

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche*  
*Scientifique*



*Ecole Nationale Polytechnique*  
*Département de Génie Mécanique*

## **Projet de Fin d'études**

Pour l'obtention du diplôme

**D'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique**

*Thème*

*Etude de la conversion du*  
*moteur F4L912 en*  
*dual fuel*

Proposé et dirigé par:

Dr. M. BENBRAIKA

Présenté par :

BELHANNACHI Hichem

Promotion : Juin 2010

## ملخص

في إطار إستراتيجية الدولة الرامية إلى تجديد الحظيرة الوطنية للسيارات, خاصة في قطاع النقل و الهادفة إلى بيئة سليمة بالدرجة الأولى, اقترحنا التطرق إلى دراسة تقنية و اقتصادية لتحويل المحرك "F4L912" مازوت إلى محرك ثنائي الوقود مازوت-غاز طبيعي.

تشتمل هذه الدراسة على الواقع البيئي و الاقتصادي الذي يعيشه العالم المعاصر, تطرقنا أيضا في هذه الدراسة إلى الجانب الطاقوي و وتيرة استهلاك الطاقة السوداء و الضرورة الحتمية إلى الطاقة البديلة و النقية. تحدثنا فيما بعد عن مثال الجزائر و بينا أهمية استعمال هذه التقنية في مثل هذا البلد.

**كلمات مفتاحية :** محرك، مازوت، غاز طبيعي، ثنائي الوقود.

### Résumé:

Dans le cadre de la nouvelle stratégie de l'état qui vise le renouvellement du parc national automobile surtout dans le secteur de transport, nous avons proposé de faire une étude technico-économique de la conversion du moteur Diesel F4L912 équipant le bus 25L4, en un moteur dual fuel fonctionnant en bicarburant gaz naturel-gasoil.

L'étude de la conversion contient une adaptation de l'installation du kit dual fuel qui convient ce type de moteurs. On a aussi proposé la conception de quelques composants qui assure le bon fonctionnement de l'ensemble.

Nous avons aussi projeté l'état économique et écologique vécu par le monde moderne, nous avons donné un aperçu de la situation énergétique et de la consommation des énergies fossiles dans le monde, d'où la nécessité des énergies renouvelables et écologiques. Nous avons en suite discuté l'exemple de l'Algérie et montré l'utilité de dual fuel dans un tel pays.

**Mots clés :** moteur, dual fuel, gaz naturel, Diesel.

### Summary:

The objective of this modest project is to make a technico-economic study of the conversion of diesel engine F4L912 equipping the bus 25L4, into a dual fuel engine operating with natural gas & gas oil.

We also projected the economic and ecological state lived by the modern world, we gave an outline of the energy situation and consumption of fossil energies in the world, from where need for renewable and ecological energies. We discussed after, the example of Algeria and showed the utility of dual fuel in such a country.

**Keywords:** engine, dual fuel, natural gas, Diesel.

## *Remerciement*

*Louanges et grâce à notre seigneur Allah, le tout puissant, qui nous a offert ce qu'on ne peut compter de dons.*

*Je tiens à remercier mon promoteur Mr M.BENBRAIKA, de m'avoir offert la possibilité de travailler sur un thème aussi intéressant et de m'avoir ouvert son bureau et d'avoir œuvré pour réunir de meilleures conditions malgré toutes les difficultés.*

*Je tiens à remercier, les employés de la SARL CVG, de leur aide et leur accueil chaleureux et de leur disposition.*

*Je remercie aussi, les ingénieurs du bureau d'étude de la SNVI, de leur aide et leur accueil et de tout ce qu'ils m'ont offert.*

*Et en dernier, bien qu'ils soient toujours premier dans mon cœur, comment ne pas témoigner ma reconnaissance, ma gratitude et mon remerciements à ceux qui ont toujours été là pour moi, pour me soutenir, m'encourager et m'entourer de leur amour ..., à ma famille.*

## *Dédicace*

*A ce qu'est toujours mon meilleur exemple de vie : mon très cher père, pour les sacrifices qu'il a consentis pour mon éducation et pour l'avenir qu'il n'a cessé d'offrir.*

*Au symbole de douceur, de tendresse, d'amour et affection, et grâce au sens de devoir et aux sacrifices immenses qu'elle a consentis ma chère mère.*

*A ce qui m'a été toujours la garante d'une existence paisible et d'un avenir radieux ma jolie famille.*

*A ceux qui m'ont soutenu, encouragé, apprécié mon effort et créé le milieu favorable, l'ambiance joyeuse et l'atmosphère joviale pour mon procurer ce travail : mes chers enseignant(e)s et ami(e)s*

*A toutes ces personnes que j'ai senti redevable de leur dédier ce modeste travail avec mes vifs remerciements et les expressions respectueuses de ma profonde gratitude.*

*Hichem*

## ***ABREVIATIONS***

PVD	pays en voie de développement
Tep	tonne équivalent pétrole
ENR	énergies renouvelables
HC	hydrocarbures
HAP	hydrocarbures aromatiques polynucléaires
GPL	gaz de pétrole liquéfié
GN	gaz naturel
GPL-c	gaz de pétrole liquéfié carburant
GNL	gaz naturel liquéfié
GNV	gaz naturel pour véhicules
ROM	Research Octane Number
MON	Motor Octane Number
PCI	pouvoir calorifique inférieur
PCS	pouvoir calorifique supérieur
MDF	moteur dual fuel
D	Diesel
MEM	ministère de l'énergie et des mines
GES	gaz à effet de serres

# INTRODUCTION

*L'économie, l'énergie et l'environnement, trois domaines directement liés à l'existence de l'être humain qui des l'antiquité avait besoin de l'énergie pour se nourrir, se mouvoir et se réchauffer jusqu'à nos jours, seules les techniques ont changé. Du bois, du coke aux énergies fossiles et aux énergies renouvelables. Cette énergie s'est développée pour répondre aux besoins de l'homme qui n'a jamais cessé de développer sa technologie en cherchant une vie plus facile et plus prestigieuse; en parallèle l'énergie se consomme, son prix de plus en plus augmente et l'atmosphère se pollue.*

*L'une des sources les plus polluantes, les moteurs thermiques et le transport routier où la pollution par les émissions automobiles dans le monde devient de plus en plus inquiétante particulièrement dans les grandes métropoles où on constate déjà depuis plusieurs décennies des épisodes de pollution par le smog dont les effets néfastes sur tous les êtres vivants ainsi que sur la végétation sont démontrés.*

*La recherche du véhicule et du moteur propre fait de nos jours l'objet de nombreux travaux; l'objectif principal consiste à réduire les émissions polluantes en améliorant la combustion des moteurs et en utilisant des carburants (alternatifs) moins polluants et moins chers. L'utilisation du gaz carburant est l'une des options utilisées depuis les années soixante-dix. Cependant et pour des raisons diverses l'utilisation du gaz n'a pas connu de percée et de même au niveau des pays grands producteurs d'énergie gazière. Vu sa disponibilité en Algérie et vu l'intensité du trafic, surtout le parc roulant en Diesel, il est intéressant d'exploiter le gaz naturel dans le domaine de transport. La conversion des moteurs Diesel en moteurs à bicarburation appelés « dual fuel » fonctionnant en mélange gaz/gasoil pour le but de réduire et le cout de l'énergie et la pollution atmosphérique due aux moteurs thermiques fera une bonne transition avant de passer au moteur tout gaz fonctionnant qu'au gaz naturel. On prendra comme exemple le moteur « F4L91 2 ». L'objectif sera de faire une étude technico-économique concernant la conversion et aussi une projection sur la position de l'Algérie vis-à-vis de, l'actualité énergétique, économique et écologique.*

*Afin de bien présenter notre projet, le travail a été proposé dans quatre chapitres. Dans le premier chapitre consacré aux généralités, nous projetterons l'état de l'économie, l'énergie et l'écologie dans le monde et les liens imposés entre les trois, nous allons aussi proposer un aperçu sur le gaz naturel et le moteur dual fuel. Le deuxième chapitre fera l'objet d'une étude du cas de l'Algérie, nous parlerons du gaz naturel et de la stratégie de l'état concernant ce dernier, nous allons aussi parler du parc automobile algérien, de la pollution atmosphérique causée par ce dernier et des*

*réglementations qui régissent les émissions dans le secteur de transport. Le troisième chapitre contiendra l'étude technologique de la conversion, où nous allons présenter les différentes technologies possibles et nous détaillerons celle que nous avons choisie avec les modifications prévues dans l'ensemble bus-moteur. Dans le dernier chapitre, nous présenterons une analyse économique du projet, là où nous allons calculer la durée d'amortissement en admettant quelques chiffres pour les différents coûts de la conversion.*

## LISTE DES FIGURES

figure I.1 : Evolution de la consommation énergétique mondiale .....	3
Figure I.2 : réserves prouvées de l'énergie dans le monde [4] .....	5
Figure I.3: consommation d'énergie par secteur en 2005[4] .....	5
Figure I.4 principaux domaines émetteurs des gaz à effets de serre[6].....	6
Figure I.5 : principaux pays émetteurs de CO <sub>2</sub> [6].....	6
Figure I.6 : Station de remplissage lent de GNV (dépôt de bus).....	14
Figure I.7 : Station de remplissage rapide de GNV (publique).....	15
Figure I.8 : exemple d'une station de remplissage individuel .....	16
Figure I.9 schéma de la combustion dans un moteur dual-fuel .....	18
Figure I.10 : synoptique d'alimentation en gaz haute pression d'un moteur industriel diesel gaz .....	20
Figure I.11 : synoptique d'alimentation en gaz basse pression d'un moteur industriel diesel gaz. ....	20
Figure II.1 : Evolution du parc automobile Algérien de 1990 à 2005 [14] .....	24
Figure II.2 : Consommation des carburants durant les exercices de 1995 et 2005. 25	
Figure II.3 : Parts des émissions par secteur et par gaz, 1994 [15] .....	26
Figure III.1 photo du moteur F4L912 .....	26
Figure III.2 Pompe d'injection du F4L912 .....	29
Figure III.3: schéma simplifié d'une installation à aspiration en boucle ouverte ....	30
Figure III.4: schéma simplifié d'une installation à aspiration en boucle fermée .....	31
Figure III.5 : schéma simplifié d'une installation à injection séquentielle .....	31
Figure III.6 a : schéma proposé de l'installation dual fuel sur le F4L912 .....	32

Figure III.6 b : organigramme du circuit électrique de l'installation dual fuel sur le F4L912.....	33
Figure III.7 réservoirs en acier allié .....	34
Figure III.8 réservoirs en matériaux composite ( réservoirs ULLIT) .....	34
Figure III.9 Schéma simplifié d'un réservoir destiné au GNV .....	35
Figure III.10 : schéma d'une poly-vanne de GNV .....	35
Figure III.11 schéma détaillé d'un orifice de remplissage GNV .....	36
Figure III.12 exemple d'une installation à ralentissement du gaz.....	37
Figure III. 13 LOVATO électrovanne pour GNV.....	38
Figure III.14 LOVATO électrovanne pour GNV.....	39
Figure III.15 schéma d'un mélangeur, carburateur .....	39
Figure III.16 sonde d'oxygène lambda gaz .....	40
Figure III.17 détecteur de choc, emplacement dans le bac des batteries .....	40
Figure III.18 châssis métallique. ....	42
Figure III.19. Fixation des bouteilles dans le châssis métallique.....	42
Figure III.20. Fixation de l'ensemble bouteilles-carénage sur le bus 25L4.....	43
Figure III.20.a Support du moteur pas à pas d'accélération.....	44
Figure III.20.b Emplacement du support pré du filtre à gasoil .....	44

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

CHAPITRE I. GENERALITES .....	1
I.1 L'économies et l'énergie.....	1
<b>I.2 Réserves et ressources fossiles .....</b>	<b>3</b>
I.4 Les carburants gazeux.....	7
Le GPL carburant (GPL-c) .....	7
Le GAZ naturel .....	8
Récapitulation : Avantages et inconvénients de l'utilisation du GNV .....	16
I.5 Moteur dual fuel.....	17
Qu'es ce qu'un moteur dual-fuel ?.....	17
Historique .....	19
Description technique .....	19
Aspects environnementaux .....	21
Actualité chez les grands constructeurs automobile: .....	22
CHAPIRE II. CAS DE L'ALGERIE .....	23
II.1 Le GAZ naturel en Algérie .....	23
II.2 Parc automobile Algérien .....	24
II.3 Emission des GES en Algérie.....	25
Seuils limites des gaz toxiques émis par les véhicules automobiles : .....	26
CHAPITRE III. ETUDE TECHNOLOGIQUE DE LA CONVERSION.....	29
III.1 Présentation du moteur F4L912 .....	29
III.2 Description de l'installation .....	30
III.3 Description des équipements .....	33

III.4 Fonctionnement de l'ensemble.....	41
Mode dual fuel :.....	41
Mode diesel :.....	41
Mode ralenti :.....	41
CHAPITRE IV. ANALYSE ECONOMIQUE DU PROJET .....	50
IV.1 Coût Fixes .....	50
IV.2 Coûts Variables .....	50
IV.3 Discussion .....	52
CONCLUSION .....	53
ANNEXES .....	54
ANNEXE 1. DUREE D'AMORTISSEMENT .....	55
ANNEXE 2. REGLES DE SECURITE.....	58

# CHAPITRE I. GENERALITES

## I.1 L'économie et l'énergie

Le problème de l'énergie est complexe, car il a des répercussions sur un grand nombre de domaines différents, économique, écologique et politique :

**Economique :** l'évolution de l'économie est directement liée à la disponibilité et au prix de l'énergie et réciproquement, ce que montre la dernière crise économique qui a causé la chute des prix du pétrole et d'autres produits.

**Politique :** les pays doivent garantir leur accès légal ou non aux ressources énergétiques, ce qui a une influence directe sur la politique énergétique et économique et sur la politique étrangère. Ainsi la première raison pour la quelle le monde s'entretue c'est l'énergie (guerre du Golf, d'Irak et d'Afghanistan et récemment la crise de l'Iran).

**Ecologique :** le plus grand impact de la production et l'utilisation de l'énergie est sur l'environnement. La consommation de l'énergie dans le monde va continuer à croître très fortement dans les années à venir, en raison du développement économique, ce qui entrainera une augmentation de la pollution mondiale façon spectaculaire presque exclusivement dans les PVD où justement la croissance économique est très importante.

**Dans le monde** [1], depuis 1973 où le prix du pétrole a augmenté, les pays industrialisés commencent à chercher à développer des énergies de substitution, notons : l'énergie solaire, géothermique, thermique des océans, du vent ...etc. On détaillera dans se qui suit l'évolution de la production et la consommation de l'énergie.

Les années vingt du siècle dernier voient le plafonnement de la production charbonnière. Depuis, la production du charbon a continué de se développer suite au développement énorme de la Chine avec un rythme de progression de 10% par an et qui lui a permis de dépasser les Etats-Unis en l'an 2000; la stagnation de la production de charbon à partir de 1920 a correspondu avec la montée en puissance de la production de pétrole passant de 0.8 millions de tonnes en 1926 dont 138 millions pour les Etats-Unis.

De 1900 à 1971, la production mondiale de charbon a augmenté de 300% alors que celle du pétrole de plus de 1000%; l'énergie tirée du pétrole réalisait en effet un bond spectaculaire et a bouleversé totalement les structures de la consommation énergétique.

Le gaz naturel a effectué une avance plus lente au cours de la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle et sans concurrencer le pétrole dont il demeure le complément naturel. Depuis 1977, la production de pétrole a eu un rythme moins soutenu, elle a atteint cependant 4 milliards de tonnes en 2005. En suivant l'évolution de l'énergie, on constate que le pétrole a la part du lion en consommation ainsi qu'en production qui n'a cessé de croître de 3.8 % en 1900 à 49 % en 1975 pour se stabiliser autour de 40 %, en 2002. Le charbon dont la part était de 94.2 % en 1900 a décliné jusqu'à 29.5 % en 1975 ; En 2000, le pourcentage s'est stabilisé autour de 33 % de la consommation totale. Trois ressources principales se partageaient en 2006 88 % de la consommation d'énergie (8 milliard de tep). Le charbon 26 %, le pétrole 40 % et le gaz naturel 22 %. On voit que ce bilan laisse peu de place aux énergies renouvelables (6%) et au nucléaire (6%).

On portera dans le tableau ci dessous (*tableau I.1.*) la consommation en des différentes époques qui correspondent à des ruptures.[2]

**Tableau I.1 : consommation d'énergie à travers l'histoire (par homme et par an  
Estimation en kWh)**

<b>Période</b>	<b>Consommation en kWh</b>
Civilisation de la cueillette	200
Civilisation des chasseurs (l'âge du feu)	900
Civilisation agricole (avec animaux domestique)	1100
1800 (Europe : classe privilégiée) début des manufactures	4400
2000 France (moyenne)	44.200
2000 Etats-Unis	92.000
2000 l'Algérie	11250
2000 moyenne Afrique	2200
2000 moyennes mondiales	1870

En 2007, le potentiel a dépassé les 11 Gtep, à titre d'estimation il atteindra les 17 Gtep en 2030 où le gaz (sous toutes ses formes) aura une forte présence dans ces réserves, figure I.1).

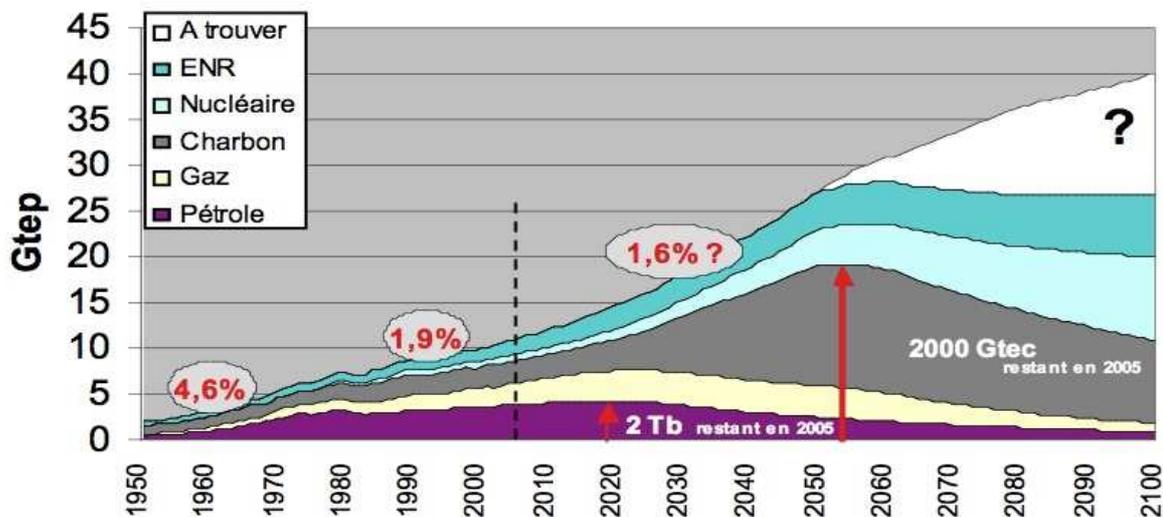


Figure I.1 : Evolution de la consommation énergétique mondiale

## I.2 Réserves et ressources fossiles

En 2000, les réserves prouvées de pétrole brut sont de l'ordre de 43 ans, celles de gaz naturel de 70 ans et celles de combustibles solides de 250 ans (tableau I.11) [3]

Tableau 1.2 Estimation des réserves et ressources fossiles (en Gtep)

Réserve et ressources	Consommation 2000	Réserves prouvés	Ressources récupérables	Ressources ultimes
Pétrole brut .....	3.5			
- conventionnel .....		150	145	
- non conventionnel		193	332	1900
Gaz naturel .....	2.1			
- conventionnel .....		141	279	
- non conventionnel ....		192	258	400
- hydrate .....				18700
Charbon .....	2.4	606	2794	3000
total .....	8.0	1282	3808	24000

Aucun scénario d'offre n'est donc limité par la quantité physique de ressources fossiles. Mais ces dernières ne sont pas toutes accessibles aux mêmes conditions politiques, économiques et écologiques.

