

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département de Génie mécanique

Projet de fin d'étude

***En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie
mécanique***

THÈME

**Etude de la conversion du banc d'essai
TE16 au gaz naturel comprimé**

Proposé et dirigé par :
M.BENBRAIKA Mohammed

Etudié par :
M. DRALI Sidali

Promotion juin 2009

الموضوع: دراسة تحويل منضدة التجارب (TE16) للغاز الطبيعي المضغوط.
ملخص: موضوعنا يهتم بدراسة تحويل منضدة التجارب (TE16) الى الغاز الطبيعي المضغوط . هذا التحويل يطبق على محرك ذي اشتعال مقيد و بتحسين متعدد النقط اط لهدف تشغيله في مختلف الأعمال (أعمال البحث او التطبيق)
و نظرا لنقص العتاد لم نستطيع تحقيق التحويل المثالي فافتدينا لدراسة هذا التحويل.
الكلمات المفتاحية: غ ط م (غاز طبيعي مضغوط) ، منضدة التجارب ، تحسين متعدد النقاط.

Sujet: Etude de la conversion du banc d'essai TE16 au GNC.

Résumé: Notre projet consiste en l'étude de la conversion du banc d'essai TE16 au GNC. La conversion devait porter sur un moteur à allumage commandé à injection multipoint en vue de son exploitation pour différents travaux (travaux pratiques et de recherche).

Nous avons tenté la réalisation de la conversion au GNC du banc d'essai. N'ayant pas pu acquérir le kit de conversion, nous avons présenté en détail les équipements nécessaire a la conversion.

Mots clés: GNC (gaz naturel comprimé), banc d'essai, injection multipoint.

Subject: The testing ground TE16 with the NCG conversion study.

Summary: Our project consists of the testing ground TE16 with the NCG conversion study. Conversion deals with a spark ignition engine with a multipoint injection for its exploitation for various works (practical works and of research).

We tried the testing ground NCG conversion realization. Not having been able to acquire the conversion kit, we presented in detail the equipment necessary to conversion.

Key words: NCG (natural compress gas), testing ground, multipoint injection.

Dédicaces

A ma mère et mon père,

A mes frères et mes sœurs,

A toute ma famille,

A, tous mes oncles et leurs familles,

A tous mes amis,

A mon promoteur, M.BENBRAIKA Mohammed,

A tous mes camarades de promotion juin 2009,

Je dédie ce travail.

Sidali

REMERCIEMENTS

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalisation de ce modeste travail.

Je remercie aussi ma famille, à qui revient la gloire de m'avoir éduqué, encouragé et soutenu.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon promoteur Monsieur BENBRAIKA Mohammed d'avoir accepté de diriger cette étude.

Je remercie également les membres du jury, qui ont accepté de discuter et d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

J'adresse aussi ma profonde reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire. Sans oublier, mes camarades de promotion juin 2009 pour leurs aides, leurs encouragements et leurs disponibilités, Aussi que tout le personnel de la bibliothèque de l'ENP.

Liste des tableaux et des figures

Liste des tableaux :

- Tableau1.1 : Variation des limites d'inflammabilité en fonction de la température du mélange.
- Tableau1.2 : Composition du gaz naturel.
- Tableau1.3 : Caractéristiques du gaz naturel dans les conditions normales.
- Tableau 1.4 : Parc véhicules et infrastructures mondiale du GNC.
- Tableau 2.1 : Caractéristiques comparées du méthane et d'une essence classique.
- Tableau 2.2 Couple en fonction du régime.
- Tableau 2.3 : Différence de puissance entre le fonctionnement essence et GNC.
- Tableau4.1 : les différentes composantes.
- Tableau4.2 : Nomenclature du détendeur de pression.
- Tableau4.3:Nomenclature du boîtier.
- Tableau4.4 : nomenclature du moteur pas a pas.
- Tableau4.5:les types des bouteilles de gaz naturel.

Liste des figures :

- Fig1.1 : répartition ressources prouvées de pétrole dans le monde en 2001.
- Fig1.2 : répartition ressources prouvées de gaz naturel dans le monde en 2001.
- Fig1.3 : réserve mondiale prouvée de gaz naturel.
- Fig1.4 : évolution des réserves prouvées mondiales du pétrole.
- Fig1.5 : évolution des réserves prouvées mondiales du gaz.
- Fig1.6 : dispersion des véhicules GNC à travers le monde.
- Fig2.1 Signal de tension à la bougie, comparaison essence/GNC
- Fig2.2 : Vitesse laminaire de combustion (m/s) en fonction de la richesse du méthane, du propane et de l'isooctane (condition initiales : pression : 30bar, température : 900K).
- Fig2.3 synoptique du fonctionnement au gaz naturel.
- Fig2.4: Rendement comparé en fonction de la charge d'un moteur industriel alimenté en combustible liquide ou gazeux.
- Fig2.5 : Couple en fonction de la richesse (essence et GNC).
- Fig2.6: Performances du moteur GNC.
- Fig2.7 : Performances de moteur essence.
- Fig2.8 : Emissions en fonction de la richesse.
- Fig2.9 : Émissions comparées de gaz à effet de serre en fonction du carburant du puits à la roue.
- Fig2.10 : Réduction des émissions de polluants d'un moteur GNC à bicarburation par rapport à la filière essence.
- Fig2.11 : Synoptique générale en fonctionnement GNC.
- Fig3.1 : dynamomètre.

Fig3.2 : oscilloscope.
Fig3.3: Réservoir a air.
Fig3.4 : bac et pompe de refroidissement.
Fig3.5: calorimètre des gaz d'échappement.
Fig3.6 : Analyseur de gaz.
Fig3.7 : réservoir a essence.
Fig3.8 : moteur Ford.
Fig4.1:schéma de fonctionnement.
Fig4.2 : Agencement des différents composants.
Fig4.3 : électrovanne de fermeture.
Fig4.4 : Plan du détendeur de pression.
Fig4.5 : boîtier de distribution.
Fig4 .6 : le boîtier.
Fig4.7:moteur pas à pas.
Fig.4.8: valve d'injection.
Fig4.9 : sonde de pression absolue.
Fig4.10 : schéma électrique de fonctionnement.
Fig4.11: bouteille de GNC.
Fig4.12: département de génie mécanique
Fig4.13 : plan de masse de laboratoire moteur
Fig4.14: laboratoire moteur.
Fig4.15: la niche
Fig4.16: ventilateur axial
Fig4.17: détecteur de gaz naturel.
Fig4.18 : extincteur

Liste des nomenclatures :

GDF : gaz de France.

RV : rotation de vilebrequin.

RON: research octane number.

MON: moyen octane number.

MAP : Manifold Absolute Pressure.

nd : non définie

Nm3 : normale mètre cube.

GFI :Gaseous Fuel Injection.

Introduction	01
CHAPITRE1 : Généralités sur le gaz naturel comprimé	
1. 1. Origine du gaz naturel	03
1. 2. Diversification géographique des réserves de gaz naturel dans le monde	03
1. 3. Caractéristiques et propriétés :	06
1.4. Composition du gaz naturel distribué en Algérie :	09
1.5 Utilisation de gaz naturel dans le monde :	09
1.6 Avantages du gaz naturel :	11
1.7 Inconvénients du gaz naturel :	13
1.8Principe de fonctionnement de moteur 4 temps	14
CHAPITRE2 : Performances du moteur au GNC	
2.1. Particularités liées à la combustion sur moteur à gaz naturel	16
2.2 Indices d'octane.....	16
2.3. Allumage et propagation de la flamme	16
2.4 Performances du moteur GNC	18
2.4.1Particularités du moteur lors du fonctionnement en GNC.....	18
2.4.2Pression moyenne effective	19
2.4.3Rendement et pression maximale de cycle	19
2.5 Les émissions de polluants	22
➤ Les oxydes d'azote.....	23
➤ Monoxyde de carbone.....	23
➤ Hydrocarbures imbrûlés.....	23
➤ Particules.....	23
2.6Technologie du GNC.....	26
Introduction	26
2.6.1Définitions	26
2.6.2 Les techniques d'alimentation	27
2.6.3 L'injection électronique	27
CHAPITRE3 :	
Le banc d'essai TE16	29
3.1Description du banc d'essai TE 16	29
3.1.1Généralités	29
3.1.2 Les différents organes du banc d'essai	29
➤ Le dynamomètre	29
➤ Console de commande.....	30
➤ L'Oscilloscope	31
➤ Le réservoir d'air.....	31
➤ Le système de refroidissement	32
➤ Le Calorimètre des gaz d'échappement	33
➤ L'Analyseur de gaz d'échappement	33

