : بكار بلقاسم

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج ماستر المعنونة بـ:

Etude de l'adaptation du GPL dans moteur à essence

من انجاز الطالب (الطالبة):

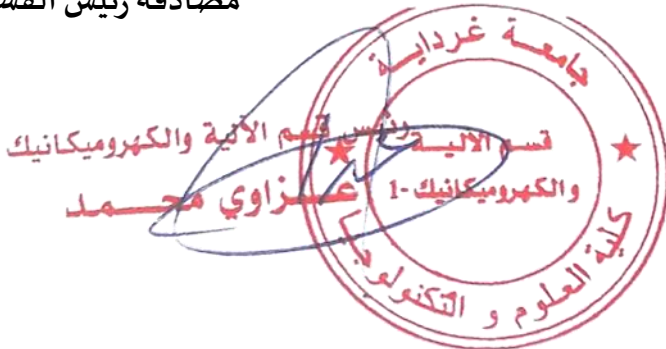
RECHOUM Saber youb

KACIOUSALAH Hadj ahmed

التي نوقشت بتاريخ : 13 جوان 2026

اشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم



امضاء المسؤول عن التصحيح

صبر 13