Les réserves prouvées de pétrole sont très inégalement réparties :

- près de 54 % au Moyen-Orient (avec des durées de vie théoriques supérieures à 80 ans pour le Koweït, l'Arabie Saoudite et Abu Dhabi) ;
- face à 5 % en Amérique du Nord, 3 % en Europe occidentale, 16 % en Amérique latine, 8 % en Afrique, 11 % dans l'ex-Union Soviétique et 3 % en Asie Pacifique.

Associée pour des raisons géologiques aux coûts d'exploitation les plus faibles de la planète (90 % des réserves accessibles à moins de 4 \$ le baril), cette concentration géographique rend le marché pétrolier plus vulnérable aux événements politiques que les marchés gaziers et surtout charbonniers. Il n'est donc pas exclu que des scénarios à forte composante pétrolière soient écartés parce que des États chercheront à limiter l'appel aux carburants pétroliers pour des raisons de sécurité d'approvisionnement.

Le haut de la fourchette des réserves mondiales ultimes de combustibles fossiles était en 2009, de l'ordre de 500 Gtep (500 milliards de tonnes équivalent pétrole), réparties comme suit : (figure I.2)

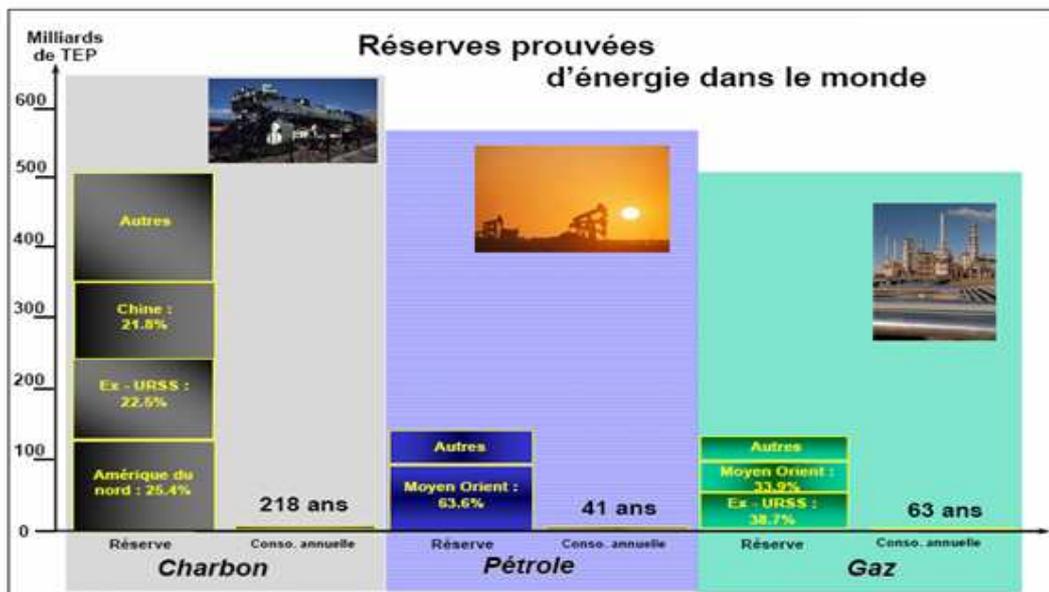


Figure I.2 : Réserves prouvées de l'énergie dans le monde [4]

Le plus important dans cette consommation est que le domaine du transport, possède une part importante dans cette consommation, on se réfère à la figure suivantes pour plus d'éclaircissement (figure I.3)

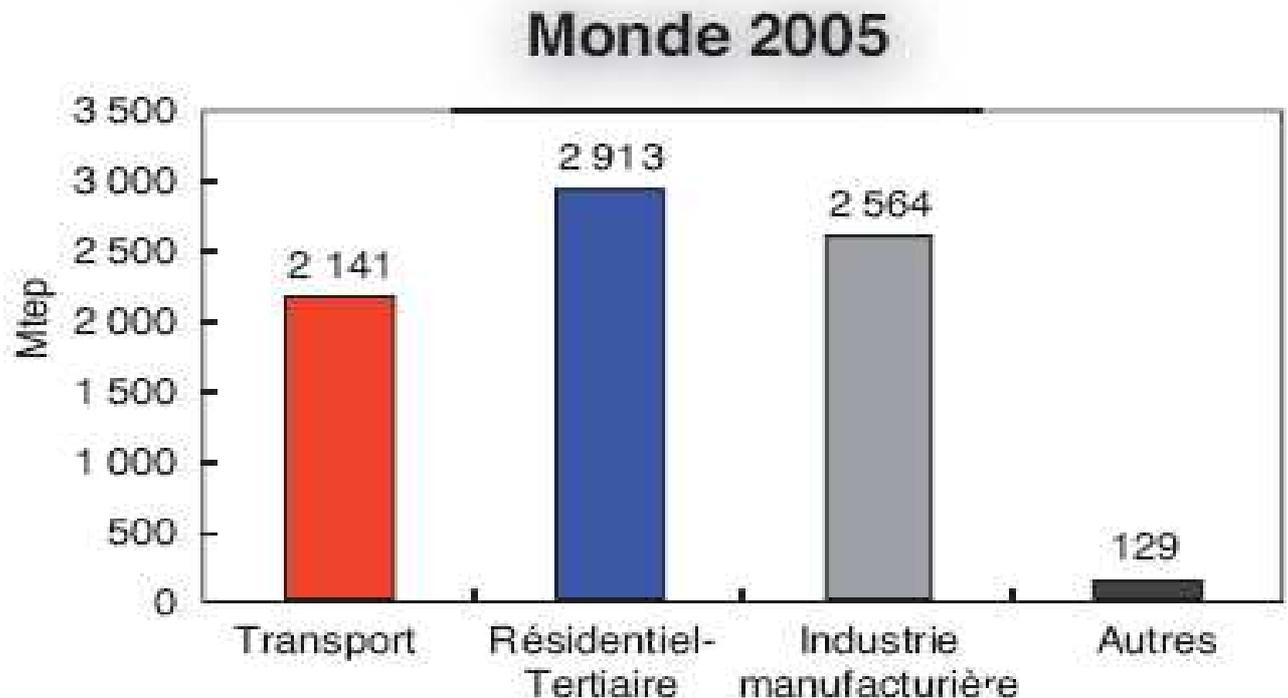


Figure I.3: consommation d'énergie par secteur en 2005<sup>[4]</sup>

### I.3 Pollution atmosphérique due aux moteurs thermique <sup>[5]</sup>

Actuellement, les moteurs à combustion présentent une source très importante d'émissions gazeuses ou particulaires envoyés dans l'atmosphère.

Le transport est jugé dans le monde responsable du tiers des émissions carboniques et de trois quarts de polluants classique. Cette pollution se produisant en priorité dans les agglomérations urbaines. On peut estimer ainsi que les moteurs sont, la source de 80 % du monoxyde de carbone, 70 % des oxydes d'azote, 60 % des hydrocarbures et 85 % des plombs présents dans l'atmosphère. (Figure I.4)



Figure I.4 principaux domaines émetteurs des gaz à effets de serre<sup>[6]</sup>

La figure ci-dessous (figure I.5) présente les principaux pays émetteurs de CO<sub>2</sub>



Figure I.5 : principaux pays émetteurs de CO<sub>2</sub> <sup>[6]</sup>

Les émissions automobiles interviennent, dans une mesure variable, dans pratiquement tous les types de polluants que l'on peut rencontrer dans l'atmosphère, c'est-à-dire dans :

- les composés carbonés : CO, CO<sub>2</sub> ;
- les composés azotés : NO, NO<sub>2</sub> (couramment désignés sous le nom générique d'oxydes d'azote NO<sub>x</sub>), N<sub>2</sub>O, et plus rarement NH<sub>3</sub>, HCN, nitrosamines, etc. ;
- les composés organiques, volatils, irritants ou odorants, comme les hydrocarbures (HC), le benzène, les hydrocarbures aromatiques polynucléaires (HAP), les composés carbonylés (aldéhydes, etc.), carboxyles (acides organiques) ;

- **les composés soufrés**, surtout  $\text{SO}_2$  (dans la mesure où le gasoil n'est pas encore désulfuré) et  $\text{SO}_3$  (acide sulfurique) et plus rarement  $\text{H}_2\text{S}$  et mercaptans ;
- **des composés halogénés**, essentiellement dans les carburants plombés en cours de disparition ;
- **des composés métalliques**, surtout le plomb des carburants, et le zinc des lubrifiants associé à son impureté le cadmium ;
- **des particules organiques**, issues pratiquement exclusivement des moteurs Diesel.

Ces polluants sortant des échappements contribuent également à la formation dans l'atmosphère, par réaction entre les espèces chimiques présentes, de polluants secondaires, en particulier l'ozone à partir de réactions complexes entre hydrocarbures et oxydes d'azote et le **smog** sous l'effet du rayonnement solaire. C'est d'ailleurs le phénomène de **smog**, brouillard photochimique oxydant dans les régions de fort ensoleillement comme Los Angeles, qui a sensibilisé le public et les gouvernements au problème de pollution automobile et a déclenché les initiatives en faveur de la réduction des émissions polluantes.

Les produits organiques les plus concernés comme précurseurs de l'ozone sont les produits insaturés, particulièrement le 1,3-butadiène, le formaldéhyde et l'acétaldéhyde.

## **I.4 Les carburants gazeux**

Les combustibles gazeux se présentent aujourd'hui sous les deux formes :

- Le GPL : gaz de pétrole liquéfié
- Les GN : gaz naturel

### **Le GPL carburant (GPL-c) [7]**

Depuis plusieurs années, de nombreux pays tel que la Hollande, l'Italie, l'Allemagne et le Japon utilisent les gaz de pétrole liquéfiés comme carburants. En France ce type de carburant a été autorisé le 22 décembre 1978, en Algérie NAFTAL a attendu jusqu'aux années 80. Cette décision a été motivée essentiellement par le souci de valoriser au mieux les excédents du GPL issus principalement du raffinage. On a également des débouchés spécifiques de GPL provenant directement des lieux de production de pétrole brut. Indépendamment des considérations liées au bilan pétrolier, les pouvoirs publics ont souhaité mettre sur le marché un carburant qui présentait un certain nombre d'avantages en

matière de pollution atmosphérique (absence de plomb, faible émissions de CO et NOx, nocivité moindre des produits imbrulés).

### **Caractéristiques :**

Généralement le GPL-c est un mélange de C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> contenant en volume plus de 19 % et moins de 50 % de propane et propène. Il est important de signaler que la composition du GPL-c varie d'un pays à un autre, en fonction notamment des schémas de raffinage et des excédents des divers composants possibles.

### **Le GAZ naturel**<sup>[7]</sup>

Vue la situation économique et le prix des carburants conventionnels d'une part, et la situation écologique d'une autre, de nombreux pays marquent l'intérêt pour l'utilisation du gaz naturel dans les moteurs. Les gisements de gaz sont la plupart du temps distincts de ceux de pétrole ; de plus, contrairement à d'autres carburants de substitution, il existe déjà pour le gaz naturel un réseau de transport et de distribution depuis les lieux de production vers les lieux de consommation.

### Caractéristiques :

Le gaz naturel est composé en majeure partie de méthane et contient également d'autres composants plus lourds dont la proportion peut varier selon la provenance (tableau **I.3**) et dans le (tableau **I.4**) on représente quelques propriétés chimiques du méthane. Celles-ci incitent à prévoir un comportement satisfaisant dans les moteurs. La carburation en phase gazeuse présentera les mêmes avantages que pour GPL. Le méthane est également favorisé par un PCI massique supérieur de 16 % à celui des carburants liquides, mais il est très faible à l'état gazeux, il devra donc être augmenté par compression ou liquéfaction afin d'obtenir une autonomie suffisante du véhicule. Des expériences ont été menées bien avec le gaz naturel liquéfié (GNL) qu'avec le gaz naturel pour véhicules (GNV). En ce qui concerne le GNL, la température d'ébullition du méthane, voisine de -161°C, impose la conception de réservoirs cryogéniques munis de soupapes de sécurité destinées à éviter toute augmentation de pression due au réchauffement.

Pour obtenir un compromis intéressant entre l'autonomie du véhicule et l'encombrement des réservoirs, on opère à des pressions généralement entre 150 et 250

bar. Il est important de noter que le contenu énergétique d'un litre de GNV sous 220 bar et 21°C sera encore 3.5 fois plus faible que celui d'un litre d'essence.

En ce qui concerne la limite inférieure d'inflammabilité et l'énergie d'allumage, elles sont les plus élevées que celles du GPL et de l'essence ; le méthane possède aussi une excellente résistance à l'auto inflammation, il supporte des taux de compression de l'ordre de 13-14 et pour comparer les gaz naturels on introduit la notion de l'indice de méthane qui caractérise le comportement de ces derniers vis-à-vis la détonation.

### Caractéristiques des combustibles gazeux: [8]

#### Indice de méthane

L'indice de méthane, qui demeure d'actualité sur les moteurs industriels, identifie la sensibilité du carburant gaz au cliquetis, par analogie de l'indice d'octane pour les carburants liquides. Il est déterminé par équivalence à un mélange de méthane et d'hydrogène ayant le même comportement au niveau de la détonation que l'échantillon à étudier. L'échelle de mesure est bornée par l'indice 0 pour l'hydrogène pur et l'indice 100 pour le méthane pur et les indices ROM (Research Octane Number) qui est l'indice d'octane et MON (Motor Octane Number) évalués par extrapolation, sont respectivement de l'ordre de 130 à 115.

Le tableau I.5 donne l'indice de méthane pour quelques gaz.

**Tableau I.3 composition de quelques gaz naturels.**

Composition (% vol)	LACQ (brut*)	MER DU NORD	GRONING UE (Pays-Bas)	ARZEW (Algérie)	URSS	GN SYNTHETIQUE
CO <sub>2</sub>	9.6	0.2	0.9	-	0.4	2.0
CO	-	-	-	-	-	0.1
H <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	0.7
N <sub>2</sub>	-	1.5	14.0	0.3	0.6	-
CH <sub>4</sub>	69.6	94.4	81.8	86.5	95.0	95.2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.1	3.0	2.7	9.4	2.6	-
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.1	0.5	0.4	2.6	0.7	2.0

C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.6	0.2	0.1	1.1	0.4	-
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-	0.1	.01	0.1	0.1	-
> C <sub>5</sub>	0.7	0.1	-	-	0.2	-

- Le gaz Lacq contient également 15.3 % de H<sub>2</sub>S

**Tableau I.4. Caractéristiques physico-chimiques du méthane.**

Densité par rapport à l'air	0.55
Point d'ébullition (°C)	-161
Energie d'allumage (mJ)	0.29

**Tableau I.5 indice de méthane d'hydrocarbures gazeux ou de gaz naturels**

Composant	Formule chimique	Indice de méthane
Méthane	CH <sub>4</sub>	100
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	44
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	34
n-butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	10
Ethylène	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	15
Propylène	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	19
Hydrogène	H <sub>2</sub>	0
Butane commercial	-	15
Gaz d'Algérie	-	65
Gaz du Russie	-	82,5
Gaz d'Autriche	-	90
Gaz de raffinerie	-	23-35

**Pouvoir calorifique :-**

On observe que le **pouvoir calorifique** présente une forte dispersion, selon la composition du gaz, en fonction de sa provenance. Il est défini comme étant l'énergie dégagée par une combustion complète d'une quantité donnée de carburant ; on parle du

PCI si l'eau dégagée est à l'état vapeur, dans le cas où la condensation de l'eau serait prise en compte, le pouvoir calorifique est dit supérieur (PCS).

$$P_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n P_c(Kcal/mole)_i X_i}{\sum_{i=1}^n (V_{mi} X_i)}$$

$P_{cg}$  = pouvoir calorifique du gaz naturel GN

$P_{ci}$  = pouvoir calorifique du corps " i " présent dans le mélange

$X_i$  = fraction molaire du corps " i "

$V_{mi}$  = volume molaire du corps " i "

### Pouvoir comburivore et rapport air-fuel stœchiométrique

le pouvoir comburivore, noté  $V_a$ , représente le volume d'air nécessaire pour obtenir une combustion complète d'un volume de gaz noté dans les mêmes conditions thermodynamiques :

$$V_a = \left[ \frac{V(m^3)_{air}}{V(m^3)_{gaz}} \right]_{\text{Stœchiométrie}}$$

L'équivalent massique du pouvoir comburivore est le rapport massique air-fuel stœchiométrique noté S, qui représente également le rapport stœchiométrique air carburant, en masse :

$$S = \left[ \frac{\text{Masse air}}{\text{Masse carburant}} \right]_{\text{Stœchiométrie}}$$

La relation entre les deux caractéristiques est la suivante :

$$S = \frac{\rho_{(n)air}}{\rho_{(n)gaz}} \times V_a \quad \text{avec } \rho_{(n)} \text{ masse volumique dans les conditions normales.}$$

### Indice de Wobbe

La variabilité associée du rapport air-carburant impose au motoriste de disposer d'un système évolué de régulation et de contrôle d'alimentation de moteur. L'**indice de wobbe** W consiste pour cela un indicateur précieux afin d'évaluer la correction de débit à prévoir pour conserver un dosage constant. On montre aisément que le **rapport stœchiométrique** S est une fonction croissante de l'indice de wobbe :

$$S(W) = cte.W$$

$$S = W \frac{1}{c \sqrt{d}}$$

$d$  et  $c$  sont respectivement la densité du gaz et une constante qui dépend du gaz.