➤ Le réservoir de carburant.....	34
➤ Le moteur.....	35
3.2 Les Composantes du kit pour l'alimentation en gaz naturel comprimé	35

CHAPITRE4 : la Conversion du moteur a injection multipoint

4.1Principe de fonctionnement	37
4.2 Les différentes composantes de kit GNC	39
4.2.1 L'électrovanne de fermeture de GNC	39
4.2.2 Le détendeur de pression	39
➤ Fonctionnement du premier étage	41
➤ Fonctionnement du deuxième étage	41
➤ Rétroaction de la soupape du deuxième étage.....	42
➤ Protection contre la surpression du premier étage	42
➤ Le boîtier de distribution	42
➤ Plan du boîtier de distribution.....	43
➤ Fonctionnement du boîtier	44
- Fonction principale	44
-Fonctions complémentaires	44
➤ Fonctionnement du moteur pas à pas	45
➤ Fonctions de la vanne de fermeture de gaz	45
➤ Fonctionnement de la vanne de fermeture de gaz.....	45
➤ Les valves d'injection	47
➤ La sonde de pression absolue	47
➤ Le calculateur	48
➤ La soupape de sécurité (surchauffe).....	51
➤ L'électrovalve de coupure haute pression	51
➤ L'électrovalve de coupure basse pression.....	51
➤ Le transducteur de jauge de carburant.....	51
➤ Le changement de mode automatique.....	51
4.2Stockage et ravitaillement en GNC	52
4.2.1 Réservoirs GNC	52
4.2.2 Caractéristique technique de réservoirs	53
4.2.3 Circuit GNC.....	54
4.3Emplacement de réservoir	54
-Plan de masse du département de génie mécanique	55
-Plan de laboratoire moteur	56
4.4Mesure de sécurité de laboratoire	57
4.4.1 La ventilation	59
4.4.2 Détection de gaz	60
4.4.3Matériel pour incendie.....	61
Conclusion.	62
Références Bibliographiques.	63

Introduction :

Dans le monde entier, la prise de conscience des dangers de la pollution atmosphérique, du réchauffement de la planète et des réserves limitées en pétrole expliquent l'intérêt croissant des pouvoirs publics pour le développement durable et les énergies alternatives dites « énergies propres ».

Cette prise de conscience est d'autant plus forte que le transport routier dépend à plus de 98% du pétrole et de ses produits dérivés. Dans ce contexte, les pouvoirs soulignent l'importance de promouvoir une croissance progressive par d'autres sources énergétiques et fixe comme objectif le remplacement, d'ici à 2020 des carburants classiques par des carburants alternatifs [1]

Plusieurs pays, se sont engagés à atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixés à Kyoto. Pour l'Europe, il s'agit de diminuer, à l'horizon 2012, les émissions de 8% par rapport aux émissions de 1990. L'enjeu est aujourd'hui de conjuguer meilleure santé publique et protection de l'environnement.

Aujourd'hui, les atouts du gaz naturel lui permettent de s'imposer comme une solution crédible pour la nécessaire évolution du secteur des transports et lui propose une énergie nouvelle pour l'automobile.

Sur les 30 prochaines années, c'est la demande énergétique associée aux transports qui devrait progresser le plus rapidement (+ 2,1 %/an contre 1,7 %/an pour la demande globale d'énergie). Aujourd'hui, ce secteur économique utilise presque exclusivement des produits pétroliers. Outre cette dépendance, la question fondamentale de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, que cette activité génère, paraît primordiale. [1]

Plus généralement, se pose la question du volume des réserves de pétrole par rapport à la demande de transport actuelle et future.

La solution la plus économique et la plus écologique est la mise en œuvre d'énergies alternatives au pétrole en conservant les moteurs à combustion interne. Certaines sont déjà utilisées depuis fort longtemps, souvent pour réduire une dépendance au pétrole au profit d'une ressource spécifique (cas du Brésil).

A cet effet et afin de pouvoir répondre à la demande croissante des carburants surtout le gazole, les carburants les plus économiques et les plus écologiques tels que le gaz naturel carburant (GNC), « carburant le moins polluant » doivent être utilisés. Le gaz naturel est composé de 91 % de méthane (CH₄), Sa combustion ne produit ni oxyde de soufre, ni plomb, ni poussières, ni fumées noires et peu d'oxyde d'azote et de monoxyde de carbone. C'est un carburant idéal, respectueux de l'environnement. C'est un carburant qui ne nécessite aucune transformation chimique potentiellement polluante, contrairement à d'autres carburants alternatifs. A la différence du pétrole, un processus de raffinage n'est pas nécessaire.

Le gaz naturel est le moins polluant du fait de sa composition chimique très simple, il ne comporte que 7 éléments dont 91% de méthane (CH₄). A titre d'indication, l'essence est constituée de 150 éléments différents et le gazole de plus de 1000 qui, au cours de leur combustion, émettent des produits toxiques.

De tous les hydrocarbures, le GNC est celui qui contient le moins de carbone et il est donc riche en hydrogène. Cette particularité est favorable en ce qui concerne les émissions de CO₂. L'utilisation de cette énergie contribue à lutter contre l'effet de serre : En moyenne, un véhicule gaz naturel produit:

- 25% de moins de CO₂ qu'un véhicule équivalent fonctionnant à l'essence.
- 10% de moins qu'un véhicule équivalent fonctionnant au gazole. [1]

Aussi le « gaz naturel carburant » est plus économique. Pour parcourir une même distance, le Carburant Gaz Naturel affiche un prix inférieur à celui des autres carburants couramment utilisés aujourd'hui.

Près de 4 millions de voitures roulent au Carburant Gaz Naturel dans le monde. Son utilisation se développe sur tous les continents en raison de sa disponibilité immédiate et de ses atouts économiques et écologiques. Plus de 500.000 véhicules ont déjà été vendus en Europe pour leurs qualités environnementales et leurs performances. Mais malgré tous ces développements, on remarque que sur les 1500 Mtep consommées par le transport routier dans le monde, le gaz naturel (GNC), le gaz de pétrole liquéfié (GPL) et les biocarburants ne représentent toutefois aujourd'hui qu'une quarantaine de Mtep, soit moins de 3% du total.

L'Algérie se trouve interpellée par une réflexion sérieuse sur l'utilisation du GNC comme carburant du fait qu'elle s'achemine vers l'importation du gazole, un carburant cher et polluant alors qu'elle dispose d'énormes gisements de gaz naturel, d'un réseau dense de transport et de distribution qui met ce produit à la disposition de l'utilisateur sans besoin de transformation. Aussi ce produit offre de très bonnes qualités intrinsèques en matière de protection de l'environnement et de la santé.

C'est au regard de tous ces avantages que la généralisation de l'utilisation du gaz naturel comme combustible pour les véhicules s'avère primordiale.

Conscient de cette opportunité, le département de génie mécanique veut participer à cette dynamique de réflexions et de propositions de solutions aux problèmes posés par la pollution causée par les moteurs thermiques fonctionnant aux carburants fossiles classiques en menant des études expérimentales sur d'autres types de carburants relativement plus propres.

Le laboratoire-moteurs du département, disposant d'un banc d'essai, identifié sous l'appellation TE16, fonctionnant à l'essence, a voulu tester sur ce même banc un autre type de carburant en l'occurrence le Gaz Naturel Comprimé (GNC). Pour cela, et dans un premier temps, j'ai été chargé dans le cadre de mon projet de fin d'études de mener un travail sur l'étude de la conversion au GNC de ce banc d'essai équipé d'un moteur à essence de la marque Ford.