$W$  s'exprime selon la relation (1) où PCS et  $d$  représente respectivement le pouvoir calorifique supérieur en MJ/m<sup>3</sup> et la densité du gaz par rapport à l'air :

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d}}$$

### Facteur d'air et richesse :

Le **facteur d'air** ou **taux d'aération**, noté  $n$  (sans unité), représente le rapport entre le volume d'air réellement consommé dans une combustion et le volume d'air qui serait consommé dans les conditions stœchiométriques :

$$n = \left[ \frac{V(m^3) \text{ air réel}}{V(m^3) \text{ air stoechio}} \right]$$

La **richesse** est définie par le rapport entre  $RASFT$  et le rapport entre la masse d'air réellement consommée pour la combustion d'une masse unité de carburant :

$$richesse = \frac{[S]}{\left[ \frac{\text{Masse air}}{\text{Masse carburant}} \right] \text{ conditions r éelles}}$$

Le **rapport air/gaz**, noté  $R$  (sans unité), est défini par le rapport entre le volume d'air réellement consommé par la combustion d'un volume unité de gaz :

$$n = \left[ \frac{V(m^3) \text{ air réel}}{V(m^3) \text{ gaz}} \right]$$

La relation entre facteur d'air et richesse est donc la suivante :

$$richesse = \frac{V_A}{R} = n \left[ \frac{V(m^3) \text{ gaz réel}}{V(m^3) \text{ gaz stoechio}} \right]$$

Le tableau **I.6** rassemble les caractéristiques usuelles des carburants gazeux utilisés dans les moteurs.

**Tableau I.6 caractéristiques usuelles des carburants gazeux utilisable dans les moteurs**

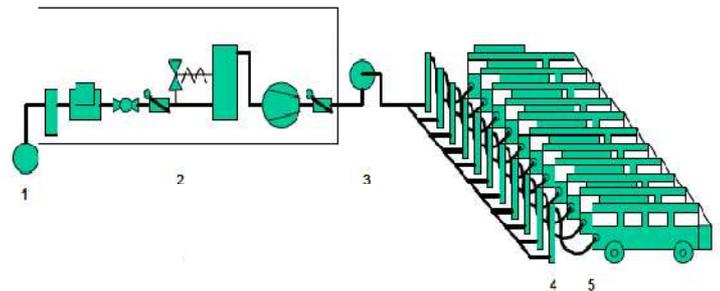
	Produits	Masse volumique ( $p_0=1.013 \text{ bar}$ $T_0=288\text{k}$ )	Pouvoir calorifique (MJ/ m <sup>3</sup> )		Air théorique	Indice de Wobbe	Indice de méthane	Indice d'octane	Température d'auto-inflammation	Limite d'inflammabilité		Vitesse de combustion
		(kg/m <sup>3</sup> )	Sup	Inf	(m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	(MJ/ m <sup>3</sup> )	-	-	(°C)	Inf (%)	Sup (%)	(Cm/s)
Gaz naturel	Groningue	0.83	35.2	31.7	8.4	44	68	120	580	6	15.7	20 à 35
	Lacq	0.74	40.6	36.5	9.7	53.8	88	125	580	5.1	14	20 à 35
	URSS	0.78	40.4	26.4	9.7	52.14	87	120	580	5	15	20 à 35
	Skikda	0.79	40.7	36.8	9.7	52.11	77	110	580	5.2	4.2	20 à 35
	Ekofisk	0.86	44.4	40.1	10.6	54.6	67	100	580	4.8	13.7	20 à 35
Gaz de synthèse	Propane commercial	1.98	99	91.4	23.5	80	40	95	480	2.4	9.3	30 à 40
	Butane commercial	2.6	128.4	118.7	30.7	90.8	28	88	420	1.8	88	-
	Gaz biologique	1 à 1.5	23.3-26	21-23.4	5 à 6.6	25 à 29	120	125	-	6	18	10 à 20
	Gaz de cokerie	0.56	19.9	17.7	4.3	30	-	-	-	4.6	32	20 à 50
	Gaz de gazogène	1.1 à 1.2	4.8-4.6	4.6-5.8	0.9 à 1.2	5-7	-	80	-	20	73	20 à 40
Constituants des gaz	Méthane	0.716	39.9	35.87	9.6	53.6	100	130	580	5	15	260
	Hydrogène	0.03	12.77	10.76	2.4	48.27	0	60	570	4	75	260
	Monoxyde de carbone	1.25	12.64	12.64	2.4	12.85	70	100	610	12.5	75	260

## Les stations de remplissages [9] :

Plusieurs technologies existant pour le remplissage des véhicules GNV, chacune est adaptée à une situation, nous distinguons :

### Remplissage lent :

Le principe est le suivant : un compresseur de gaz naturel directement relié à la source de gaz remplit lentement les réservoirs GNV à travers des flexibles. Une fois la pression finale est atteinte, le compresseur s'arrête automatiquement. En général, le temps de remplissage est de 6 à 8 heures. Ce système est destiné à une utilisation collective privée telle que les sociétés de transport public, de nettoyage de collecte d'ordures ...etc. car les véhicules sont à l'arrêt durant une partie de la nuit (bus, taxis, bennes à ordures, bateaux...etc.). Un exemple de station est le suivant : (figure I.6)



1 - Réseau du gaz

2 - station de compresseur

3 - stockage

4 - poteaux de distribution

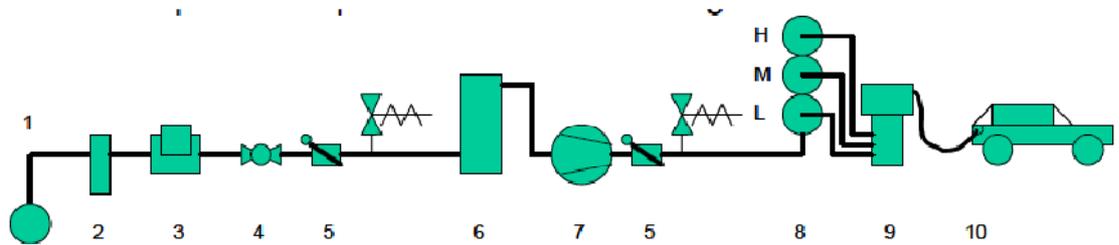
5 - bec de remplissage

Figure I.6 : Station de remplissage lent de GNV (dépôt de bus)

### Remplissage rapide :

Le principe est le suivant : un compresseur de gaz naturel comprime le gaz de 200 bars jusqu'à une pression maximale de 300 bars et remplit des réservoirs intermédiaires. Via une unité de remplissage, le gaz est ensuite acheminé en quelques minutes au réservoir du véhicule GNV comme dans une station service classique à essence (figure I.7). Les réservoirs intermédiaires sont rechargés immédiatement par le compresseur pour la prochaine utilisation. Le remplissage rapide réduit la capacité de stockage du réservoir du véhicule d'approximativement 20 % par rapport au remplissage lent sauf si le réservoir

est totalement vide. Les composants d'une station de remplissage rapide sont identiques à ceux à remplissage lent qui ne comportent pas de réservoirs intermédiaires et un système de comptage du gaz délivré. Ce système est destiné à une utilisation collective publique et permet de ravitailler les véhicules avec paiement effectif immédiat.



- |                        |                         |                  |
|------------------------|-------------------------|------------------|
| 1 -réseau du gaz       | 2 -filtres de gaz       | 3 -manomètres    |
| 4 -valves principales  | 5 -clapets anti-retour  | 6 -dessiccateurs |
| 7 –compresseurs        | 8 -stockage 250-300 bar | 9 -distributeurs |
| 10 -bec de remplissage |                         |                  |

**Figure I.7 : Station de remplissage rapide de GNV (publique)**

#### **Station de remplissage individuel :**

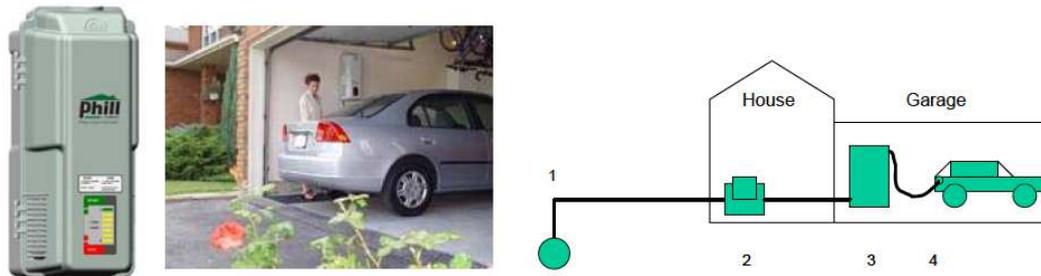
L'un des avantages du GNV est la permission d'avoir des stations domestiques installées aux habitations. Pour cela, l'emploi de petits compresseurs individuels à remplissage lent « Appareil de remplissage domestique » constitue une solution adaptée. Ce système (figure I.8)

- Contient un compresseur de gaz naturel, prolongé par au maximum 2 flexibles de distribution ;
  - ne contient pas de stockage de GNV ;
  - est installé dans le domaine résidentiel en maison individuelle, ou bien, dans le secteur non résidentiel quand l'appareil n'est pas installé à l'intérieur d'un immeuble collectif ;
- Les performances du système se limitent aux :

Débit max: 10 m<sup>3</sup> /h

Pression maximale de sortie du gaz : 26 MPa

Capacité maximale interne de gaz : 0,5 m<sup>3</sup>



- 1 -réseau du gaz      2 -manomètre  
 3 -distributeur      4 -bec de remplissage

**Figure 1.8 : exemple d'une station de remplissage individuel**

## Récapitulation : Avantages et inconvénients de l'utilisation du GNV

**L'utilisation du GNV présente plusieurs avantages :**

- Son faible contenu en carbone permet des réductions d'émissions de gaz à effet de serre ;
- il ne nécessite pas de procédés de conversion onéreux;
- il présente un indice d'octane équivalent élevé de l'ordre de 130 ;
- tout comme pour le GPL, il permet d'atteindre de bons rendements énergétiques pour un véhicule dédié;
- du fait que le gaz naturel est un composé quasiment pur, son usage permet des émissions moindres de polluants et son usage présente ainsi des avantages environnementaux certains, en particulier en site urbain (CO, HC, NO<sub>x</sub>, particules, bruit) ;
- Contrairement à de nombreux carburants alternatifs, le surcoût total de la filière GNV est très faible ;
- Une dilution rapide : le GNV plus léger que l'air se dissipe rapidement en cas de fuite sans former de nappe explosive ou de flaque inflammable, contrairement aux autres carburants ;
- Acheminé principalement par des réseaux souterrains : supprimant ainsi les nuisances liées au transport du carburant par la route ;
- Ne gèle qu'au dessous de -165°C : ce qui le rend insensible aux caprices de la météo.

**En parallèle, l'utilisation du GNV présente des inconvénients :**

- Manque de stations de remplissage GNV (dans le monde et également en Algérie);
- problèmes du stockage et d'approvisionnement;
- problèmes de poids et d'encombrement (le problème de poids vient d'être résolu pas introduction des réservoirs en matériaux composites légers) ;
- Légère perte de puissance (un problème purement technologique qui fait l'objet de plusieurs études) ;
- problème d'autonomie; pour 4 réservoirs de 40 litres chacun remplis à 200 bars, on peut atteindre sur quelques véhicules une autonomie de 400 km ;
- risque d'explosion dans les véhicules et les stations de remplissage, ceci est dû à la haute pression de stockage (de l'ordre de 200 bars) mais reste à noter que la fréquence des accidents est vraiment minimale ;

## **I.5 Moteur dual fuel**

Qu'est-ce qu'un moteur dual-fuel ?

C'est un moteur de type Diesel modifié, qui fonctionne en associant deux combustibles brûlants simultanément dans la chambre de combustion. Le combustible « primaire » est généralement un combustible gazeux difficile à enflammer qui comporte un grand contenu de gaz inertes, le GNV dans notre cas et pourquoi pas le biogaz. Le deuxième combustible (désigné par combustible « pilote ») est liquide ; son rôle est d'enflammer le mélange gazeux par injection directe dans le cylindre et ainsi d'assurer une combustion et un fonctionnement stable du moteur. Tout combustible avec un indice de cétane élevé est utilisable. Le gasoil est généralement retenu. Le combustible pilote est injecté sous haute pression et de petites gouttelettes distribuées dans toute la chambre de combustion se forment. De nombreux foyers existent alors et permettent de brûler le combustible primaire, le GNV (figure I.9).

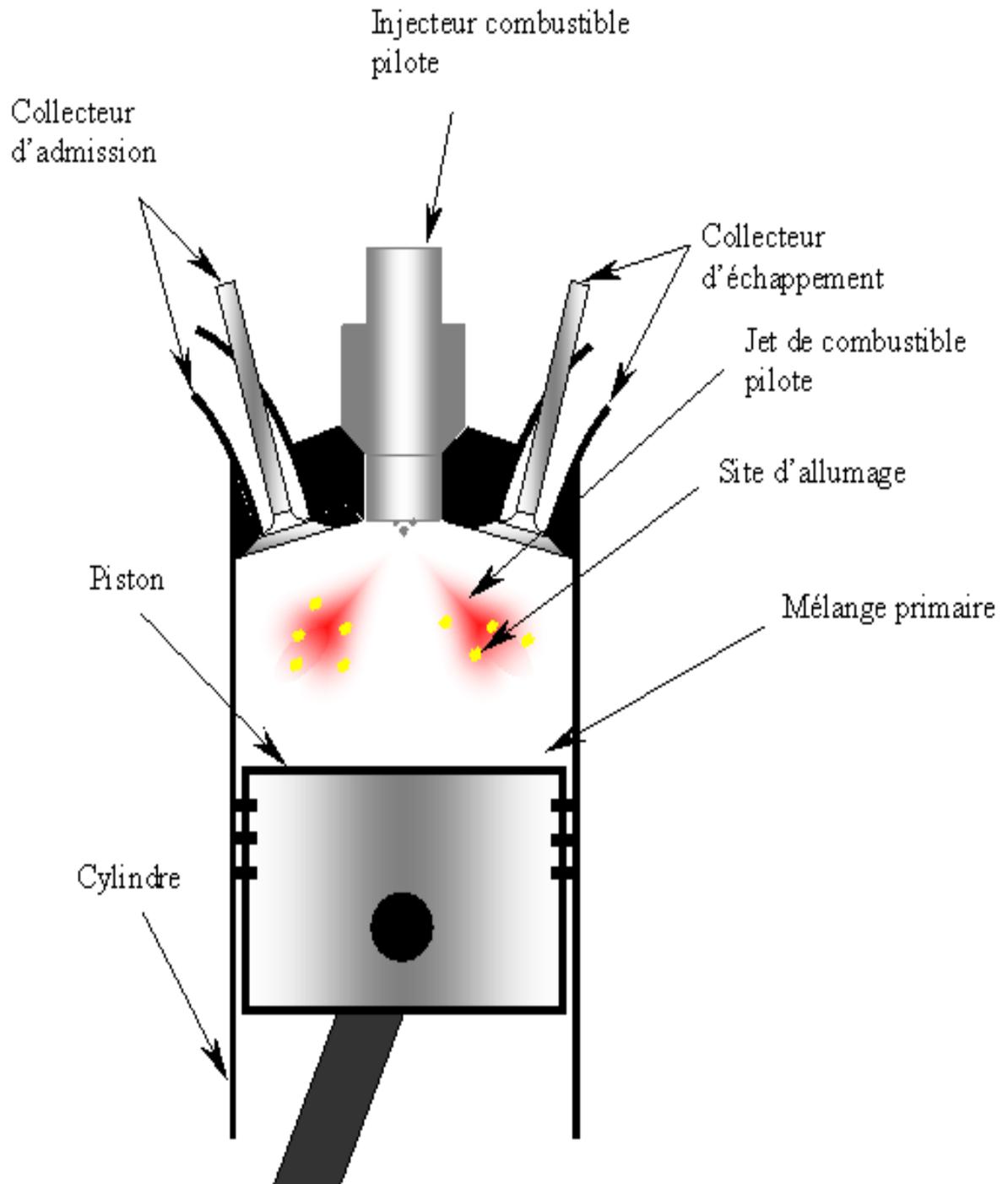


Figure. I.9 schéma de la combustion dans un moteurs dual-fuel

## Historique [10]

L'idée du moteur Diesel mixte au gaz existait déjà dans un brevet américain délivré en 1901 à Rudolf Diesel, le célèbre inventeur des moteurs auxquels son nom demeure lié (Brevet n° 673 de 30 avril 1901). Le procédé était le même utilisé à nos jours, mais Diesel ne fit jamais l'expérience. Le mérite en revint à l'anglais R. Joues de la "National Gas and Oil Engine Co.". C'est lui qui, beaucoup plus tard, en 1940, démontra qu'il était possible de faire supporter les hauts rapports de compressions du cycle Diesel à des mélanges pauvres air/gaz naturel. Avant lui, on pensait que les rapports de compression ne pouvaient dépasser 8,7 à 9.

Dans les premières expériences, on s'aperçut qu'il était très avantageux d'introduire dans les mélanges air/gaz de petites quantités de gasoil, cela rendait les combustions beaucoup plus régulières.

Aux Etats-Unis, au cours des premières expériences, on a même effectué l'injection du gaz à haute pression. En définitive, on s'est arrêté au système présenté dans cette étude. A partir de 1945, les moteurs Diesel mixtes suralimentés à 4 temps et les moteurs Diesel à deux temps furent adoptés aux USA. Actuellement, tous les principaux constructeurs américains sont en mesure de fournir des moteurs Diesel mixtes gasoil /gaz naturel.

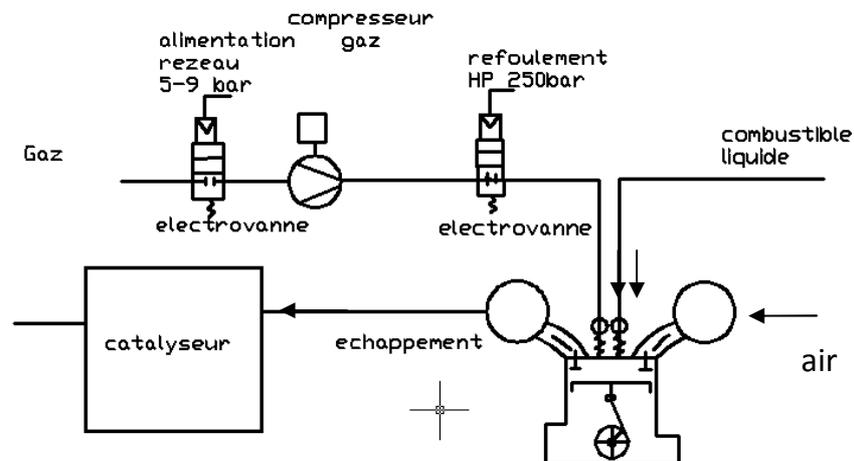
## Description technique [11]

L'alimentation en gaz des MDF (moteurs dual fuel) peut être utilisée soit sous haute pression (250 à 400 bar), soit sous basse pression (de l'ordre de 5 bar).

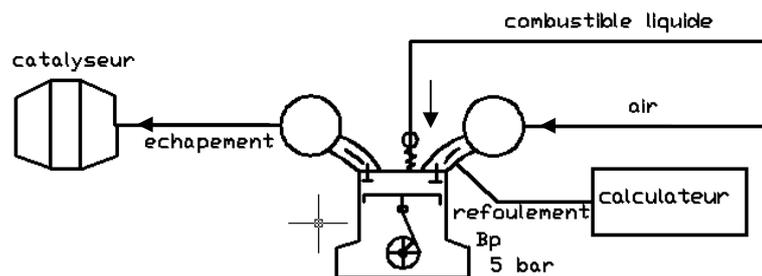
Dans le cas d'une alimentation **haute pression** (figure I.10), l'introduction du combustible gazeux est faite directement dans la chambre de combustion par l'intermédiaire d'un injecteur à trou analogue à celui utilisé pour l'introduction d'un combustible liquide. Elle est faite en fin de compression au voisinage de point mort haut (PMH) et conduit à une combustion semblable à celle d'un combustible liquide.

Ce type de MDF n'est pas intéressant du point de vue conversion d'un moteur diesel à un MDF, car la transformation consiste en une modification importante dans le système d'injection. Nous nous intéressons plutôt au cas de l'alimentation sous basse pression (figure I.11). La solution mise en jeu pour l'introduction du combustible gazeux et du

mélange air-combustible dépend de la nature du gaz disponible. Dans tous les cas, le combustible gazeux et l'air comburant sont mélangés avant l'initiation de la combustion.



**Figure I.10 : synoptique d'alimentation en gaz haute pression d'un moteur industriel diesel gaz**



**Figure I.11 : synoptique d'alimentation en gaz basse pression d'un moteur industriel diesel gaz.**

Si le carburant est un gaz pauvre (Low Calorific Value), le volume de gaz carburant est peu différent que celui de l'air comburant. La solution retenue est celle d'un mélangeur ou d'un carburateur, généralement à la pression atmosphérique. Dans le cas des gaz naturels, propane ou butane, le volume du gaz à introduire est de l'ordre de 5 à 10 % de celui de l'air comburant. La solution retenue est celle de l'introduction directe dans la chambre de combustion à l'aide d'une soupape, généralement commandée hydrauliquement, ou celle de l'introduction en amont des soupapes dans le conduit d'admission.

Cette solution d'alimentation en gaz sous basse pression n'est utilisée que dans les moteurs quatre temps. Elle présente l'avantage de permettre un mélange avant la phase de combustion et donc la réalisation d'un mélange homogène

### **Aspects environnementaux** [12]

Les émissions de particules sont spécifiques aux moteurs diesel et dual fuel. Ce sont des particules de suie formées au cours de la combustion incomplète du combustible. La richesse totale dans le cylindre est un facteur très important dans les moteurs à combustion interne, tant pour le fonctionnement que pour le niveau d'émissions.

Les émissions de  $\text{NO}_x$  dépendent fortement de la température des gaz dans le cylindre. Elles sont maximales pour une richesse légèrement inférieure à 1 (la température est maximale à cette richesse) et diminuent pour des mélanges pauvres ou riches. Quelle que soit la charge, le fonctionnement des moteurs dual-fuel se fait dans le domaine du mélange pauvre, car il faut introduire suffisamment d'air afin de brûler les deux combustibles : primaire et pilote. De ce fait, les températures maximales dans le cylindre sont relativement plus faibles dans les moteurs DF, donc les émissions de  $\text{NO}_x$  sont faibles elles aussi.

A charge nominale, les émissions de CO et de HC sont très faibles dans les moteurs dual-fuel. Ceci peut être expliqué par :

- une richesse initiale du mélange gazeux très faible dans les moteurs dual-fuel.
- une source d'allumage très puissante dans les moteurs dual-fuel (inflammation par le combustible pilote, le gasoil). Par conséquent le risque d'avoir des défauts d'allumage diminue, donc les émissions de HC diminuent elles aussi.

Dans les moteurs dual fuel fonctionnant au biogaz, les émissions de particules peuvent avoir deux sources principales : le soufre présent dans le biogaz (s'il en reste après le traitement ou si le traitement n'a pas été effectué) et le combustible pilote ; pour le GNV Algérie le problème de soufre ne se pose pas.

Les émissions des particules dans les MDF sont relativement élevées (la présence du combustible pilote). Il existe quand même un grand inconvénient : le fonctionnement à charges partielles qui génère un niveau élevé d'émissions de CO et de HC par rapport à la

charge nominale. La richesse du mélange gazeux aspiré diminue beaucoup, car le réglage de la puissance se fait à richesse variable. Par conséquent, les MDF doivent être utilisés le plus possible à pleine charge.

### **Actualité chez les grands constructeurs automobile:**

Quatre constructeurs de bus proposent des modèles fonctionnant au GNV: Irisbus, Evobus, Van Hool et Volvo. Dans le cas des bennes à ordures ménagères, les principaux constructeurs proposant une motorisation au gaz naturel sont Iveco, Mercedes et Renault Trucks/PVI. L'offre en véhicules particuliers au gaz naturel était jusqu'ici relativement limitée. Mais les principaux constructeurs automobiles commencent de plus en plus à proposer des modèles bicarburation essence/GNV, à l'instar de PSA Peugeot Citroën et de la C3 GNV, de Renault, de Fiat, ou des constructeurs Allemands (Volkswagen, Mercedes ou Opel). Par ailleurs, l'optimisation de l'utilisation du GNV (adéquation moteur/carburant et intégration du réservoir) devrait permettre le déploiement de ces véhicules.

## CHAPITRE II. CAS DE L'ALGERIE

### II.1 Le GAZ naturel en Algérie [13]

**En Algérie**, Les réserves récupérables, en ressources gazières sont estimées à 3500 milliards de m<sup>3</sup>; l'Algérie est le sixième pays mondial producteur de gaz naturel avec un réseau de distribution de gaz naturel de plus de 23 000 Km composé de canalisations haute pression (20 et 70 bar) et basse pression (4 bar) implantés dans les villes.

L'utilisation du GNV en Algérie a toujours été modeste, le Ministère d'Energie et des Mines (depuis les années 80) a lancé un programme national pour le développement du GNV avec la participation de trois entreprises du secteur, il s'agit de NAFTAL, SONATRACH et SONELGAZ :

Les premières expériences d'utilisation du GNV ont été lancées en Algérie, simultanément par NAFTAL et SONATRACH. Le programme d'expérimentation de NAFTAL, démarré en Avril 1989, a permis la transformation de deux bus, deux véhicules lourds, et un léger et l'acquisition de deux stations de compressions et leurs installations. Cette initiative a été définitivement arrêtée en septembre 1996. Entre temps et durant la même période NAFTAL s'est attelée à développer l'utilisation du GPL/C dont le coût d'investissement revenait beaucoup moins cher que le GNV sans compter le coût des kits de conversion GPL/C nettement inférieur à ceux du GNV.

Le développement du GNV par SONELGAZ entre 1999-2002 a permis les réalisations suivantes:

- Une station pour remplissage des autobus dans un dépôt de l'entreprise de transport urbain d'Alger (ETUSA);
- Une station service mixte (GNV, GPL/C) ouverte au public et la conversion d'une flotte de véhicules du parc SONELGAZ et l'acquisition de cinq bus fonctionnant au GNV par l'ETUSA.

Actuellement, un groupe de travail (NAFTAL, SONELGAZ, ETUSA et MATE (Ministère d'Aménagement du Territoire et de l'Environnement)) présidé par le MEM a élaboré un plan de développement (2007-2012) où il est prévu de:

- Convertir 14 000 véhicules légers ;
- Acquérir 175 bus dédiés au gaz naturel ;
- Raccorder et équiper 40 stations services pour la distribution du GNV.

Ces progrès vont donner un nouveau souffle à la recherche scientifique algérienne en ce qui concerne le GNV et le dual fuel et toute autre étude sur les moteurs écologiques et économiques.

## II.2 Parc automobile Algérien [14]

L'Algérie dispose d'un parc automobile assez important, 3 166 153 véhicules en 2006 dont 1 010 407 véhicules sont Diesel, 3.9 million en 2008 et d'après le CNIS<sup>1</sup> ce chiffre haussera de 20 % en 2010. L'amélioration des conditions de vie des Algérien et la présence sur le marché de concessionnaires (Avantages commerciaux alléchants: facilité de paiement, crédit bancaire,...) justifie la croissance enregistrée ces deux dernières année.

La figure II.1 montre l'évolution du parc automobile algérien entre les années 1990 et 2006.

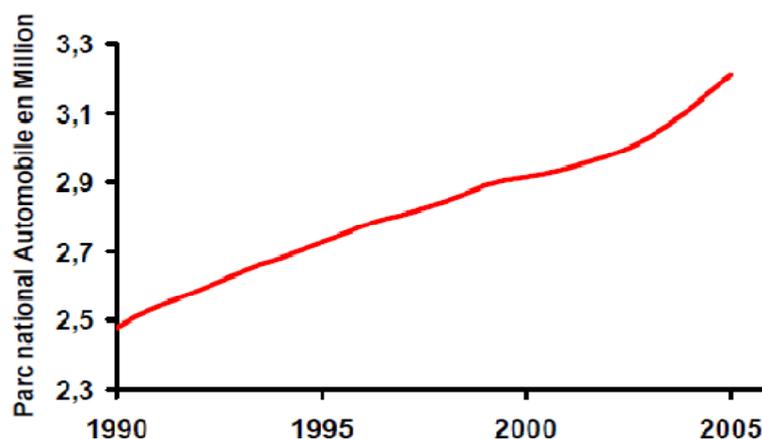


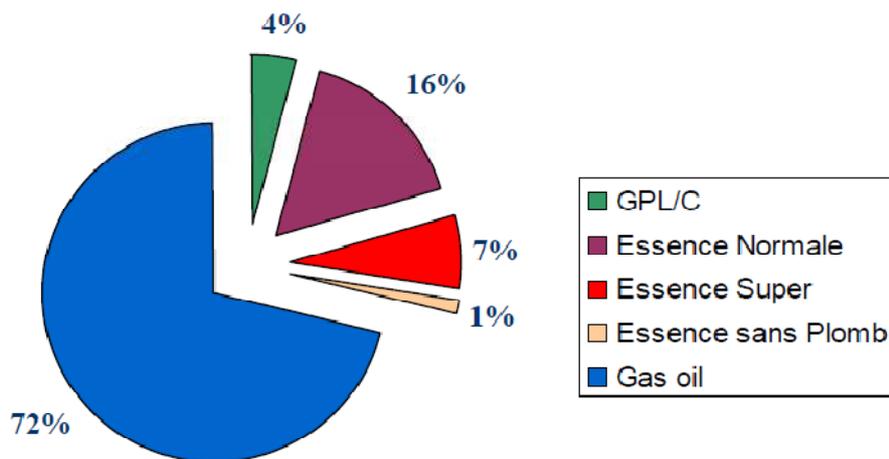
Figure II.1 : Evolution du parc automobile Algérien de 1990 à 2005 [14]

Aussi, la comparaison des consommations de carburants durant ces dix dernières années montre que l'évolution du parc automobile est en pleine croissance (Tableau II.1).

<sup>1</sup> CNIS : Centre national de l'information et de statistiques

**Tableau II.1 : Consommation des carburants durant les exercices de 1995 et 2005** [15]

	1995	1998	2005	
	Quantité (10 <sup>3</sup> Tonnes )		Q(10 <sup>3</sup> T)	%
<b>GPL/C</b>	43,5	133,0	310,0	4,1
<b>Essence Normale</b>	1 702,5	1 578,3	1 244,0	16,4
<b>Essence Super</b>	347,0	366,0	535,0	7,1
<b>Essence sans Plomb</b>	-	0,1	106,0	1,4
<b>Gasoil</b>	3 000,0	3 230,0	5 371,0	71,0
<b>Total</b>	5 093,0	5 307,4	7 566,0	100,0

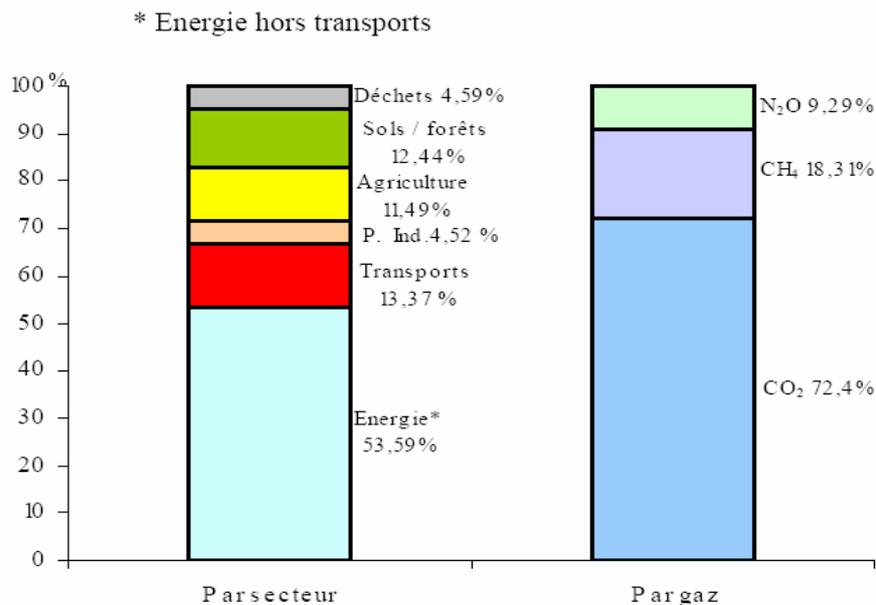
**Figure II.2 : Consommation des carburants durant les exercices de 1995 et 2005**

Le (tableau II.1) et la (figure II.2) montre que le carburant le plus polluant qui est le gasoil, occupe 72% de la consommation, cela veut dire que les véhicules lourds et de transport sont les plus polluants, d'où notre choix sur la conversion du moteur diesel f4l912.

### II.3 Emission des GES en Algérie

En 1994, les émissions de GES en Algérie ont atteint 104 794 360 TE-CO<sub>2</sub> (tonnes équivalent CO<sub>2</sub>). Bien que l'ensemble des états émettent des GES, les pays développés dont le développement s'est fait au détriment de la stabilité du climat sont les principaux émetteurs des GES. Par exemple, les émissions en Algérie, par habitant, sont 10 fois plus faibles que celles des Etats-Unis mais rapportées au nombre d'habitants, elles sont 60 fois plus faibles [15].

La répartition des émissions par secteur et par gaz est illustrée sur la figure II.3.



**Figure II.3 : Parts des émissions par secteur et par gaz, 1994** [15]

### Seuils limites des gaz toxiques émis par les véhicules automobiles :

En Algérie, les gaz toxiques émis par les véhicules automobiles sont strictement contrôlés et ne doivent pas excéder les seuils limités dictés par le gouvernement et publiés dans le journal officiel, il existe deux types de contrôle d'émissions : un contrôle de conformité (tableau II.2) et un contrôle technique périodique (tableau II.3).

**Tableau II.2 : Seuils limites des gaz toxiques émis par les véhicules automobiles lors du contrôle de conformité** [16]

CATEGORIE DE VEHICULES AUTOMOBILES	EMISSION MASSIQUE			
	CO	HC	NOX	Particules
Cyclomoteurs	6 g/KM	6 g/KM	.....	.....
Motocycles - I < 80 cm <sup>3</sup> et vitesse < 75 KM - 80 cm <sup>3</sup> < I < 400 CM <sup>3</sup> et vitesse ≥ 75 Km - I ≥ 400 cm <sup>3</sup> • Essence - GPL - GNC :	7 g/KM	1.5 g/KM	0.4 g/KM	.....

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Diesel :</b></li> </ul>	2 g/KM	1 g/KM	0.65 g/KM	1 g/KM
Véhicules particuliers <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Essence - GPL - GNC :</b></li> <li>• <b>Diesel :</b></li> </ul>	2.3 g/KM 1 g/KM	0.2 g/KM .....	0.15 g/KM 0.5 g/KM	..... 0.05 g/KM
Véhicules de transport en commun de personnes d'un PTAC $\leq 3,5$ tonnes <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Essence - GPL - GNC :</b></li> <li>• <b>Diesel :</b></li> </ul>	5.5 g/KM 1 g/KM	0.3 g/KM 1 g/KM	0.25 g/KM 0.9 g/KM	..... 0.15 g/KM
Véhicules de transport en commun de personnes d'un PTAC 3,5 tonnes <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Diesel :</b></li> <li>- P &lt; 150 KW</li> <li>- P <math>\geq</math> 150 KW</li> </ul>	4 g/KM	1 g/KM	7 g/KM	0.15 g/KM
Véhicules de transport de marchandises d'un PTAC $\leq 3,5$ tonnes <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Essence - GPL - GNC :</b></li> <li>• <b>Diesel :</b></li> </ul>	5.5 g/KM 1 g/KM	0.31 g/KM 1 g/KM	0.25 g/KM 0.9 g/KM	..... 0.15 g/KM
Véhicules de transport en commun de personnes d'un PTAC $\leq 3,5$ tonnes <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Diesel :</b></li> <li>- P &lt; 75 KW</li> <li>- 75 KW <math>\leq</math> P &lt; 150 KW</li> <li>- P <math>\geq</math> 150 KW</li> </ul>	4 g/KM	1 g/KM	7 g/KM	0.1 g/KM
Véhicules agricoles <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Diesel :</b></li> <li>- 37 KW &lt; P <math>\leq</math> 75 KW</li> <li>- 75 KW &lt; P <math>\leq</math> 130 KW</li> <li>- P <math>\geq</math> 130 KW</li> </ul>	6.5 g/KM 5 g/KM 5 g/KM	1.3 g/KM 1.3 g/KM 1.3 g/KM	9.2 g/KM 9.2 g/KM 9.2 g/KM	0.85 g/KM 0.70 g/KM 0.54 g/KM

Véhicules spéciaux et engins de travaux publics • Diesel :	6 g/KM	1.3 g/KM	9.2 g/KM	0.9 g/KM
---	--------	----------	----------	----------

I : cylindrée

**Tableau II.3 : Seuils limites des gaz toxiques émis par les véhicules automobiles lors du contrôle technique périodique [16]**

CATEGORIE DE VEHICULES	TENEUR EN CO (POURCENTAGE VOLUMIQUE)
Véhicules équipés d'un système de traitement des émissions (catalyseur)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,5% au ralenti</li> <li>• 0,3 % au ralenti accéléré avec une valeur de Lambda comprise entre <math>0,97 \leq \lambda \leq 1,03</math>.</li> </ul>
Véhicules non équipés d'un système de traitement des émissions	4,5%

$\lambda$  : Lambda – rapport air/carburant

Toutes les données présentées dans ce chapitre prouvent la nécessité de généraliser le gaz naturel carburant dans les véhicules de transport terrestre en premier lieu, et dans d'autres véhicules en second lieu. D'un autre côté, la disponibilité du gaz naturel encourage la conversion des moteurs Diesel en moteur fonctionnant au GNV avec mono ou bicarburation (dual fuel), reste les contraintes technologique à atténuer pour encourager réellement les futurs consommateurs du GNV.