Nous proposons ce travail sous forme de quatre chapitres ; en commençant par des généralités sur le gaz naturel comprimé et le moteur thermique, dans le deuxième chapitre on parlera sur les performances du GNC et sur ces technologies, le troisième chapitre est consacré pour la description du banc d'essai TE 16 et le enfin quatrième chapitre est consacré à la conversion du moteur au gaz naturel comprimé.

CHAPITRE1 : Généralités sur le gaz naturel comprimé

1. 1. Origine du gaz naturel

La formation de gaz naturel provient de la lente métamorphose de micro-organismes qui constituent le plancton. Ces organismes, déposés au fond des océans se sont lentement incorporés aux sédiments pour constituer la roche mère. Recouverts sans cesse de nouveaux dépôts, à l'abri de l'oxygène et de la lumière, ils se sont enfoncés dans la terre avant de connaître des migrations qui les ont conduits vers des pièges où ils se sont accumulés. On appelle ces structures géologiques caractéristiques des structures pièges pouvant contenir du gaz naturel (gisement sec) ou du pétrole et du gaz naturel (gisement mixte). À l'état brut, il est principalement présent sous trois formes différentes :

- le gaz non associé, qui n'est pas en contact avec le pétrole brut ;
- le gaz associé de couverture qui, sous forme libre, couvre la couche de pétrole brut ;
- le gaz associé dissout dans le pétrole dans les conditions de pression et de température du réservoir et qui est séparé lors du traitement sur champ du pétrole brut.

Le gaz naturel peut aussi contenir des impuretés en quantité très variable :

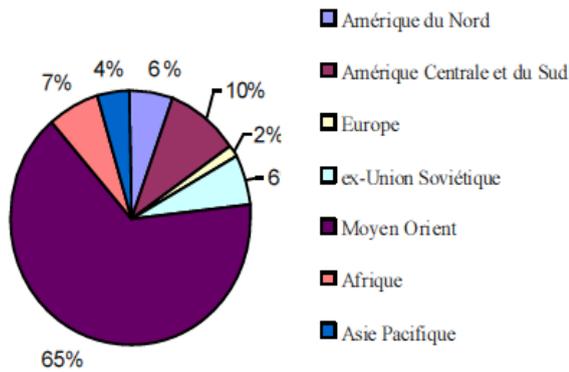
- le soufre, qui peut parfois être présent principalement sous forme d'H₂S jusqu'à des proportions supérieures à 15 % (c'est le cas du gaz de Lacq : 15,3 %). [1]
- le dioxyde de carbone, qui est l'impureté la plus fréquente dans tous les gaz naturels. Ses proportions volumiques moyennes sont de l'ordre de 0,5 à 10 %, mais peuvent atteindre jusqu'à 70 % dans certains gisements (Indonésie). [1]
- l'azote, qui comme le CO₂, est quasiment toujours présent dans les gaz naturels. Ses proportions volumiques moyennes varient de 0,5 à 5 %, et peuvent dépasser les 25 % dans certains cas. [1]

À leur sortie du gisement, les gaz naturels sont inutilisables en l'état. Le gaz naturel subit une série de traitement pour éliminer les éléments nocifs, conserver ceux qui peuvent être commercialisés et donner au gaz son odeur caractéristique. Ces opérations consistent à détendre, sécher (suppression de l'eau et des hydrocarbures à l'état liquide), extraire les gaz acides, séparer les hydrocarbures et odoriser. Le traitement du gaz peut intervenir à deux stades distincts : lors de la production (sur le gisement) et après stockage (en réservoir souterrain ou dans les terminaux méthaniers). Dans ce dernier cas, on parle de retraitement. La mission secondaire du traitement est de récupérer les composés pouvant être commercialisés séparément comme l'éthane, le GPL ou l'hydrogène sulfuré (H₂S). [1]

1.2 Diversification géographique des réserves de gaz naturel dans le monde :

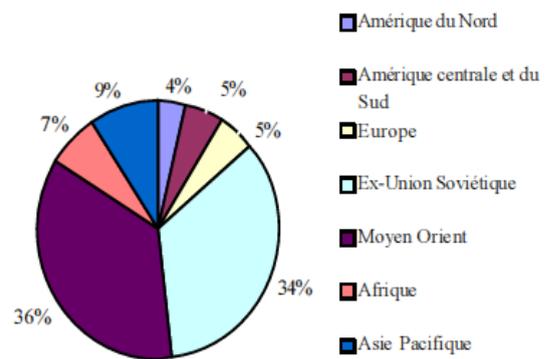
Comme le montrent les figures 1 et 2 ci-après, les réserves mondiales de gaz naturel sont légèrement mieux réparties dans le monde que celles du pétrole. Alors que le Moyen-Orient détient près de 65 % des réserves mondiales de pétrole, sa part de réserves de gaz naturel s'élève à 36 %. Le reste des réserves de gaz naturel est réparti principalement en ex-Union Soviétique (34 %) et, dans une moindre mesure, en Afrique (7 %), en Amérique du Nord (7 %), en Amérique centrale et du Sud (5 %), en Europe (5 %) et en Asie (9 %).

Figure 1 : répartition réserves prouvées de pétrole dans le monde en 2001



Source : BP-Statistical 2001

Figure 2 : répartition réserves prouvées de gaz naturel dans le monde en 2001



Source : Cédigaz

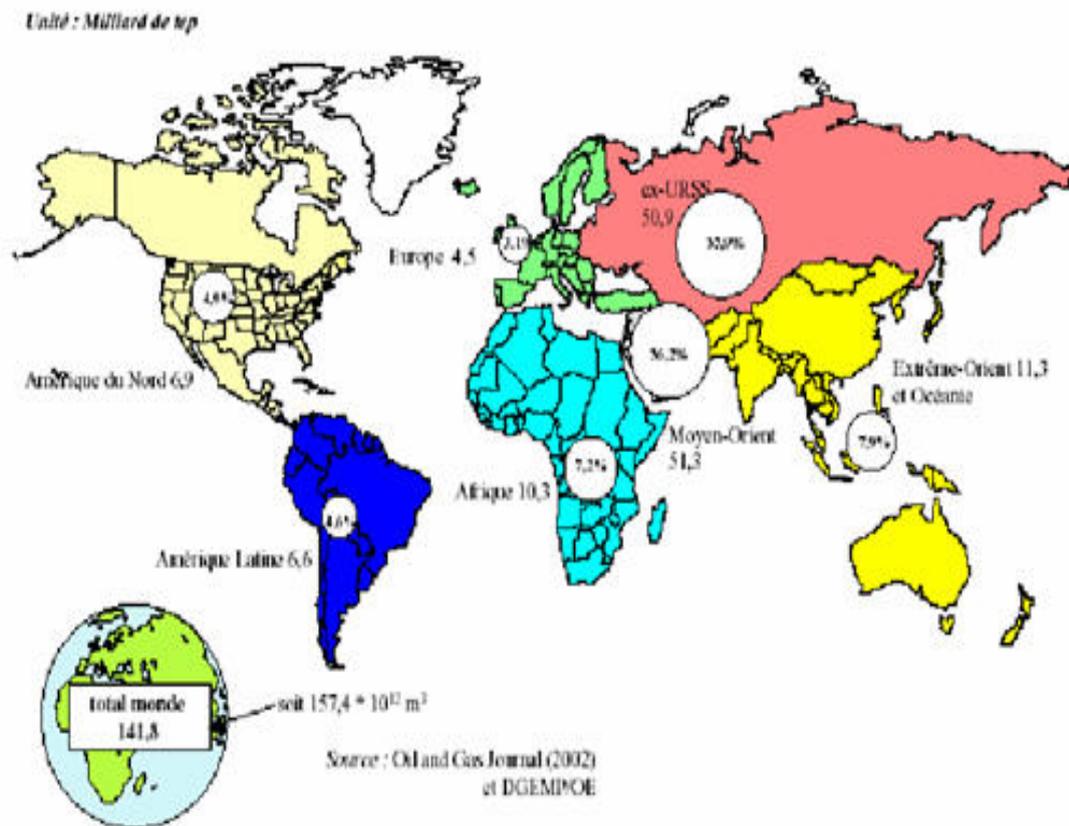


Fig1.3 : réserve mondiale prouvée de gaz naturel (1^{er} janvier 2001)

Les réserves de gaz se définissent exactement de la même manière que pour le pétrole : elles ne correspondent pas à ce qu'il y a dans la terre mais à son extraction. Avec une différence de taille : pour le pétrole, le taux de récupération est de l'ordre de 20 %, alors que pour le gaz ce taux est près de 80 %. Les possibilités de réévaluation des réserves par suite de progrès techniques sur les méthodes d'extraction, ou de hausse des prix sont donc marginales. Pour augmenter les réserves, de nouveaux gisements devront être trouvés.

Le gaz ne permet donc pas autant cette « réserve d'optimisme pour l'avenir » que le pétrole offre grâce à la réévaluation constante des réserves malgré une quasi-absence de découverte de nouvelles réserves. Le gaz partage une caractéristique avec le pétrole : les réserves de gaz ne sont pas plus illimitées, ni mieux réparties.

Grâce à la percée technologique des turbines à gaz/cycle combiné pour la production d'électricité et compte tenu des contraintes environnementales, le gaz naturel connaît un réel succès depuis les années 1990.

En parallèle, de nombreux champs gaziers ont été découverts ces dernières années. Alors qu'en 1970, les réserves prouvées de gaz naturel ne représentaient que 50 % des réserves prouvées de pétrole, ce ratio s'élève aujourd'hui à environ 100 %.

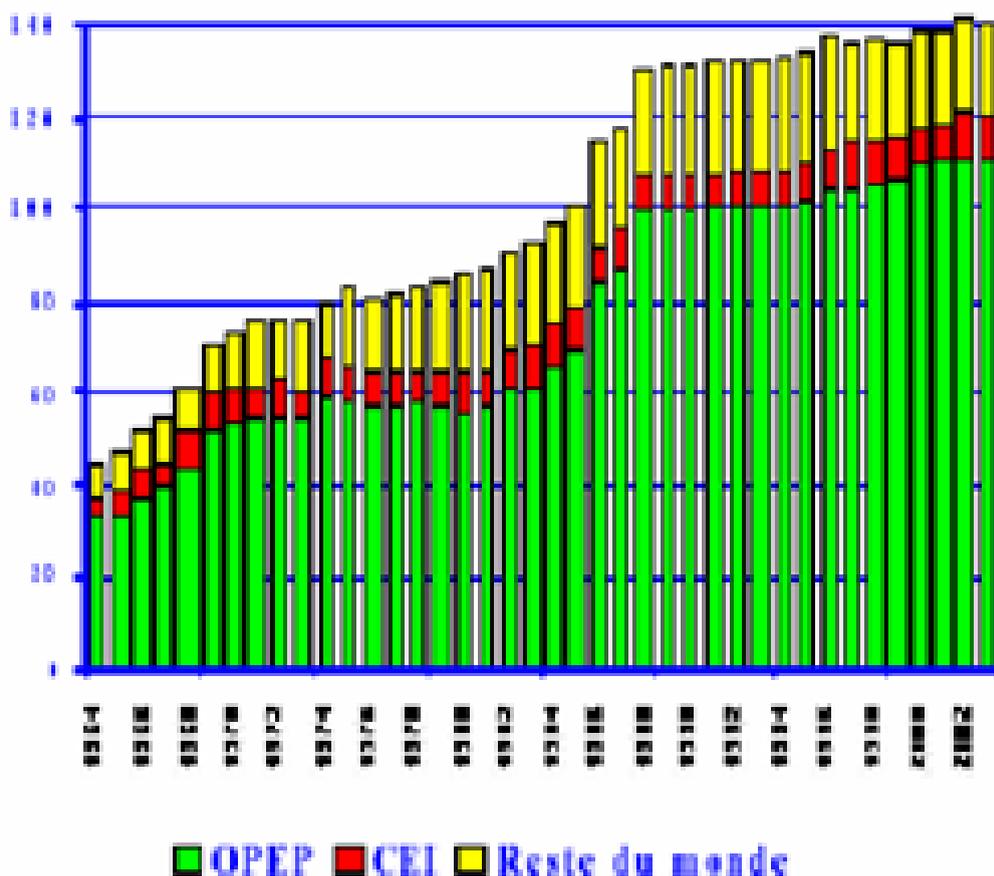


Fig1.4 : évolution des réserves prouvées mondiales de pétrole brut(Gt).

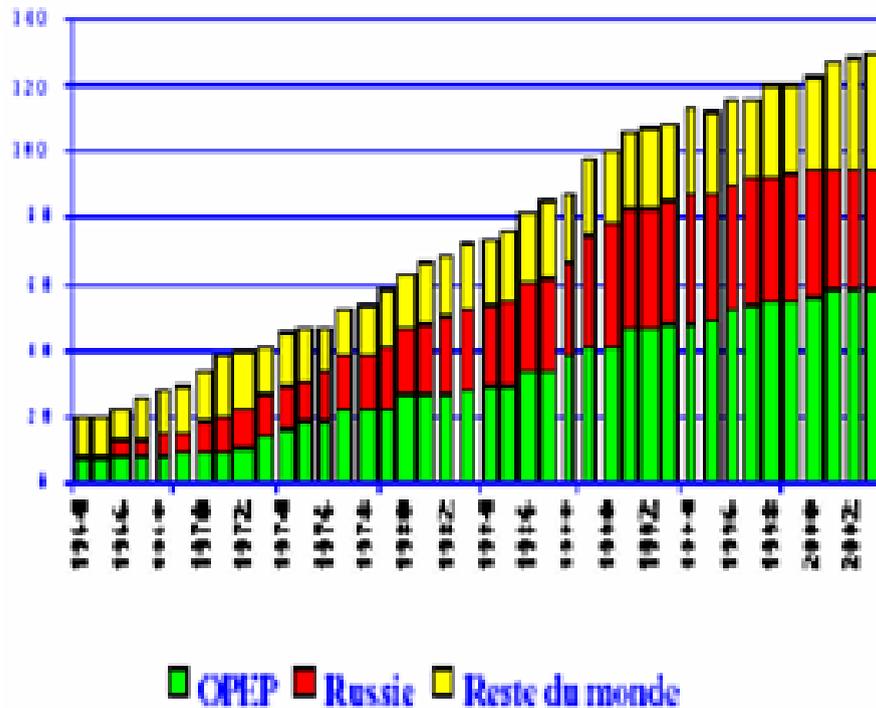


Fig1.5 : Evolution des réserves prouvées mondiales de gaz en (Gt).

L'estimation (AIE et World Energy Outlook) du nombre d'années de réserves est d'environ 50 ans, en tenant compte des réserves prouvées, probables et possibles et d'une croissance de la consommation de 3 % par an (tendance basse, car le taux de croissance augmente).

Les potentiels d'amélioration pourront venir de l'utilisation de ressources non conventionnelles (notamment les hydrates de gaz) et de l'utilisation de champs éloignés en utilisant des procédés *Gas To Liquid*. Une fois ce type de technologie disponible et rentable, le gaz naturel sera concurrencé par d'autres sources d'hydrocarbures, dont la biomasse, avec un meilleur bilan d'émissions de gaz à effet serre. [1]

1. 3. Caractéristiques et propriétés :

Le gaz naturel est :

- composé de méthane CH₄ à plus de 80% (pourcentage variable selon l'origine du gaz) ;
- incolore ;
- inodore (il est odorisé par du THT (tétrahydrothiophène C₄H₈) pour le rendre détectable ;
- plus léger que l'air (sa densité est 0,61) ;
- peu soluble dans l'eau (40 cm³ par litre dans des conditions ordinaires de pression et de température) ;

- sa masse volumique est de l'ordre 0,72 g/l (sous 1 013 mbar et 0 °C), sa masse moléculaire est 16,7 ;
- les points de liquéfaction et de solidification sont respectivement 164 °C et 185°C.

C'est un gaz qui est régi par l'équation des gaz parfaits : $PV = nRT$.