## CHAPITRE III. ETUDE TECHNOLOGIQUE DE LA CONVERSION

### III.1 Présentation du moteur F4L912<sup>[17]</sup>

Le F4L912 (figure III.1) est un moteur de marque CIRTA Constantine sous la License de la compagnie DEUTZ. Ce dernier équipe les bus 25L4 et les camions K66 fabriqués par la SNVI Algérie, et vue l'importance du transport en commun en Algérie on s'intéressera aux minis bus pour la conversion en dual fuel.



**Figure III.1** Photo du moteur F4L912



**Figure III.2**  
**Pompe d'injection du F4L912**

#### Caractéristiques

- Cylindrée totale :  $V = 3.760 \text{ l}$
- Alésage /course : 100/120
- Rapport de compression volumétrique:  $\varepsilon = 17$
- Injection : mécanique directe, pompe d'injection en ligne (figure III.2)
- Refroidissement : à l'air

- Energie : Diesel
- Puissance max : 73 ch à 2800 trs/mn
- Couple max : 21.9 mdaN à 1500 trs/mn
- Aspiration : naturelle
- Capacité d'huile : 10 l
- Poids : 300 kg
- Dimension      Longueur : 725
- Largeur      : 665
- Hauteur      : 798

### III.2 Description de l'installation [18]

Notre but est de convertir le F4L912 diesel en dual fuel (bicarburation), pour cela on propose deux types d'alimentation en GNV : aspiration à basse pression (boucle ouverte ou fermée) et injection (séquentielle ou continue).

**Aspiration en boucle ouverte :** Il s'agit d'une alimentation à l'aide d'un mélangeur à pression d'aspiration du moteur, l'installation étant à boucle ouverte sans contrôle d'émissions et avec vis de réglage débit manuel (figure III.3) ; c'est la plus simple des installations.



**Figure III.3: Schéma simplifié d'une installation à aspiration en boucle ouverte**

**Aspiration en boucle fermée :** La différence entre cette installation et la précédente est le retour d'information avec un contrôle d'émission et un réglage débit gaz automatique à l'aide d'un moteur pas à pas contrôlé par le calculateur (figure III.4)



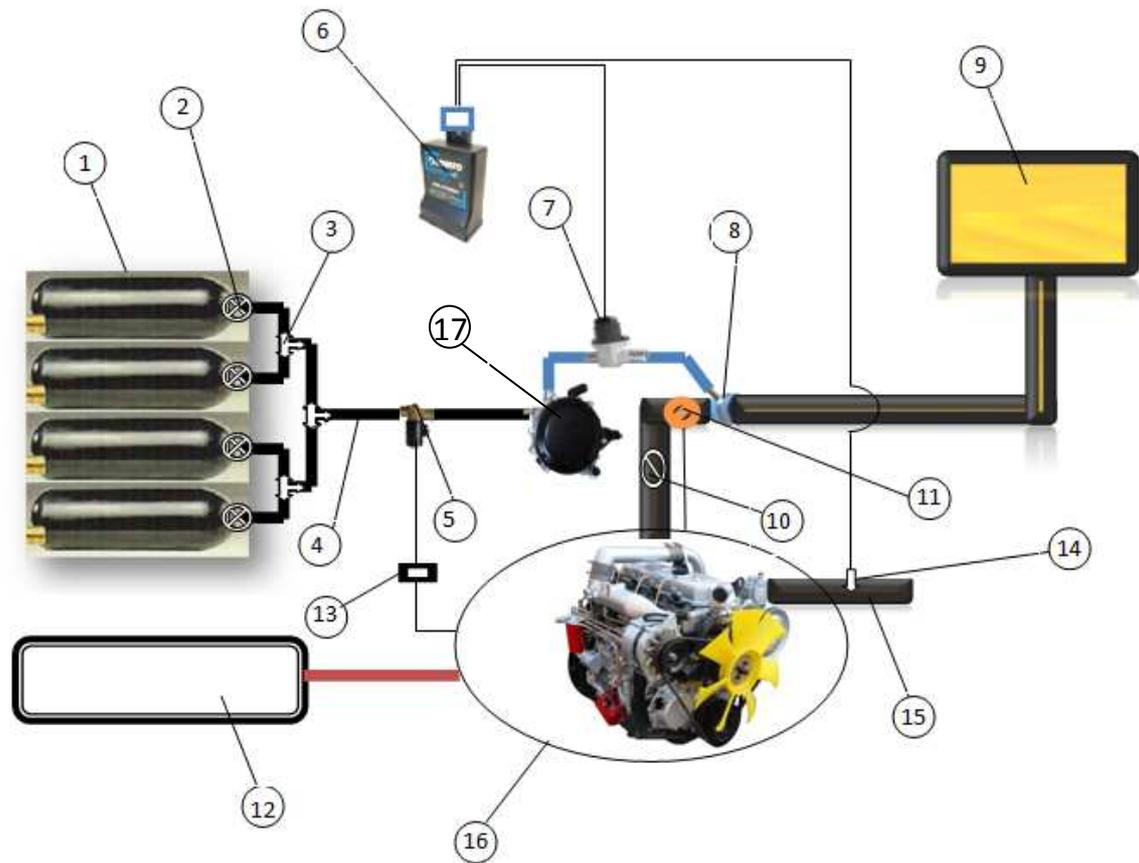
**Figure III.4: Schéma simplifié d'une installation à aspiration en boucle fermée**

**Injection séquentielle :** pour cette installation, le gaz est injecté à haute pression via la rampe d'injection, la quantité du gaz injecté est pilotée par un calculateur lié à plusieurs capteurs et à la sonde d'oxygène (figure II.5). L'injection est dite séquentielle selon l'ordre d'allumage, disons le 1.3.4.2 pour les moteurs à quatre cylindres.



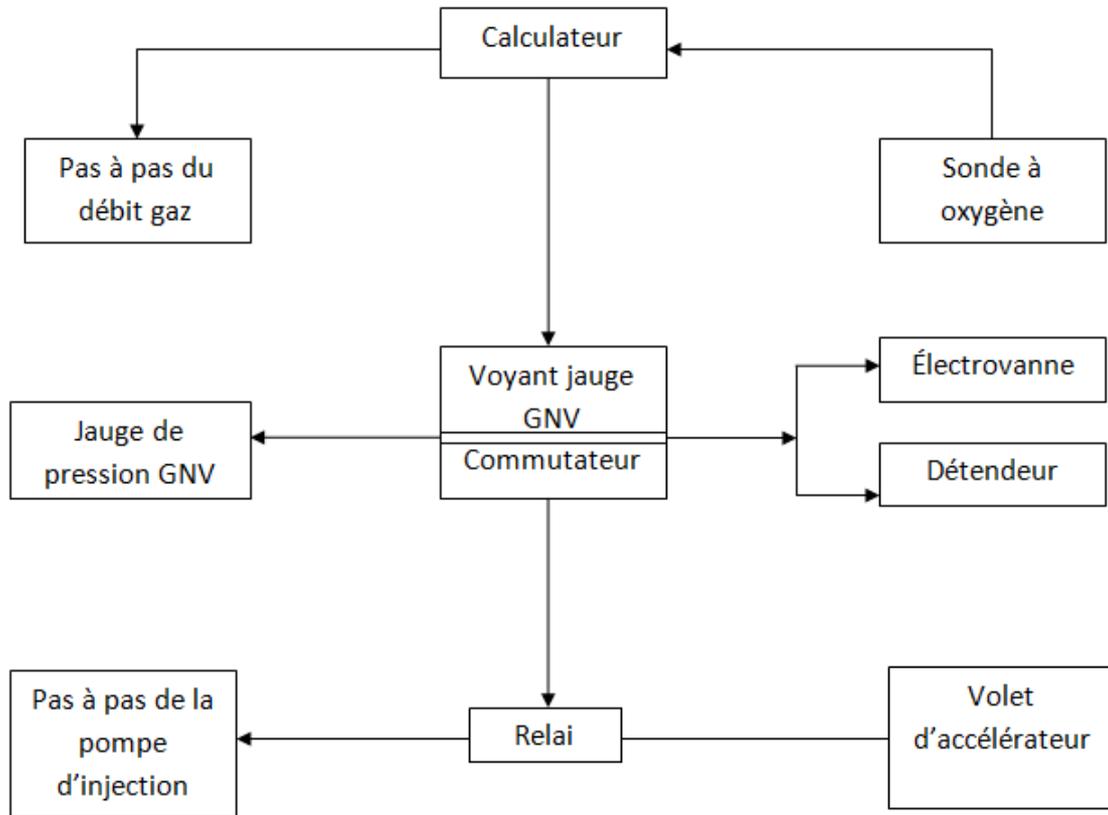
**Figure III.5 : Schéma simplifié d'une installation à injection séquentielle**

**Dans notre cas** on va considérer le deuxième système (aspiration en boucle fermée), et pour cela on propose le schéma de la figure ci-dessous (figure III.6)



- |                 |                       |                          |                                |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 1 réservoir GNV | 2 poly-vanne          | 3 T de branchement       | 4 tuyau GNV                    |
| 5 électrovanne  | 6 calculateur GNV     | 7 pas à pas du débit gaz | 8 mélangeur                    |
| 9 filtre à air  | 10 clapet anti-retour | 11 clapet d'accélération | 12 réservoir gasoil            |
| 13 commutateur  | 14 sonde d'oxygène    | 15 pipe d'échappement    | 16 moteur et pompe d'injection |
|                 | 17 détendeur          |                          |                                |

**Figure III.6 a : Schéma proposé de l'installation dual fuel sur le F4L912**



**Figure III.6 b : Organigramme du circuit électrique de l'installation dual fuel sur le F4L912**

NB : L'ensemble peut être accompagné d'un détecteur de choc qui sert à couper le gaz et le courant électrique lors d'une percussion.

### III.3 Description des équipements [16]

**Réservoirs cylindriques** : on disposera de 4 cylindres dont :

Longueur : 1170 mm

Diamètre intérieur : 222 mm

Diamètre extérieur : 229 mm

Volume : 40 l

Pression : 200 bars

À pression atmosphérique et à 15°C un réservoir peut contenir jusqu'à 9.35 m<sup>3</sup>.

Pour le matériau des réservoirs on se rapporte aux deux choix suivants :

Des bouteilles en acier allié au chrome-molybdène-manganèse de volumes 30, 40, 50, et 60 l (figure III.7). Celles de 40 litres admettent une pression de 200 bars et présentent un poids de 48 kg, on admet le poids de 50 kg pour notre étude.



**Figure III.7 Réservoirs en acier allié**

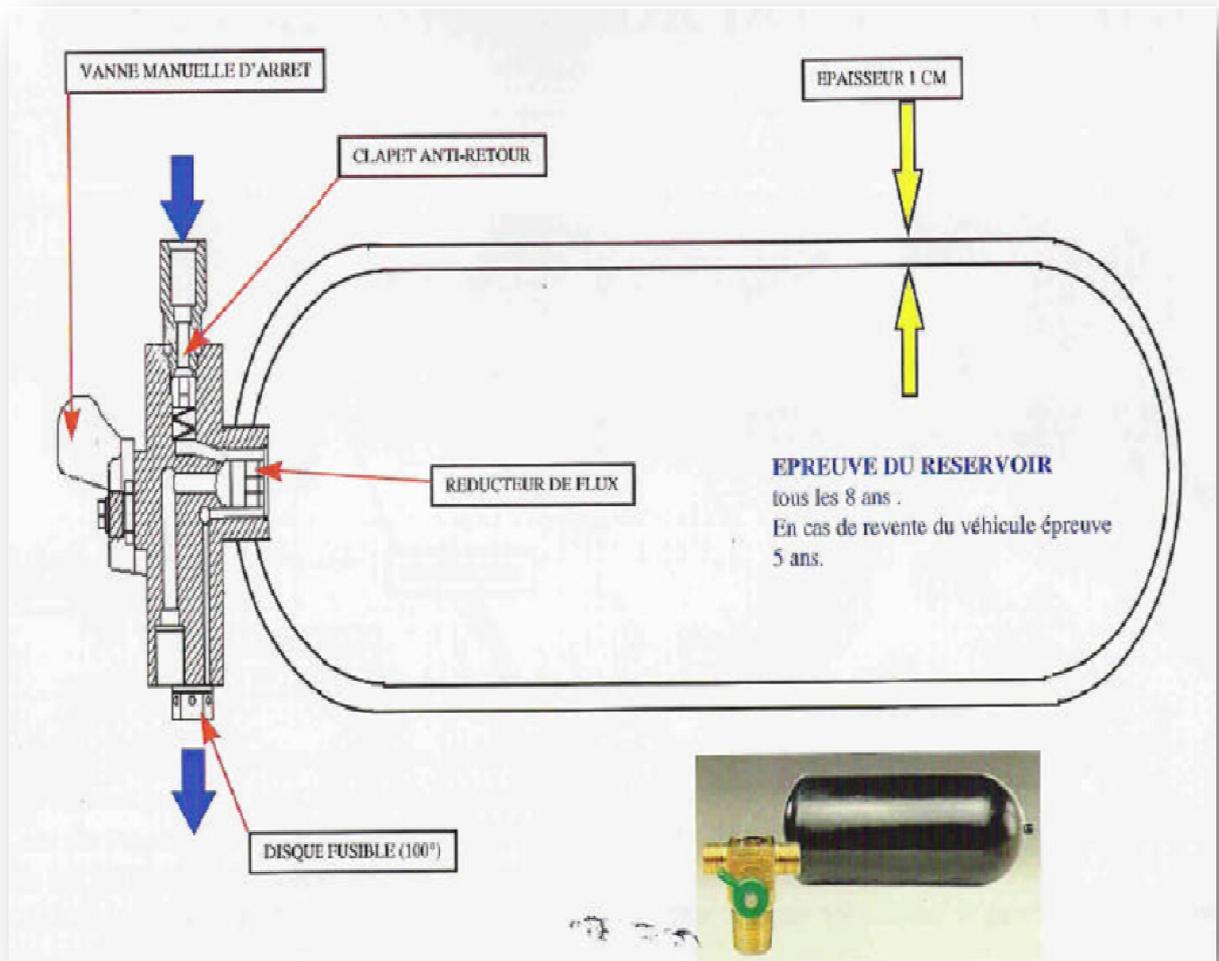
Des bouteilles en matériaux composites (figure III.8), brevetées mondialement destinées au stockage de gaz naturel comprimé 200 bars, à bord de véhicules routiers ou ferroviaires.



**Figure III.8 Réservoirs en matériaux composite ( réservoirs ULLIT)**

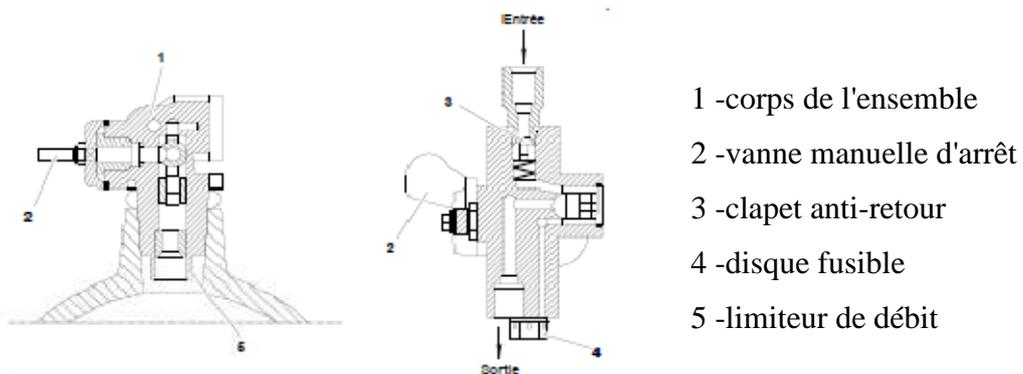
Les réservoirs ULLIT (figure III.8) subissent sans dommage, 100 000 remplissages à 250 bar et conservent ensuite, intégralement, les mêmes caractéristiques qu'un appareil neuf. De plus, les matériaux employés, enveloppe interne en thermoplastique et fibres de carbone avec matrice époxyde mettent les réservoirs ULLIT à l'abri de tout problème de corrosion interne ou externe.

On doit rappeler que les réservoirs fabriqués en acier ou en matériaux composites, sont conçus pour résister à une pression de 500 bars (soit 2.5 fois plus que la pression normale d'utilisation). Ils sont en outre équipés de limiteurs de flux, de clapets anti-retour et des fusibles thermiques qui, à une température de 100 degrés, fondent et déclenchent automatiquement des soupapes de sécurité qui libèrent lentement le gaz dans l'atmosphère sans danger (Voir figure III.9)



**Figure III.9 Schéma simplifié d'un réservoir destiné au GNV**

L'ensemble est réuni dans un dispositif appelé « poly-vanne » qui assure le remplissage du réservoir et l'alimentation du moteur en GNV. (Figure III.10)



**Figure III.10 : Schéma d'une poly-vanne de GNV**

En cas d'une rupture dans la tuyauterie ou l'ensemble, le limiteur de débit (5) intervient en limitant le débit de gaz à une valeur d'environ 0,5 % du débit de Fonctionnement normal.

Les réservoirs des bus sont implantés en toiture dans un compartiment totalement séparé de l'habitacle. Pour les autres véhicules, les réservoirs sont implantés en partie basse, et sont équipés de limiteurs de débit qui ferment automatiquement les réservoirs en cas de rupture de canalisation.

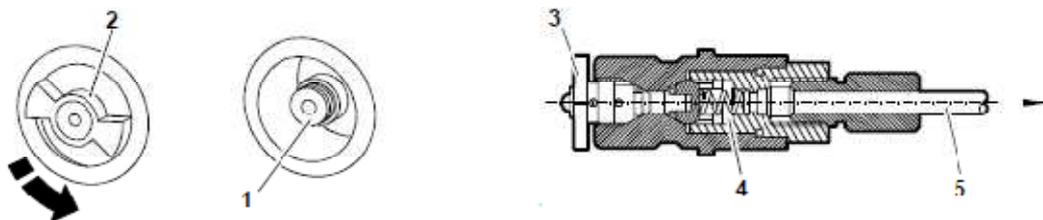
Les réservoirs résistent aux crash-tests et aux fortes agressions, assauts aux balles et aux grenades.