La quantité de gaz naturel est mesurée en normaux mètres cubes (unité de mesure utilisée pour les compteurs à gaz GDF).

Un normal mètre cube (Nm^3) est la quantité de gaz occupant 1 m^3 pour une pression de 1.013 bar et une température de 0 °C. Compte tenu de sa composition simple, ce gaz présente des avantages à être utilisé comme carburant sur un moteur à allumage commandé :

- peu de rejets de particules toxiques (particules apparaissant sous forme de fumées noires) ;
- peu de rejets toxiques ou cancérigènes comme le benzène (produits par les moteurs à essence) ou de composés poly-aromatiques (moteurs Diesel) ;
- les hydrocarbures HC imbrûlés rejetés sont principalement composés de méthane, qui est non toxique ;
- possibilité de réduire les émissions globales de CO_2 car ce carburant est l'hydrocarbure contenant le moins de carbone.

Cependant ces performances sont directement liées aux caractéristiques physiques principales du gaz. L'impact de ces performances sur la combustion est décrit ci-dessous.

- L'indice d'octane caractérise la résistance au cliquetis établi par comparaison à deux références : 0 pour le n-heptane et 100 pour l'iso-octane. Pour le gaz naturel, l'indice d'octane est de l'ordre de 130, nettement meilleur que celui de l'essence (95). Cette caractéristique permet d'augmenter le taux de compression à 11-13 et l'avance de 15 à 25°, donc d'améliorer le rendement du moteur.
- La vitesse de flamme est plus faible que l'essence, de l'ordre de 30 à 34 cm/s (38 cm/s pour l'essence), elle est liée à la difficulté d'oxyder le méthane et crée un risque d'extinction de flamme aux parois. Ceci se retrouve également au niveau de l'énergie minimale d'allumage du méthane par étincelle avec des valeurs de l'ordre de 100 MJ pour 30 MJ pour l'essence. Ceci nécessite des bougies et bobines d'allumage adaptées. [1]

- Le PCI (respectivement PCS), Pouvoir Calorifique Inférieur (respectivement Supérieur), exprimé en MJ/kg, est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète sous 1 013 mbar avec un combustible et un comburant à 0 °C, les produits de combustion étant ramenés à 0 °C et l'eau de combustion supposée sous forme vapeur (respectivement liquide). Le PCI du gaz varie selon l'origine du gaz, entre 40,3 et 49,5 MJ/kg (le gazole ayant un PCI de 42 MJ/kg). L'énergie contenue dans 1 Nm³ de gaz naturel correspond donc environ à 1 litre de gazole.
- Le rapport stœchiométrique est le rapport des masses d'air et de carburant pour avoir une combustion complète, ce rapport varie entre 14 et 14,5 pour les hydrocarbures liquides (essence, gazole, carburacteur). Pour le gaz naturel, il est compris entre 13,8 et 17 selon la composition et la teneur en gaz inertes. Il faudra donc prévoir à la conception des systèmes de régulation de débit injecté pouvant fonctionner sur une large plage. Soit le moteur est réglé pour un type de gaz, soit le moteur dispose d'un système auto adaptatif. Le moteur au GNC peut fonctionner en mélange stœchiométrique ou en mélange pauvre jusqu'à des richesses de 0,5 à 0,6 grâce à un domaine d'inflammabilité plus large que les autres hydrocarbures (entre 5 et 13 % du mélange pour des températures ambiantes). [1]
- Limites d'inflammabilités : la combustion est généralement possible entre deux limites de composition de mélange air-gaz. Les limites d'inflammabilités sont données généralement pour des mélanges avec de l'air, dans les conditions normales et elles sont exprimées en pourcentage volumique.

L'augmentation de la température accroît la plage d'inflammabilité. La variation de la limite inférieure, en fonction de la température avant l'allumage, pour le méthane pur, est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau1.1 : Variation des limites d'inflammabilité en fonction de la température du mélange. [2]

Température du mélange °C	Limite inférieure d'inflammabilité %	Limite supérieure d'inflammabilité %
0	5,2	13,4
100	4,7	13,7
200	4,2	14,7
300	3,7	15,9
400	3,1	17,3

- L'indice de Wobbe (W) caractérise l'interchangeabilité du gaz pour un système donné (moteur par exemple). C'est le rapport entre le PCS et la racine carrée de la densité par rapport à l'air. La richesse est une fonction croissante de l'indice de Wobbe. Si cet indice augmente avec la richesse. Le suivi de cet indice permet de connaître les modifications à faire au niveau du contrôle moteur. Un autre paramètre, le potentiel de combustion (C), obtenu par des relations empiriques, représente la vitesse de combustion. Dans un repère (C, W), on peut tracer une zone de fonctionnement correct pour un moteur et garantir l'interchangeabilité du gaz dans cette zone.

1.4. Composition du gaz naturel distribué en Algérie :

Le gaz naturel contient des impuretés à l'état brut. Sur le champ d'extraction, il est traité afin de répondre aux spécifications des pays d'importation. Ces spécifications peuvent varier en fonction du pays d'exportation et de la qualité initiale du gaz à l'état brut.

Les tableaux ci-dessous présente, pour la part du gaz naturel utilisé en Algérie dans le volume total, leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques principales. Il est aussi indiqué le mini, le maxi et la moyenne pondérée par la part du volume.

Tableau1.2 : Composition du gaz naturel. [2]

Origine du gaz naturel	Méthane CH ₄	Ethane C ₂ H ₆	Propane C ₃ H ₈	Butane C ₄ H ₁₀	Pentane C ₅ H ₁₂	Azote N ₂	Gaz Carbonique CO ₂
Algérie.....	91,2	6,5	1,1	0,2	---	1,0	---

Tableau1.3 : Caractéristiques du gaz naturel dans les conditions normales. [2]

Origine du gaz naturel	Masse Volumique normale Kg/m ³	Densité par rapport à l'air	Température théorique de combustion °C	PCI Par unité de masse MJ/Kg	Air théorique m ³ /m ³ (gaz)	Limite inférieure d'inflammabilité%	Limite supérieure d'inflammabilité%
Algérie	0,78	0,60	1950	48,8	10,1	4,9	13,9

Des restrictions sont appliquées sur la composition et les caractéristiques. Elles visent principalement à satisfaire aux exigences :

- des réseaux de distribution et des réservoirs de stockage (dans le but d'éviter tout phénomène de corrosion et de condensation)
- des systèmes d'utilisation. Pour conserver des conditions correctes de fonctionnement, le gaz naturel doit présenter une qualité de composition relativement constante.

1.5 Utilisation de gaz naturel dans le monde :

Le gaz naturel pour véhicules (abrégié en GNV) ou gaz naturel comprimé (GNC) est du gaz naturel, constitué à 97% de méthane « selon la provenance du gaz », le même que celui du réseau Gaz de ville.

En raison de ces conditions de distribution, le GNC a d'abord intéressé les utilisateurs de flottes captives, à savoir des flottes de véhicules rattachées à un site équipé d'un compresseur. Il s'agit prioritairement des autobus et des gros utilitaires urbains (bennes à ordures, par exemple). Pour les particuliers, il existe plusieurs possibilités. Le réseau de stations service GNC permet aux particuliers de faire le plein de GNC ou bien au moyen d'un compresseur domestique installé au garage.

Pour des raisons de sécurité et d'encombrement, la station de remplissage domestique ne comporte pas de réserve de gaz sous pression, mais compresse le gaz directement dans le réservoir de la voiture. Contrairement au plein en station (avec réserves sous pression), le plein à la maison est donc un processus assez long. La station domestique fonctionne sans surveillance et s'arrête quand le réservoir de la voiture est plein. [3]

Dans le monde environ 4 millions de véhicules roulent au GNC selon la répartition donnée par le tableau ci après :

Tableau 1.4 : Parc véhicules et infrastructures mondiale du GNC

Pays	Parc véhicule (milliers)	Consommation (Mtep)	Nombre de stations
Italie	400	0,36	463
Etats-unis	130	0,35	1300
Canada	20	0,04	222
Japon	18	nd	226
Allemagne	19	nd	337
Irlande	10	nd	10
France	7	0,02	102
Argentine	1243	1,7	1105
Brésil	740	0,8	860
Pakistan	540	nd	574
Inde	159	nd	166
Chine	69	0,05	270
Venezuela	50	nd	140
Egypte	52	nd	79
Ukraine	45	nd	130
Russie	36	0,024	218
Bangladech	32	nd	68

Algerie	00	00	00
TOTAL	3849	3,81	7180

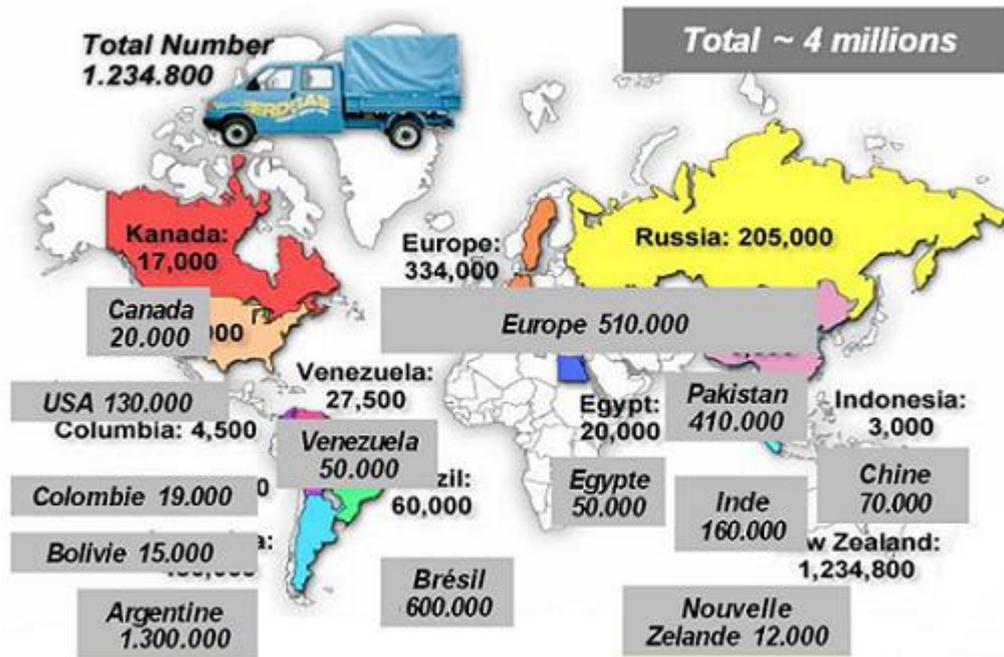


Fig1.6 : dispersion des véhicules GNC à travers le monde

1.6 Avantages du gaz naturel :

- Le gaz naturel ne nécessite pas, après extraction, de traitement lourd comme le pétrole qui doit être distillé dans d'imposantes raffineries,
- Le transport terrestre du gaz naturel dans des gazoducs nécessite beaucoup moins d'énergie que le transport du pétrole ou celui des carburants liquides qui en sont extraits,
- Le transport maritime du gaz naturel se fait à bord de navires spéciaux baptisés "méthaniers". En cas d'accident, les plus récents de ces navires ne présentent aucun risque de marée noire puisque même leurs moteurs fonctionnent au gaz naturel.
- Une inflammabilité difficile : le GNC est le carburant le plus difficilement inflammable. La température nécessaire pour enflammer le gaz naturel se situe à 540°C, soit le double du gazole.
- Une dilution rapide : le GNC 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.

En atmosphère confinée, la vitesse de dispersion élevée dans l'air permet au gaz naturel de se diluer rapidement.

- Une plage d'inflammabilité réduite : la plage d'inflammabilité du GNC est comprise entre 5 % et 15 % de concentration dans l'air.

- Les ressources de gaz naturel dans le monde sont importantes et la recherche pétrolière met à jour chaque année plus réserves de méthane qu'il n'en est actuellement consommé.

- Le méthane peut être aussi obtenu artificiellement à partir de déchets organiques (c'est le biogaz),

- A température ambiante, le méthane reste à l'état gazeux (il ne se liquéfie qu'à -160°C). A bord des véhicules, il est stocké sous pression dans des bouteilles. Il n'y a donc aucun risque d'explosion par effet "bleve" (explosion provoquée par la brusque évaporation, sous l'effet de la chaleur, d'une masse importante d'hydrocarbure liquide stockée dans un réservoir clos, tel qu'un réservoir de GPL ou d'essence),

- Les réserves de gaz naturel fossile dans le monde sont importantes, et le biogaz est une source additionnelle.

- Des émissions réduites : 25% d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) en moins que les autres carburants.

Amélioration de la qualité de l'air : aucune fumée ni oxydes de soufre, ni plomb, ni particules et pratiquement pas d'oxydes d'azote.

- Le GNC réduit également les vibrations des véhicules, améliorant ainsi le confort des passagers et des conducteurs.

- Le GNC est excellent pour la durée de vie du moteur qui présente un fonctionnement particulièrement souple qui réduit l'usure des véhicules.

- Le GNC démarre à toutes les températures sans surconsommation quand il tourne à froid.

- Les véhicules au GNC sont aussi plus silencieux que les autres (-5 à -8 décibels). [4]

Compte tenu de ces éléments et des caractéristiques du GNC, il n'existe aucune restriction concernant l'accès aux parkings souterrains pour les véhicules fonctionnant au GNC.

Tous ces avantages font que le GNC constitue véritablement la solution alternative aux carburants liquides traditionnels issus du pétrole. Immédiatement disponible.

Son utilisation, qui ne nécessite pas de transformation majeure du moteur, présente des avantages pour l'environnement en réduisant les émissions de polluants à la sortie du pot d'échappement, surtout dans le cas d'un véhicule dédié à l'usage de ce carburant. [5]

1.7 Inconvénients du gaz naturel :

- Le problème du stockage et de l'approvisionnement :
- Les problèmes de poids et d'encombrement. Ce handicap ainsi que celui de la perte de puissance (10% en moyenne) par rapport à l'essence pourraient être corrigés à l'avenir par des innovations à l'étude.
- Le problème d'autonomie ; les véhicules avec une motorisation adaptée possèdent des réservoirs gonflés à 200 bars qui leur offrent une autonomie de 400 km
- Le risque qui est du aux hautes pressions (> 200 bars) du réservoir du véhicule et de la station de remplissage contrairement au GPL qui est stocké entre 2 et 10 bar.
- Les moteurs actuels au GNC utilisent le cycle de Beau de Rochas et non pas le cycle Diesel, ce qui leur est défavorable en terme de rendement, donc en terme d'émission de CO₂. [6]

1.8 Principe de fonctionnement de moteur 4 temps :

Le moteur à allumage commandé (AC) est l'un des membres éminents de la grande famille des moteurs alternatifs à combustion interne, c'est-à-dire des moteurs qui produisent du travail par action directe sur un piston de la pression provenant de l'inflammation d'un mélange combustible, avec transformation du mouvement alternatif en rotation par l'intermédiaire d'un système bielle-manivelle. Le terme « allumage commandé » vient de ce que l'inflammation est initiée au moyen d'une étincelle, généralement d'origine électrique, en un moment bien déterminé du cycle. L'alimentation avec des mélanges homogènes d'air et de vapeur de carburant est indispensable pour assurer un bon allumage, ce qui impose des carburants de bonne volatilité, telles les essences de pétrole, d'où son appellation, plus familière, de « moteur à essence ». Son omniprésence dans le domaine de la traction routière, et particulièrement dans celui de l'automobile, est à l'origine de sa grande popularité ; rares sont les propulseurs capables actuellement de le concurrencer dans cette utilisation.