La réglementation est très exigeante vis-à-vis des fixations des réservoirs, afin qu'ils restent bien à leur place lors d'un choc accidentel. Le stockage du gaz dans les réservoirs se fait uniquement à l'état gazeux. Le BLEVE (Boiling Liquid Effect Vapour Explosion) ne peut pas se produire.

Les qualités intrinsèques du gaz, notamment sa température d'inflammabilité très élevée (580°), et sa légèreté qui favorise son évacuation et sa dispersion dans l'atmosphère, contribuent à rendre ces véhicules très sûrs.

### Orifice de remplissage du GNV

C'est la prise de charge du réservoir GNV, ce dernier doit assurer une bonne étanchéité ainsi le passage unidirectionnel du gaz à l'aide du clapet anti-retour (figure III.11)

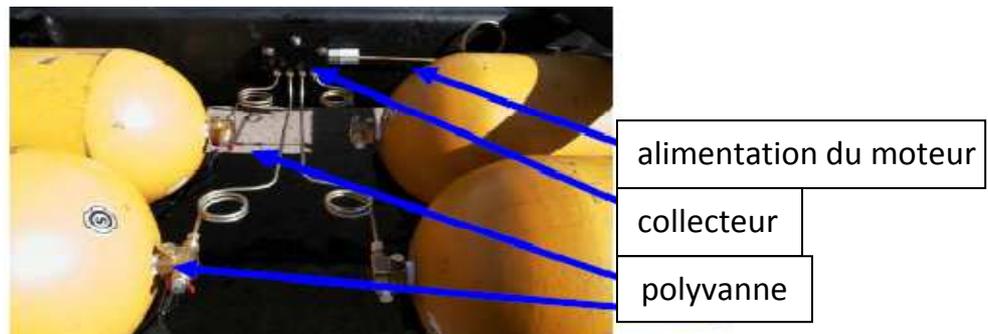


- |                           |                              |                                 |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1 -Orifice de remplissage | 2 - Bouchon                  | 3 -Corps extérieur de l'orifice |
| 4 -Clapet anti-retour     | 5 -Tuyauterie haute pression |                                 |

**Figure III.11 schéma détaillé d'un orifice de remplissage GNV**

### Tuyauteries GNV haute pression

Les tuyauteries sont en inox recouvertes de matière plastique. On doit prévoir des pertes de charge singulières supplémentaire dans le réseau du gaz, en effectuant des formes hélicoïdales dans notre installation, et cela, pour ralentir le gaz quittant les réservoirs à haute pression (figure III.12)



**Figure III.12 exemple d'une installation à ralentissement du gaz**

### La soupape de sécurité

La soupape de sécurité est désormais obligatoire sur tous les véhicules neufs et sur tous les autres véhicules pour le 31 décembre 2001. 80% du parc de véhicules anciens n'est, à ce jour, pas encore équipé de la soupape! (mai 2001). Elle doit être obligatoirement équipée de son opercule (c'est le témoin du déclenchement de cette soupape); (voire figure III.13)

### L'électrovanne de coupure

Doit être solidement fixée.

En position fermée, elle ne doit pas laisser passer de gaz. On trouve une à la sortie du réservoir et l'autre à l'entrée du détendeur. Elles assurent la fermeture du circuit à l'arrêt du moteur ou en cas d'anomalie de l'alimentation GNV. (figure III.13)



**Figure III. 13 LOVATO électrovanne pour GNV**

Fonctionnement : lorsque le bobinage est alimenté, le noyau plongeur se soulève et permet la sortie du produit. Si l'électrovanne est bloquée ou rompue, le limiteur entre en fonction, ne permettant qu'un débit de fuite minimum. De plus, si une augmentation de pression se crée dans la canalisation, l'électrovanne permet le retour dans le réservoir.

### **Clapet anti-retour**

Il empêche le retour du GNV du réservoir vers le tuyau de remplissage; il se trouve sur l'orifice de remplissage du réservoir.

Il peut aussi exister un autre type entre le mélangeur et la pipe d'admission pour empêcher les retours de flammes imprévus.

### **Détendeur-régulateur**

Les propriétés d'un détendeur-régulateur résident dans son aptitude à assurer un fonctionnement stable du moteur thermique en charge (agrément), une progressivité adaptée lors de transitoires (variations de charge), un enrichissement dans des configurations démarrage et ralenti moteur froid, ainsi qu'une importante capacité d'évaporation isotherme (à température constante). Il réclame une purge régulière afin d'éliminer les dépôts huileux. Son étanchéité au gaz ou à l'eau doit faire l'objet d'un contrôle régulier.

Ce dernier assure la détente du GNV ; cette étape de vaporisation (transformation endothermique) nécessite un apport de chaleur prélevé au milieu extérieur (air ambiant et liquide de refroidissement du moteur thermique, résistance électrique) ou comme dans notre cas le détendeur est purement mécanique à trois étages pour faciliter le démarrage à froid. La figure III.14 montre un détendeur GNV de type LOVATO à trois étages.



Figure III.14 LOVATO électrovanne pour GNV

### L'ensemble mélangeur-diffuseur et carburateur

On fixera l'ensemble entre le filtre à air et le collecteur d'admission selon la figure III.15

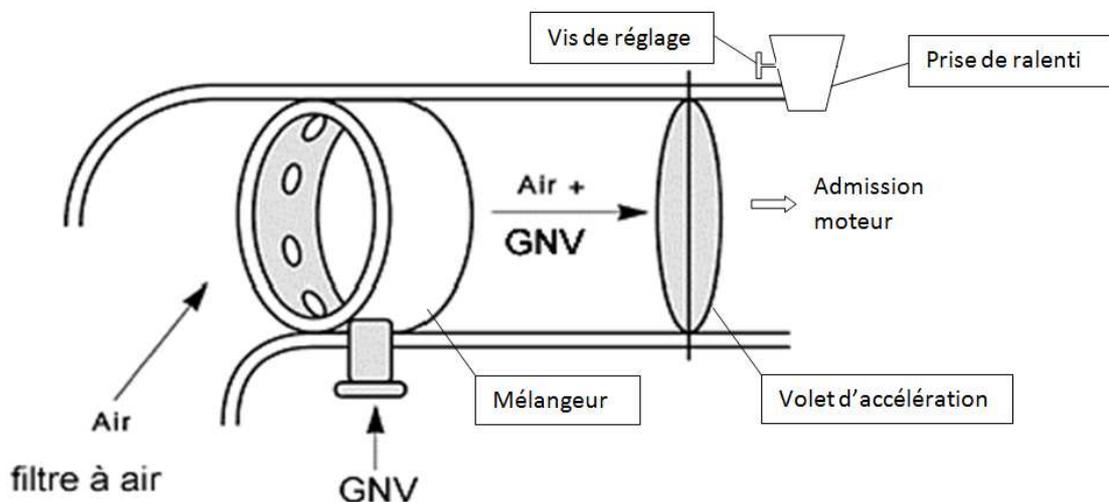


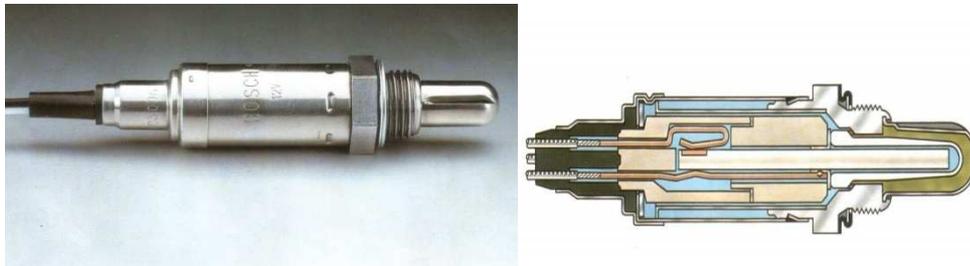
Figure III.15 Schéma d'un mélangeur, carburateur

Le mélangeur-diffuseur a pour fonction la distribution centralisée (monopoint) du gaz et l'homogénéisation du mélange air/gaz. Le volet d'accélération sert à varier le débit du mélange air/gaz, une fois le volet est fermé, le débit entrant au moteur vient de la prise de ralenti, il est commandé par la vis de réglage manuelle.

### Sonde d'oxygène

La consommation de carburant et l'émission de gaz polluants peut être drastiquement réduite en ajustant aussi précisément que possible le mélange air/carburant qui alimente le moteur. Afin de mesurer précisément ce dosage, un capteur d'oxygène est placé en sortie de moteur (figure III.16), avant le catalyseur. Ce capteur est relié au calculateur, et renseigne en permanence ce dernier sur la proportion de dioxygène ( $O_2$ ) à l'issue de la combustion. Si le mélange est pauvre, le dioxygène est en excès et vice versa.

En fonction de la richesse du mélange, le calculateur agit sur la quantité du gaz admise, par l'intermédiaire de la vis de richesse commandée par le moteur pas à pas ; la quantité du gasoil étant constante.



**Figure III.16** Sonde d'oxygène lambda gaz

### Détecteur de choc

Les véhicules fonctionnant au GNV sont équipés, réglementairement, d'un détecteur de choc. Ce détecteur entraîne dès son enclenchement, la fermeture de toutes les bouteilles de gaz et l'arrêt moteur. Une manipulation brutale du véhicule peut entraîner son enclenchement. Dans ce cas, réarmer en exerçant une pression sur le dessus du capteur de choc, dans notre cas le dispositif se placera dans le bac à batteries. Figure III.17



**Figure III.17** Détecteur de choc, emplacement dans le bac des batteries

## **PIII.4 Fonctionnement de l'ensemble**

### **Mode dual fuel :**

Le commutateur (13) étant en position gaz, l'électrovanne (5) est ouverte et la pompe d'injection gasoil est en position d'injection minimale (position ralenti). Le gaz libéré passe dans la canalisation en acier, ralenti par la géométrie spirale ou hélicoïdale de la tuyauterie avant de passer dans le détendeur (17); une fois le gaz est détendu, il sort du détendeur allant vers le mélangeur carburateur (8)(11) ensuite vers l'admission du moteur. L'allumage est comme prévu assuré par injection d'une faible quantité de gasoil.

La variation du débit mélange air/gaz est assuré par le volet du carburateur (11) lié directement à la pédale d'accélération, le dosage du gaz est assuré par le moteur pas à pas (7) commandé par le calculateur (6) qui analyse les gaz d'échappement par la sonde d'oxygène (14).

### **Mode diesel :**

En mode diesel, le commutateur (13) donne l'ordre de fermer l'électrovanne (5) et de lier le capteur du volet carburateur (11) à la pompe d'injection pour la commande de la vitesse du moteur. La pompe d'injection n'est plus commandée mécaniquement par la pédale d'accélération, mais par un moteur pas à pas lié au capteur position du volet carburateur (11) par l'intermédiaire d'un relai actionné par le commutateur (5).

Le mode diesel peut se déclencher automatiquement aussi, à l'aide du même commutateur si la pression du GNV dans les réservoirs n'étant pas suffisante pour alimenter le moteur en gaz, le commutateur étant directement lié à la jauge de pression gaz et possède aussi l'indicateur de la jauge.

### **Mode ralenti :**

Le fonctionnement en mode ralenti est le même dans les deux modes, il s'agit d'un fonctionnement purement diesel. Le carburateur étant muni d'un orifice "prise de ralenti" assurant l'introduction de l'air quand le volet d'accélération est en position "0" (fermé)

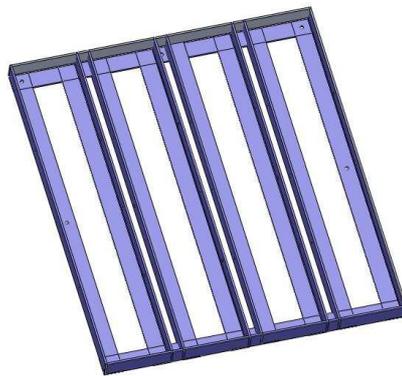
Comme on a vu, le fonctionnement n'a pas été compliqué, ça pourrait l'être si on avait substitué la quantité du gasoil injecté en mode dual fuel par une quantité inférieure

que celle injectée en mode ralenti. Cette situation est plus rentable, économique et écologique.

### III.4 Modifications apportées

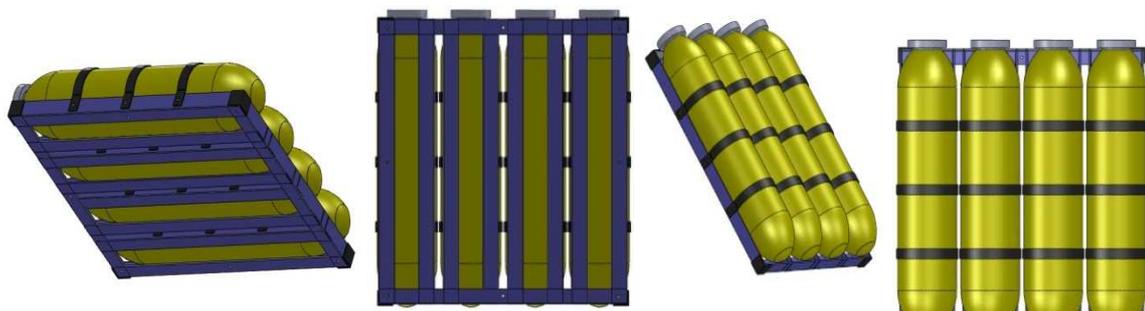
#### Bus carrosserie :

**Fixation des bouteilles de GNV :** elle s'effectue à l'aide d'un châssis métallique fabriqué avec des cornières en L de type "cornière 60X60X6 NF A 45-009", assemblées de la façon suivante (figure III.18).



**Figure III.18 Châssis métallique.**

L'assemblage peut être fixe (soudage, rivetage) ou démontable (vis-écrou), les bouteilles sont fixées à l'aide des ceintures métalliques recouvertes de plastique pour éviter le contact métal-métal, elles sont séparées aussi du châssis par des joints fixés le long des cornières (Voir figure III.19).



**Figure III.19. Fixation des bouteilles dans le châssis métallique.**

L'ensemble est fixé sur la toiture du bus à l'aide de 6 vis de diamètre 10 de type "NF EN ISO 4017".

Pour l'esthétique du bus et la protection des bouteilles on a proposé le carénage représenté dans la figure III.20. Ce dernier fabriqué en résine et renforcé par des barres métalliques de l'intérieur pour protéger les bouteilles contre les chocs. Pour les protéger des rayonnements de soleil, on fixe un toit en résine également au-dessus du carénage.



**Figure III.20. Fixation de l'ensemble bouteilles-carénage sur le bus 25L4.**

**Fixation des équipements GNV :** Dans l'avant du bus, derrière le capot, il y a suffisamment d'espace pour fixer l'ensemble des équipements (électrovanne, calculateur GNV, détendeur, détecteur de choc). Ces derniers sont fixés à la tôle par des vis à tôle autotaraudeuses de type " NF EN ISO 1479 ST 6.3 x 25 – F ”.

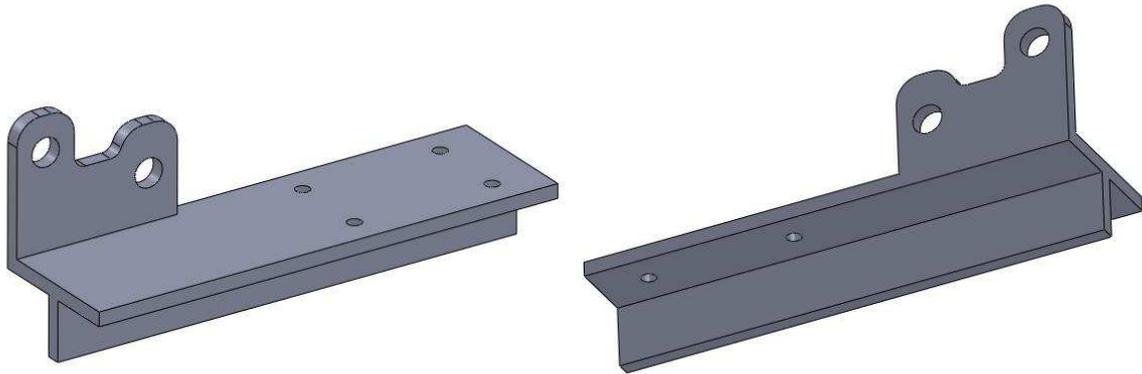
### **Moteur :**

**Fixation de l'ensemble mélangeur-carburateur :** l'ensemble est monté entre le filtre à air et la pipe d'admission. Le mélangeur est implanté à l'intérieur d'une conduite en plastique souple et relié à la conduite d'admission à l'aide de colliers d'étanchéité.

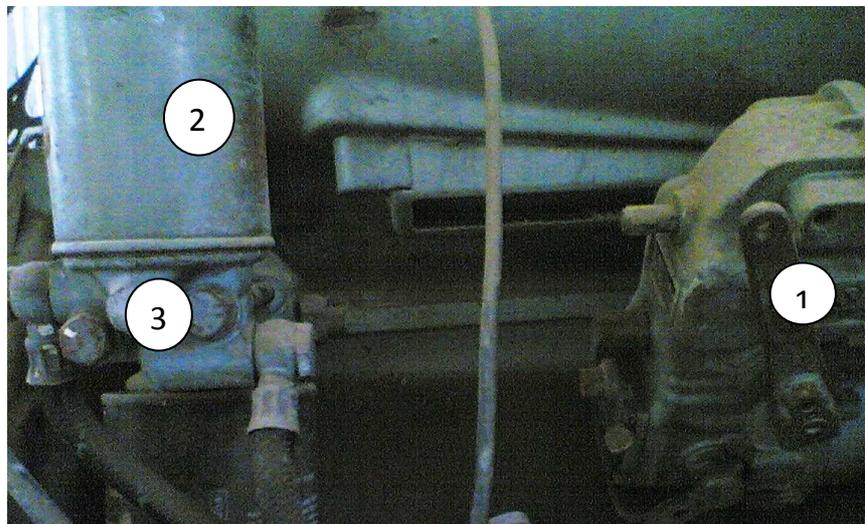
Le carburateur est monté directement sur le collecteur d'admission à l'aide d'une adaptation appropriée.

**Fixation de la sonde d'oxygène :** un taraudage est prévu sur le collecteur d'échappement afin de fixer la sonde. Les détails sont présentés dans les dessins techniques ci-joints.

**Fixation du moteur pas à pas d'accélération :** pour sa fixation, on doit fabriquer un support métallique, le support est fixé adjacent du support du filtre à l'huile dans le but d'éviter toute intervention sur le bloc moteur. Voir figure III.21.