Fonctionnement :

Cycle à 4 temps

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

➤ Temps 1. Admission :

Elle se produit alors que le piston descend du PMH au PMB, créant ainsi une dépression dans le cylindre et l'aspiration du mélange carburé ou de l'air dans le cas particulier des moteurs à injection directe. Les vitesses des gaz sont plutôt élevées (la

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

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

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

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

➤ Temps 2. Compression-allumage :

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

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

➤ Temps 3. Combustion-détente :

La combustion se développe et la pression croît rapidement pour arriver normalement à son maximum une dizaine de degrés après le PMH, atteignant des valeurs supérieures à 60 bars à pleine charge. Les gaz sont à ces moments très chauds (2 000 à 3 000 K) et les transferts thermiques vers les parois sont intenses. Le piston descend ensuite vers le PMB, la pression et la température des gaz décroissent en même temps que du travail est fourni au piston. Le taux de détente est déterminant pour le rendement et certains concepts ont été imaginés pour profiter au mieux de cette phase (cycle de Miller).

➤ Temps 4. Échappement :

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

CHAPITRE 2:

Performances du moteur au GNC

2.1. Particularités liées à la combustion sur moteur à gaz naturel

Pour illustrer ce point, nous choisissons délibérément ici de comparer quelques caractéristiques intrinsèques du méthane (principal constituant du gaz naturel) et d'une essence classique (tableau 3.1). Lorsque les données relatives à l'essence ne sont pas disponibles, nous retenons, pour la comparaison, un hydrocarbure liquide, par exemple l'isooctane. [7]

Tableau 2.1 : Caractéristiques comparées du méthane et d'une essence classique. [7]

Caractéristiques	Méthane	Essence classique
Indice d'octane	130	95
Pouvoir calorifique massique (kJ /kg)	50 009	42 690
Contenu énergétique du mélange carburé (kJ/dm ³)	3,10	3,46
Limite inférieur d'inflammabilité (ϕ)	0,50	0,60*
Vitesse laminaire de combustion, richesse 0,80(cm/s)	30	37,5*
Energie minimale d'allumage (MJ)	0,33	0,26**
Température adiabatique de flamme	2 227	2 266**

* Donnée relatives a l'isooctane

** Donnée relatives au butane

2.2 Indices d'octane :

Il n'est pas possible de réaliser sur un moteur CFR, des mesures normalisées d'indice d'octane RON ou MON. Aussi a-t-on proposé, au cours des années 1970, une procédure spécifique conduisant à un "indice de méthane". Aujourd'hui, ces techniques ne sont plus utilisées. On se contente d'estimer, par extrapolation, des indices RON et MON du méthane qui seraient respectivement de l'ordre de 130 et 115.

La très forte résistance à l'auto-inflammation du méthane conduit à orienter, de façon logique, l'usage du GNC vers des moteurs à allumage commandé, avec initiation de la flamme par étincelle.

2.3. Allumage et propagation de la flamme :

L'énergie minimale d'allumage du méthane par étincelle est nettement plus élevée que celle des autres hydrocarbures. L'adaptation d'un moteur au gaz naturel impliquera par conséquent le choix d'un allumage performant (bobine de plus forte capacité).

Par ailleurs, le méthane présente un domaine d'inflammabilité plus large que les autres hydrocarbures; sur moteur, il permettra donc un fonctionnement en mélange plus pauvre, ce qui sera mis à profit dans certaines réalisations, notamment sur des véhicules industriels.

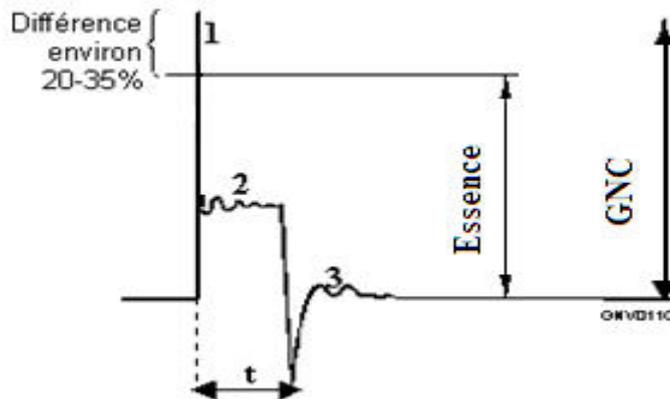


Fig2.1 Signal de tension à la bougie, comparaison essence/GNC [8]

Le mélange de gaz naturel et d'air étant plus "sec" à une résistance électrique plus élevée, il s'ionise moins bien, l'étincelle entre les électrodes de la bougie devra être assez forte pour vaincre cette résistance. On choisira donc des bobines d'allumage de plus forte capacité capable de produire une énergie de 100 à 110 MJ (contre 30 à 40 pour un moteur à essence classique).[8]

L'étincelle ne peut se propager d'une électrode à l'autre qu'en présence d'une haute tension suffisante. Au point d'allumage, la tension qui règne aux électrodes de la bougie augmente subitement de zéro à la tension d'éclatement (1). Dès que l'étincelle jaillit, la tension à la bougie retombe à la tension de combustion (2). Pendant la durée « t » de combustion de l'étincelle d'allumage, le mélange air-carburant peut s'enflammer. Lorsque l'étincelle s'éteint, la tension s'annule sous forme d'oscillations amorties (3).

➤ **L'avance :**

La combustion du gaz naturel étant plus lente que celle de l'essence, On doit donc anticiper l'avance, afin d'harmoniser le moment de la pression dans le cycle de travail en comparaison avec l'essence.

L'avance à l'allumage par rapport au réglage essence : 0° ralenti à chaud. Et +6° à la puissance maximum.

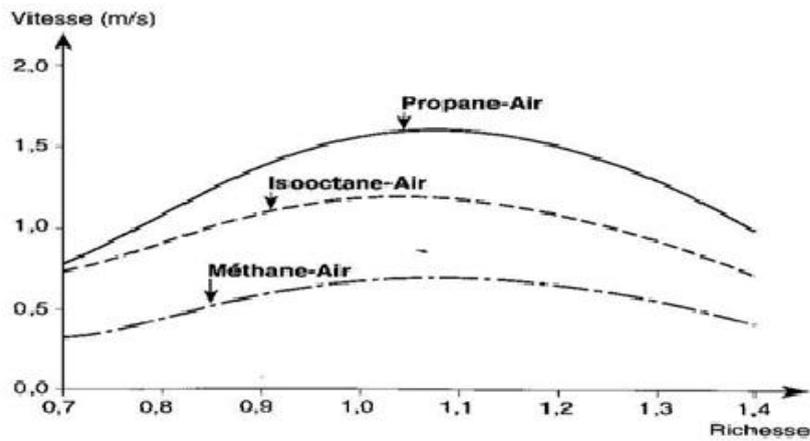


Fig2.2 : Vitesse laminaire de combustion (m/s) en fonction de la richesse du méthane, du propane et de l'isooctane (condition initiales : pression : 30bar, température : 900K). [9]

La combustion du méthane est relativement lente (fig2.2); cette particularité peut constituer un facteur de détérioration des performances à cause, par exemple, d'un accroissement des transferts thermiques aux parois. On combattra cette tendance en agissant sur les conditions aérodynamiques (turbulence). Il faut noter enfin que la combustion moins rapide du méthane peut contribuer à une réduction du bruit de combustion, grâce à un gradient de pression moins prononcé.

2.4 Performances du moteur GNC :

2.4.1 Particularités du moteur lors du fonctionnement en GNC:

Le carburant stocké sous forme de gaz naturel comprimé occupe une capacité naturellement supérieure à celle d'un carburant liquide, ce qui constitue un handicap réel sur le rayon d'action qui se trouve réduit de manière significative à volume égal embarqué. [10]

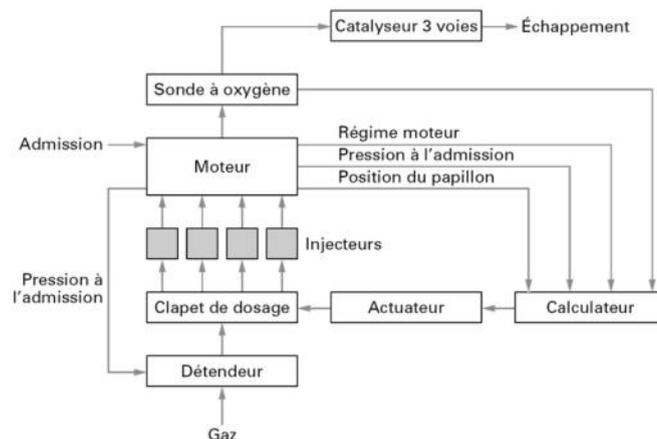


Fig2.3 : synoptique du fonctionnement au gaz naturel

L'inflammation du méthane par étincelle nécessite une énergie d'allumage supérieure à celle requise dans le cas d'un carburant liquide (essence) et sa vitesse de combustion, qui demeure

plus faible que celle de l'essence, peut constituer un handicap pour les performances du moteur par suite de l'augmentation des échanges thermiques aux parois.