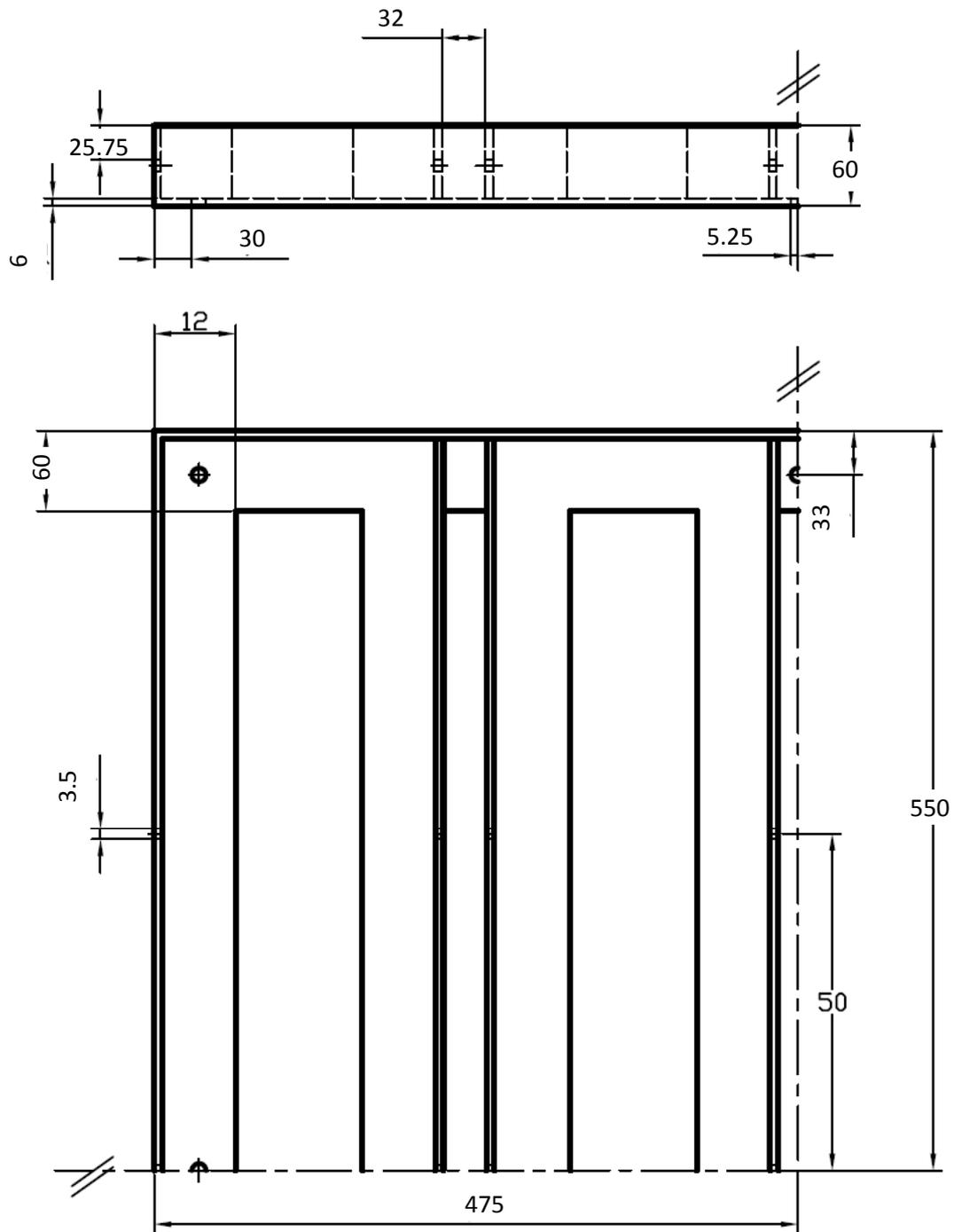
**Figure III.20.a Support du moteur pas à pas d'accélération**



**Figure III.20.b Emplacement du support pré du filtre à gasoil**

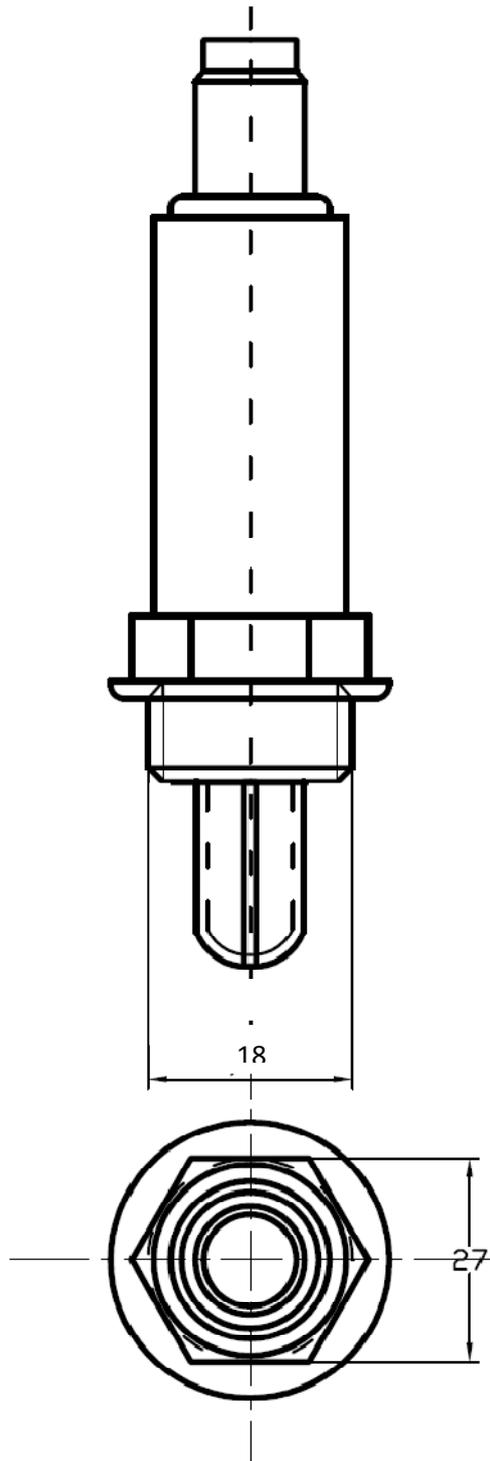
1. Levier d'accélération
2. Filtre de gasoil
3. Emplacement du support conçu

Pour éclaircir les modifications apportées sur l'ensemble bus-moteur on propose les dessins techniques ci-dessous.



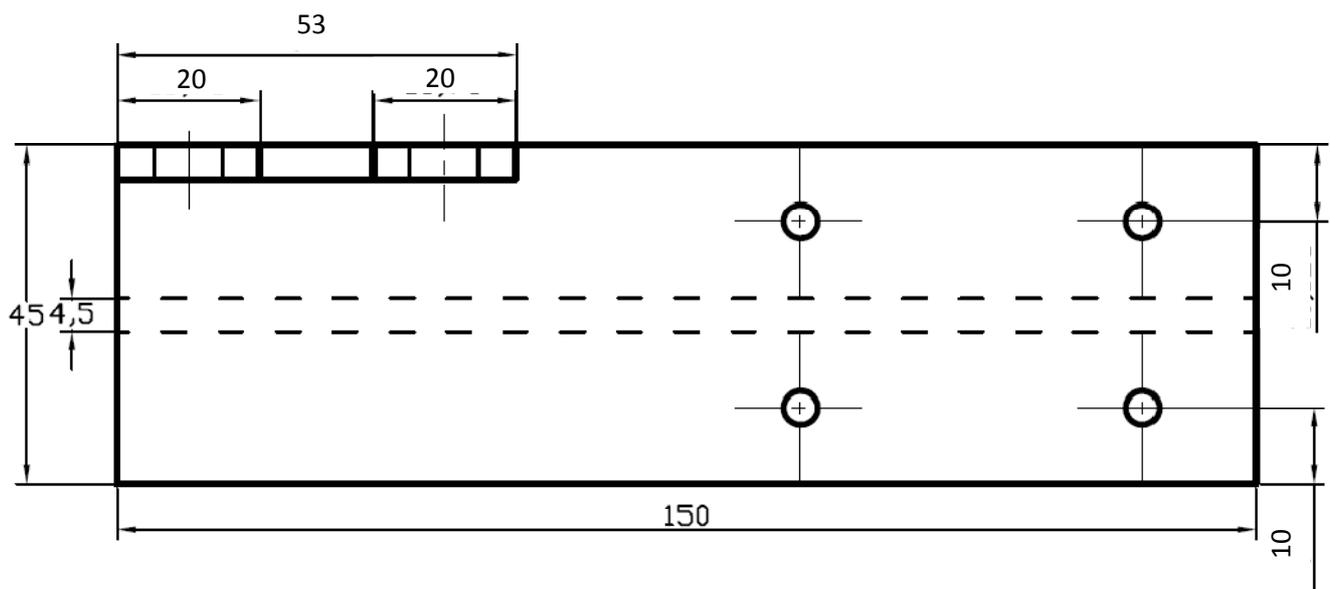
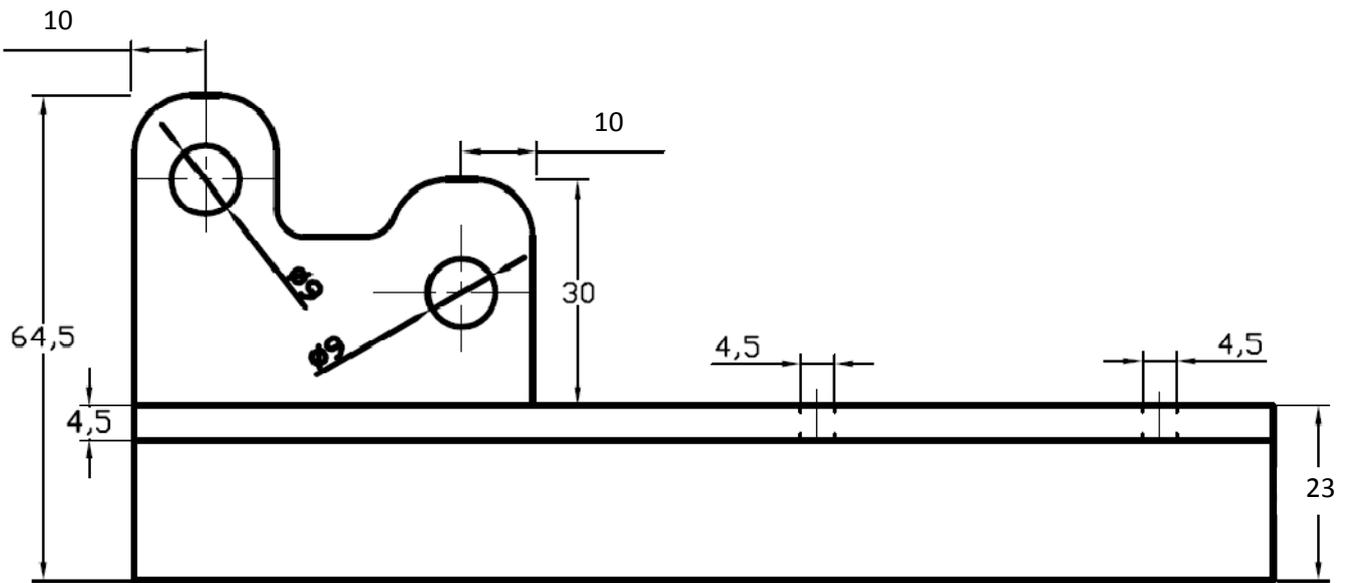
# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		châssis	ENP Dép.G.MECANIQUE
2:10				
Etudiant	Belhannachi	1/10	XC38	02
Promoteur	M.Benbraïka			



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		Sonde d'oxygène	ENP Dép.G.MECANIQUE
3:2				
Etudiant	Belhannachi	6/10		
Promoteur	M.Benbraika			
				02



# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		support	ENP Dép.G.MECANIQUE
1:1				
Etudiant	Belhannach	6/10	xc38	03
Promoteur	M.Benbraika			

## **CHAPITRE IV. ANALYSE ECONOMIQUE DU PROJET**

### **IV.1 Coûts Fixes**

La différence en coûts fixes entre le F4L912 Dual Fuel et le F4L912 Diesel est limitée à la conversion des moteurs Dual Fuel. Cela doit inclure toutes les pièces et main d'œuvre pour convertir le moteur diesel, et pour installer les réservoirs et la tuyauterie de GNV. Le coût est estimé à quatre vingt mille dinars (80000 DA).

### **IV.2 Coûts Variables**

La différence en coûts variables entre les bus Dual Fuel et les autobus Diesel doit inclure le carburant, l'entretien et la réparation.

Le coût pour maintenir les autobus DF va être moins pour les changements d'huile, parce que les intervalles de changement d'huile peuvent être prolongés approximativement 100% plus longtemps que pour l'autobus diesel ce qui donne un gain de 2000 DA au minimum tous les 15000 km. Pour une moyenne de 300 km par jour, le gain deviendra 2000 DA chaque 50 jour. Les autobus DF ont un coût supplémentaire dans l'entretien de l'installation du GNV. Tous autres coûts d'entretien sont estimés pour être les mêmes.

Les coûts de carburant sont relativement bas pour les autobus DF, ils sont plus bas pour les véhicules légers. Les coûts de carburant sont des fonctions du prix du carburant et de l'efficacité du moteur (c.-à-d., km/LED<sup>2</sup>). Le prix du carburant diesel est autour de 13.70 DA/l; le GNV est de 3.24. En supposant un taux de 65% du mélange dans le F4L912 DF, le coût du carburant a été ramené à une moyenne de 310 Da/km.

En se basant sur la fiabilité du moteur de F4L912 DF, on peut accepter que le coût de réparation pour les moteurs F4L912 DF est le même que pour le moteur diesel standard, sauf pour le contrôle périodique de l'installation du GNV.

---

<sup>2</sup> LED litre équivalent Diesel

Le tableau **III.1** Récapitule la différence de frais d'exploitation entre le F4L912 DF et le F4L912D. On admet que l'opérateur paye le carburant diesel au détail et obtient le GNC d'une station le plus proche possible, on admet aussi un taux de substitution de 65% GNC. Le tableau III.2 représente aussi un résumé du scénario de coût optimum pour l'usage de GNV en admettant que le remplissage s'effectue dans une station de remplissage lent (privée) comme le cas de l'ETUSA, le gaz est alors payé en gros. Vraisemblablement, les différences de coût effectif tomberont quelque part entre les valeurs présentées dans les tableaux III.1 et III.2.

**Tableau III.1** Différence de frais d'exploitation entre le F4L912 DF et F4L912 D  
Prix GNV en détail

Coût annuel (Da)	F4L912 D	F4L912 DF
Coûts divers	0	0
Carburant	349 234	341 037.75
Maintenance- System GNC	0	10 000
Maintenance-huile	2 9200	1 4600
<b>Total par an</b>	378 434	365 637.75
<b>Coût par 100 km</b>	345.60	333.92
<b>Duré d'amortissement (ans)</b>	6.25	

**Tableau III.2.** Différence de frais d'exploitation entre le C-10 DFNG et le C-10 D  
(GNV en gros)

Coût annuel (Da)	F4L912 D	F4L912 DF
Coûts divers	0	0
Carburant	349 234	11 0757.06
Maintenance- System GNC	0	10 000
Maintenance-huile	29 200	14 600
<b>Total par an</b>	378 434	135 357.06
<b>Coût par 100 km</b>	345.60	123.61
<b>Duré d'amortissement (ans)</b>	a) 0.76	b) 0.33

a) En tenant compte du cout des compresseurs de remplissage

b) sans tenir compte du cout des compresseurs de remplissage

Les détails de calcul sont présentés dans l'annexe 1

### IV.3 Discussion

Les calculs faits en considérant le GNV payé en détail ont donné comme résultat, une période d'amortissement approximative de 6 ans ; les calculs sont faits pour un taux de mélange combustible de 65 % GNV, ceci peut défavoriser l'utilisation du dual fuel dans le f4L912 équipant le minibus 25L4. Si on arrive à maîtriser et optimiser la combustion, le taux de mélange pourra atteindre les 85% de GNV ; ceci est accessible et favorisera l'utilisation du dual fuel dans un tel moteur.

Pour une société de transport qui dispose déjà d'une station de remplissage GNV, la durée d'amortissement n'atteint pas les 6 mois, c'est la situation la plus favorable pour l'utilisation du dual fuel dans le transport routier. Par contre pour une société qui investit pour installer une station de remplissage, la durée d'amortissement atteindra les 9 mois.

Si on revient à la situation du GNV en Algérie, on constate qu'il existe plus d'un facteur qui empêche la généralisation de l'utilisation du gaz naturel comme carburant dans un tel pays qui dispose d'un énorme réseau de gaz et d'une grande production aussi. Quelques mesures prises par l'état peuvent changer la situation et bouleverser les considérations, on peut proposer quelques suggestions :

- Prévoir une réduction de la pression fiscale sur le produit et sur les équipements ;
  - Exonération de la TVA sur l'assemblage des kits de conversion.
  - Franchise de la TVA pour l'achat de certains équipements utilisés dans la distribution du GNC.
  - Réduction de la TVA sur les activités d'installation et de maintenance du kit de conversion et des équipements affectés à la distribution du GNC et d'importation de véhicules dédiés au GNC.
  - Réduction des droits de douanes sur les équipements de conversion, de distribution du GNC et sur les véhicules dédiés au GNC.
  - Exonération de la vignette et de la taxe sur la carte grise.
- Encourager et financer la recherche scientifique dans le domaine du gaz naturel pour véhicule ;
- Investir dans la fabrication et la production des équipements et des kits GNV ;
- Comblent le manque flagrant des stations de remplissage GNV ;

## CONCLUSION

Toutes les données statistiques convergent vers une seule conclusion: il est devenu inquiétant l'état de l'économie mondiale vu le prix de l'énergie et l'indisponibilité de cette dernière. Le plus inquiétant étant l'environnement, la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique qui n'ont cessé de menacer l'existence de l'être humain qui les a provoqué lui-même par de divers moyens.

On a constaté aussi dans cette étude que le secteur de transport était responsable et a joué un rôle important dans ce scénario. La solution qu'on a proposé pour lutter contre ces problèmes dramatiques était d'introduire l'utilisation du gaz naturel dans les moteurs Diesel de transport via une carburation dite « dual fuel ». Cette solution a donné de bons résultats aux courts, moyens, et longs termes dans pas mal d'exemples.

De point de vu technique, la transformation n'étant pas très complexe donc un coût de conversion relativement réduit. Cette situation favorise et encourage l'utilisation d'une telle technologie.

La solution qu'on a proposé pour notre pays a théoriquement présenté de bons avantages, vu la disponibilité du gaz naturel ; mais reste à développer et optimiser cette technologie pour la généraliser et permettre aux utilisateurs d'en bénéficier.

# **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] **C. E. CHITOUR.** ' Quelles énergies pour demain ? les changements climatiques et le développement durable'. Edition OPE 2003.
- [2] **C. E. CHITOUR.** ' Mondialisation et développement durable'. Edition OPE 2003.
- [3] **Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX.** ' Perspectives énergétiques mondiales'. 'Collection Techniques de l'Ingénieur, volume BE8, BE 8515'. Edition 2008.
- [4] site web de l'agence internationale de l'énergie.
- [5] **DEGOBERT (P.).** ' Pollution atmosphérique'. Collection « Techniques de l'Ingénieur ». Traité : Mécanique et Chaleur, volume B3, Moteurs thermiques, B2710'. Edition 1995.
- [6] Séminaire international Naftal sur le GPLc, 23 juin 2009.
- [7] **J.C. GUIBET.** 'Carburant et moteurs'. tome 2. édition Technip 1987.
- [8] **Richard TILAGONE.** ' GAZ naturel '. Collection « Techniques de l'Ingénieur ». Traité Mécanique et Chaleur, volume BM2, Moteurs thermiques, BM291'. Edition 1995.
- [9] **AH. BEZZI.** ' Etude des Moteurs Dual-Fuel '. « Mémoire de post-graduation spécialisée ». Economie de l'Energie, Maîtrise et Applications. 2010.
- [10] **M. MEDICI.** ' Les utilisations du gaz naturel'. Edition Dunod 1959.
- [11] **Jean-Louis MAGNET et Georges DESCOMBES.** ' Moteurs à gaz, État de l'art'. Collection « Techniques de l'Ingénieur ». Traité Mécanique et Chaleur, volume BM, Moteurs thermiques'. BM 2590.
- [12] **O. Le Corre.** ' Énergétique des Systèmes Moteurs Alimentés par des Combustibles Gazeux ', Mémoire de synthèse d'activités scientifiques. École des mines de Nante, 2003.
- [13] **S. HADDADI, A.RAOUECHE.** Gaz Naturel pour Véhicules, Avantages et Inconvénients. publication de NAFTAL 2006.
- [14] Site web de l'office national des statistique Algérie ONS.

[15] **Dr. Abdelaziz SAMEUR & Dr. Abdelkrim RAOUECHE.** Les Perspectives de l'utilisation de l'hydrogène dans le transport en Algérie, séminaire NAFTAL-DCRD.

[16] JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 68 14 Ramadhan 1424, 9 novembre 2003.

[17] **SNVI SONACOME.** Documents internes du bureau d'étude.

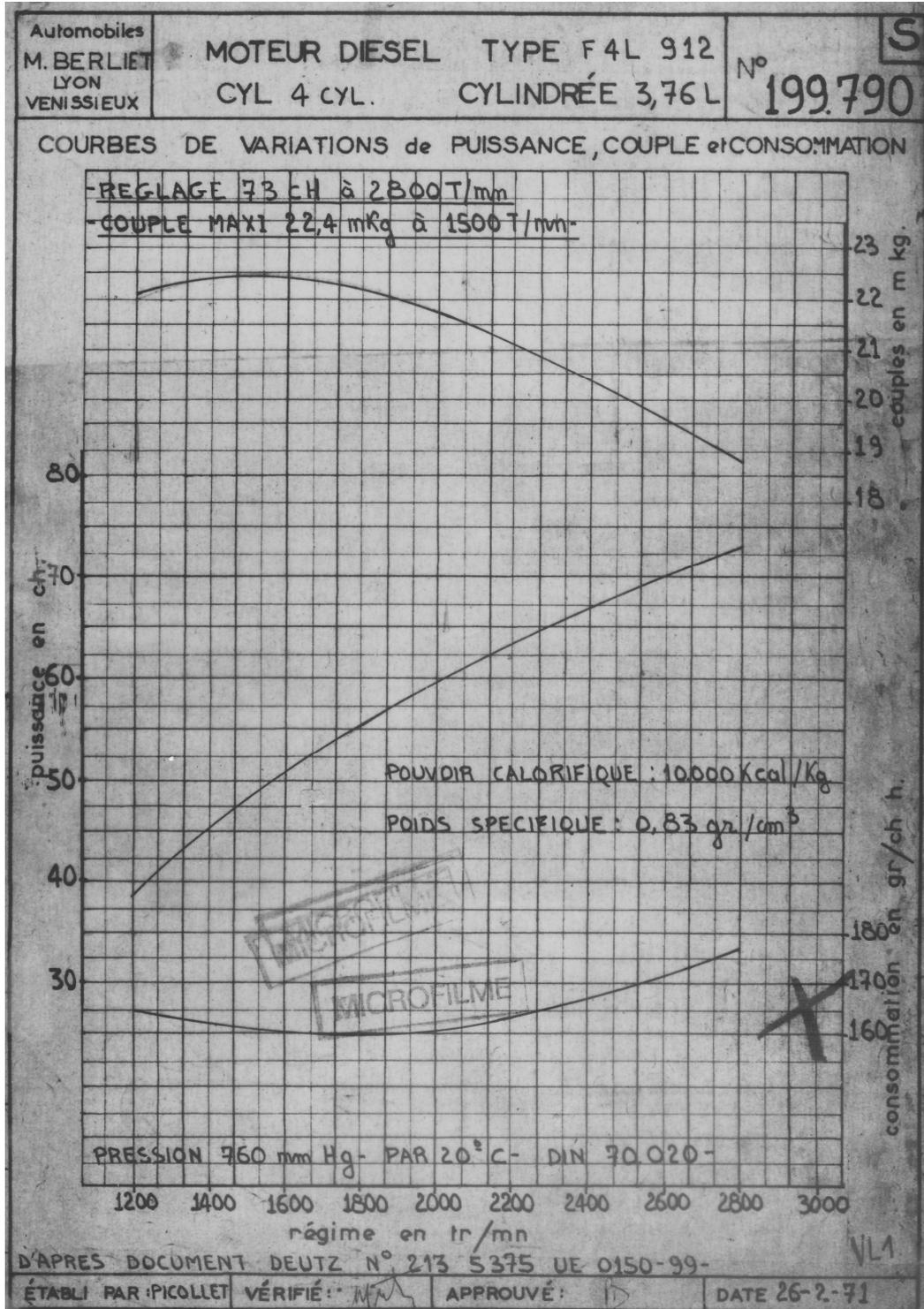
[18] **LOVATO AUTOGAZ.** Documents techniques internes.

[19] **H. LONGEOT, L. JOURDAN.** 'Construction industrielle'. édition Dunod 1982.

# **ANNEXES**

ANNEXE 1

DUREE D'AMORTISSEMENT



Source : bureau d'études de la SNVI

**En ralenti** (1200) tr/mn

$$P = 38.75 \text{ ch}$$

$$C_s = 165 \text{ gr/ch.h} = 221.1 \text{ gr/kWh}$$

$$C_s/h = 6393.75 \text{ gr/h}$$

$$\rho = 0.83 \text{ gr/cm}^3 \Rightarrow \boxed{C_s/h = 7.70 \text{ l/h}}$$

C'est la même quantité de gasoil injecté mode dual fuel, elle est considérée constante.

**Durée d'amortissement (coût du carburant)**

On estime que la puissance moyenne du fonctionnement quotidien du moteur est de 60 ch, en incluant les arrêts, et les temps de fonctionnement en ralenti.

Les calculs seront faits pour une durée de fonctionnement de 6h par jour parcourant 300 km avec la moyenne de 60 ch.

**Pour P = 60 ch**

**En mode Diesel**

$$C_s = 161 \text{ gr/ch.h}$$

$$C_s/h = 9660 \text{ gr/h}$$

$$\rho = 0.83 \text{ gr/cm}^3 \Rightarrow \boxed{C_s/h = 11.64 \text{ l/h}}$$

$$\Rightarrow C_s = 23.28 \text{ l par 100 km}$$

Le prix du gasoil étant 13.70 Da/l  $\Rightarrow$

Le coût : 318.94 DA / 100 km

**En mode Dual fuel**

Pour P = 60 ch,  $C_s/h = 11.64 \text{ L.E.D /h}$  (litre équivalent Diesel/h)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Gazoil : } 7.70 \text{ l/h (mode ralenti)} \\ \text{GNV : } 3.93 \text{ L.E.D/h} = 16.858 \text{ l/h}^{**} \end{array} \right.$$

\*\* PCI (gasoil) :  $10^3 \text{ kcal/kg} = 41868 \text{ kJ/kg} = 34750.44 \text{ kJ/l}$

$$\text{PCI (GNV) : } 50000 \text{ kJ/kg} \begin{cases} 35000 \text{ kJ/m}^3 & (\text{à } 1 \text{ bar}) \\ 8101.25 \text{ kJ/l} & (\text{à } 200 \text{ bar}) \end{cases}$$

$\Rightarrow 1 \text{ LED} = 4.29 \text{ l (GNV à } 200 \text{ bar)}$

**Calcul du coût :**

Un coût de gasoil de 210.98 Da/100 km

Avec le prix du GNV  $\begin{cases} 15.72 \text{ DA/Nm}^3 = 2.98 \text{ Da/l} & (\text{en détail}) \\ 7.23 \text{ DA/NM}^3 = 1.371 \text{ Da/l} & (\text{en gros}) \end{cases}$

$\Rightarrow$  Un coût de GNV  $\begin{cases} 100.47 \text{ DA/100 km} & (\text{en détail}) \\ 50.574 \text{ DA/100 km} & (\text{en gros}) \end{cases}$

$\Rightarrow$  Un coût total  $\begin{cases} 311.45 \text{ DA/100 km} & (\text{GNV en détail}) \\ 101.148 \text{ DA/100 km} & (\text{GNV en gros}) \end{cases}$

Durée d'amortissement = coût de l'installation/gain annuel

$$= \begin{cases} 6.25 \text{ ans} & (\text{GNV en détail}) \\ 0.33 \text{ ans} & (\text{GNV en gros}) \end{cases}$$

En tenant compte du coût de remplissage pour le cas d'une station privée :

Un exemple d'appareil de remplissage domestique :

Marque : PHILL

Puissance électrique : 750 W

Consommation spécifique : 0.54 kWh/m<sup>3</sup>

Prix de l'appareil : 90000 DA

Consommation annuelle d'électricité :  $C_s$  (GNV/an) X 0.54

$$= 8275.17 \times 0.54$$

$$= 4468.59 \text{ kWh}$$

Prix de l'électricité =  $4468.59 \times 4.5 = 20108.66$  DA/an

Coût total de remplissage : 20108.66 DA/an

Nouveau coût d'installation :  $80000 + 90000 = 170000$  DA

Coût total par ans : 155466.72 DA donc un gain de 222967.28 DA/an

⇒ Une nouvelle durée d'amortissement approximative de 9 mois et demie.

## ANNEXE 2

### REGLES DE SECURITE

Les véhicules fonctionnant au GNV nécessitent quelques précautions particulières de manipulation, de stockage, ainsi que des intervenants habilités à ce type de carburant.

#### REGLES DE BASE EN MATIERE DE COMPORTEMENT ET DE BATIMENT

##### Il est interdit :

- de fumer à proximité d'un véhicule fonctionnant au GNV.
- de produire des flammes (chalumeau de soudage ou de rétraction) à moins de 10m du véhicule.
- De vidanger les bouteilles de gaz dans un atelier.
- De travailler dans un atelier sans extracteur de toiture, ou dispositif d'aération correct en fonctionnement.

Le gaz est quatre fois plus léger que l'air. Les risques d'explosion ne peuvent se réaliser que si il y a stagnation et surtout accumulation de gaz. Le taux de mélange carburant-air minimum pour approcher ce risque doit être au moins égal à 4%.

Exemple : Un atelier fermé sans aération ayant 6m de hauteur, 22m de largeur et 25m de longueur aura un volume de 3300m<sup>3</sup>. Un véhicule possédant 8 bouteilles de 80l à 200bars

laisse échapper tout son gaz à l'intérieur de ce bâtiment. Le taux du mélange sera alors de 3.8%.

**Pour toutes interventions, il est obligatoire de :**

- Etablir un périmètre de sécurité autour du véhicule. (mise en place de barrières)
- Un panneau d'avertissement est collé sur le vitrage du véhicule. Il est nécessaire de l'y laisser pendant la durée des interventions.

**Passage en cabine de peinture :**

$T^{\circ}$  = température de l'air dans la cabine

Si  $T^{\circ} < 65^{\circ}\text{C}$  : le passage du véhicule GNV en cabine est admis sans purge des réservoirs.

Si  $65^{\circ} < T^{\circ} < 80^{\circ}\text{C}$  : le passage du véhicule GNV en cabine est admis avec vidange des réservoirs. Il est conseillé d'effectuer leur dépose.

Si  $T^{\circ} > 80^{\circ}\text{C}$  : le passage du véhicule GNV en cabine est proscrit sans dépose.

**REGLES DE BASE EN MATIERE DE CIRCUIT GNV Purge de gaz avant toute intervention.**

Avant de rentrer le véhicule dans l'atelier, s'assurer de la fermeture des bouteilles sauf celle nécessaire pour le déplacement du véhicule. Dans l'atelier, il faut fermer cette dernière en laissant tourner le moteur jusqu'à l'arrêt de celui-ci par consommation du gaz contenu dans le circuit d'alimentation.

NOTA : Les bouteilles étant équipées d'électrovannes, il est conseillé d'utiliser le coupe-batterie lors d'une immobilisation prolongée du véhicule, afin de limiter la consommation de courant et d'éviter une panne de batterie.

**REPLISSAGE DU GNV Précautions pour le remplissage du gaz :**

Attention, on va procéder au remplissage d'un véhicule GNV. Celui ci est équipé de 4 à 8 bouteilles haute pression. Chaque bouteille est équipée d'une vanne manuelle d'ouverture/fermeture permettant de l'isoler du reste du circuit GNV.

Le remplissage ne peut s'effectuer que lorsque le véhicule est arrêté, moteur éteint, contact coupé, vanne(s) manuelle ouverte.

Pendant les travaux d'équipement, il est préférable de faire l'appoint sur la seule bouteille déjà utilisée et de laisser les vannes des autres bouteilles fermées.

Il est conseillé d'utiliser le coupe-batterie en cas de remplissage lent.

Il est important d'utiliser un gaz de qualité exempt de toute impureté, trace d'huile, poussière, sable, etc...

Les manœuvres ci-dessous doivent aussi être effectuées précautionneusement et sans fumer. Pour un plein complet, les vannes de toutes les bouteilles doivent être ouvertes.

On doit :

- Dégager la clef de sécurité de la gâche électrique
- Encliqueter le robinet de la station de remplissage GNV sur le coupleur du véhicule
- Actionner le robinet selon les instructions propres à la station utilisée, pour permettre la mise sous pression de celui-ci. Il devient alors impossible de le retirer du véhicule.
- Procéder au remplissage ( $P_{max}=200bars$ )
- Manœuvrer le robinet dans le sens inverse pour dépressuriser l'embout.
- Raccrocher celui-ci sur son support
- Remettre la clef de sécurité.

Il faut savoir que la jauge de carburant au tableau de bord indique une pression et non un volume et si une seule bouteille est ouverte, malgré une indication de pression au tableau de bord maxi (200b), on n'aura que peu d'autonomie.

Les stations de remplissage de gaz naturel comprimé sont équipées d'un arrêt automatique qui stoppe le débit de gaz lorsque les réservoirs sont remplis à leur pression maximale.

La pression dans les réservoirs varie selon la température, aussi la station de remplissage utilise un système de compensation de pression qui tient compte de la température extérieure au moment du remplissage. Le dispositif s'arrête lorsque le réservoir est plein.

## **CONSIGNES DE CARROSSAGE**

### **GENERALITES**

Toutes interventions de modification sur le châssis doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation à PVI. On trouvera ci-dessous les recommandations générales d'intervention sur châssis GNV.

La carrosserie ne doit, tout d'abord, pas permettre l'accumulation de gaz par effet de « cloche » en cas de fuite accidentelle.

Le circuit gaz, et ses composants doivent faire l'objet d'une attention particulière. Ainsi :

- L'accès aux composants doit être préservé, notamment l'accès aux robinets des bouteilles qui doit être impérativement conservé.
- Il est interdit d'enlever les capots des bouteilles même si ceux-ci sont recouverts par la carrosserie.
- Il est interdit de modifier ou de s'accrocher sur les canalisations GNV, sur les supports de composants GNV, sur les supports de bouteilles GNV.
- Les supports de bouteilles ont fait l'objet d'une réception officielle, aucune modification n'est envisageable.

Afin d'éviter tout risque d'incendie :

La carrosserie doit garantir toute chute d'objet ou de projection sur l'environnement moteur. L'élévation en température des moteurs GNV est en effet supérieure à celle des moteurs GO.

### **SOUDURE ET MODIFICATION SUR VEHICULE**

Pour souder sur le véhicule, il est nécessaire de prendre toutes les précautions habituelles. En plus, pour les véhicules GNV, il faut également :

- S'assurer que les bouteilles sont fermées et que le circuit d'alimentation moteur est vide. Ne pas marcher sur les tuyauteries gaz.
- Ne rien attacher sur les tuyauteries gaz (flexibles, fils électrique, ...) Ne jamais peindre les étiquettes « gaz » sur les tuyauteries.
- Pour toute nécessité de vidange des réservoirs on propose l'utilisation des torchères GNV, plus raisonnable que la purge dans l'atmosphère, plus sûre et plus écologique elle consiste à détendre brûler les gaz résiduels dans une torchère adaptée à cette mission.

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

CHAPITRE I. GENERALITES .....	1
I.1 L'économies et l'énergie.....	1
<b>I.2 Réserves et ressources fossiles .....</b>	<b>3</b>
I.4 Les carburants gazeux.....	7
Le GPL carburant (GPL-c) .....	7
Le GAZ naturel .....	8
Récapitulation : Avantages et inconvénients de l'utilisation du GNV .....	16
I.5 Moteur dual fuel.....	17
Qu'es ce qu'un moteur dual-fuel ?.....	17
Historique .....	19
Description technique .....	19
Aspects environnementaux .....	21
Actualité chez les grands constructeurs automobile: .....	22
CHAPIRE II. CAS DE L'ALGERIE .....	23
II.1 Le GAZ naturel en Algérie .....	23
II.2 Parc automobile Algérien .....	24
II.3 Emission des GES en Algérie.....	25
Seuils limites des gaz toxiques émis par les véhicules automobiles : .....	26
CHAPITRE III. ETUDE TECHNOLOGIQUE DE LA CONVERSION.....	29
III.1 Présentation du moteur F4L912 .....	29
III.2 Description de l'installation .....	30
III.3 Description des équipements .....	33

III.4 Fonctionnement de l'ensemble.....	41
Mode dual fuel :.....	41
Mode diesel :.....	41
Mode ralenti :.....	41
CHAPITRE IV. ANALYSE ECONOMIQUE DU PROJET .....	50
IV.1 Coût Fixes .....	50
IV.2 Coûts Variables .....	50
IV.3 Discussion .....	52
CONCLUSION .....	53
ANNEXES .....	54
ANNEXE 1. DUREE D'AMORTISSEMENT .....	55
ANNEXE 2. REGLES DE SECURITE.....	58