Le PCI massique du GNC est supérieur de 10 % à celui des carburants liquides conventionnels, mais le moteur à bicarburation n'est pas optimisé pour un fonctionnement au GNC. Il en résulte une chute de puissance de l'ordre de 15 % dans la mesure où le mélange réactif méthane-air injecté sous forme gazeuse présente un pouvoir calorifique volumique inférieur à celui obtenu, dans les mêmes conditions, pour un carburant essence. En revanche, l'état gazeux du GNC neutralise les désagréments éventuels qui sont susceptibles d'apparaître lors du fonctionnement à froid du moteur. De plus, l'indice d'octane élevé du GNC permet d'envisager une augmentation du taux de compression de l'ordre de un à deux points et un accroissement associé du rendement d'un moteur GNC dérivé du moteur à essence qui serait optimisé à ce carburant.

Le rendement du moteur GNC fait, par contre, l'objet d'une chute significative par rapport à celui d'un moteur Diesel turbosuralimenté qui constitue la référence usuelle en matière de rendement.

Ce déficit marqué est, bien entendu, inhérent au mode de combustion amorcée par étincelle dans un cycle à allumage commandé. Le concept de combustion en mélange pauvre avec catalyseur à oxydation peut permettre de remédier en partie à ce handicap en limitant les pertes à un niveau de l'ordre de 10 %.

Cette approche constitue une voie séduisante pour les applications urbaines, dans la mesure où l'objectif vise alors à réduire en premier lieu les émissions de polluants ainsi que les nuisances sonores.

2.4.2 Pression moyenne effective :

Dans le cas de l'utilisation d'un combustible gazeux d'indice de méthane supérieur à un niveau dépendant du motoriste (70 à 80) et quel que soit le mode d'introduction du gaz dans le cylindre, haute ou basse pression, le même niveau de pression moyenne effective que celui du même moteur brûlant un combustible liquide, peut être réalisé (de l'ordre de 22 bars sur un moteur industriel). Cela implique, dans le cas du moteur Diesel gaz basse pression, le maintien de la richesse du mélange à un niveau constant et donc son contrôle rigoureux.

2.4.3 Rendement et pression maximale de cycle :

Au point nominal d'adaptation du moteur, généralement point de pleine charge, les niveaux de rendement atteints sont les mêmes, que le moteur brûle un combustible liquide ou gazeux. A charge partielle, le rendement devient légèrement inférieur en combustion gaz (fig2.5).

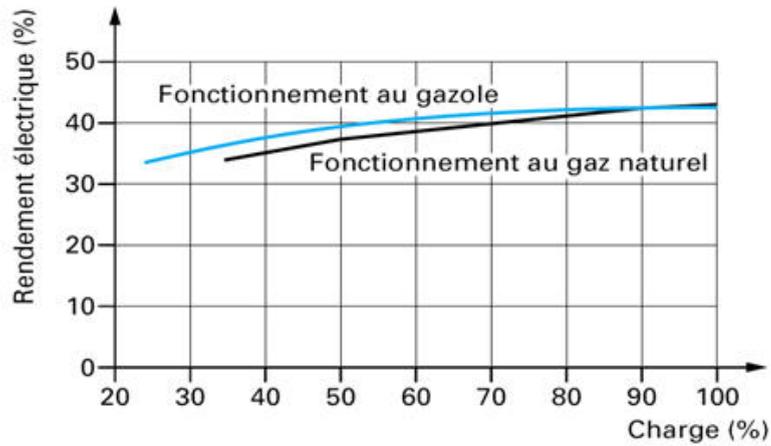


Fig2.4: Rendement comparé en fonction de la charge d'un moteur industriel alimenté en combustible liquide ou gazeux.

Couple en fonction de la richesse

A partir de la fig2.5 on observe que pour le même moteur alimenté au gaz naturel ou à l'essence, on enregistre une chute de couple au gaz naturel, $C_{max}=89$ Nm au gaz, $C_{max}=107$ Nm à l'essence. [11]

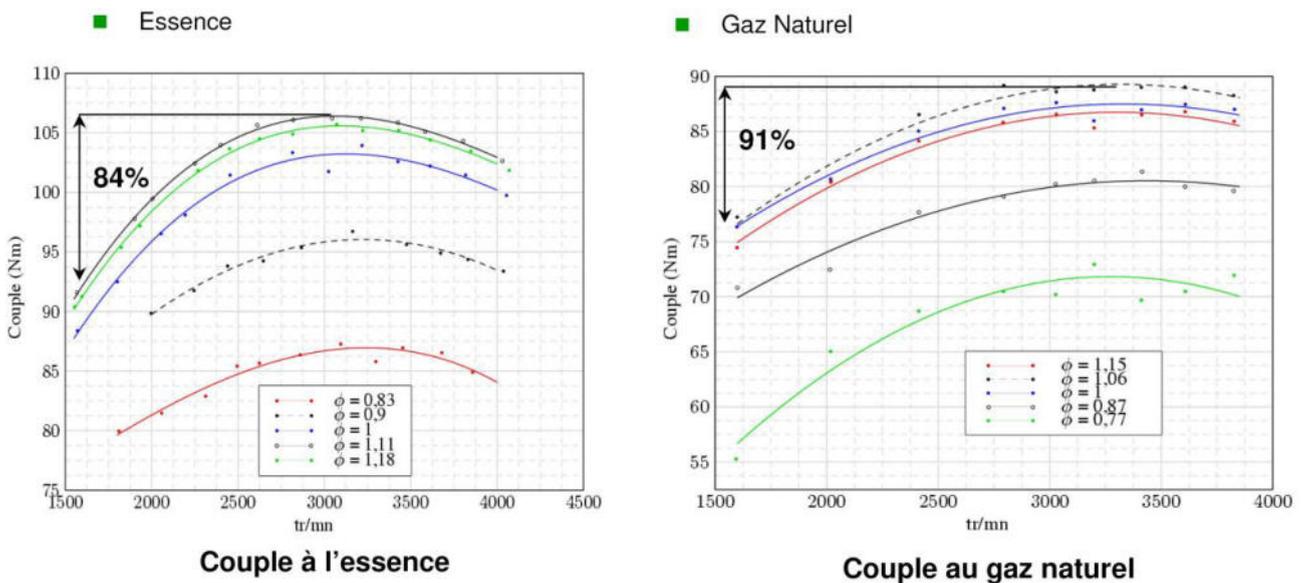


Fig2.5 : Couple en fonction de la richesse (essence et GNC).

Le rendement du moteur GNC fait, par contre, l'objet d'une chute significative par rapport à celui d'un moteur Diesel turbosuralimenté qui constitue la référence usuelle en matière de rendement. Ce déficit marqué est, bien entendu, inhérent au mode de combustion amorcée par étincelle dans un cycle à allumage commandé. Le concept de combustion en mélange pauvre avec catalyseur à oxydation peut permettre de remédier en partie à ce handicap en limitant les pertes à un niveau de l'ordre de 10 %. Cette approche constitue une voie séduisante pour les applications urbaines, dans la mesure où l'objectif vise alors à réduire en premier lieu les émissions de polluants ainsi que les nuisances sonores.

Le couple moteur en fonction de la puissance et du régime moteur :

Pour le graphe 2.7 on peut tirer le tableau 2.2 :

Tableau 2.2 Couple en fonction du régime

Régime (tr.min ⁻¹)	4000	4500	5000	5500
Couple (N.m)	138 ± 2	134 ± 2	125 ± 2	121 ± 2

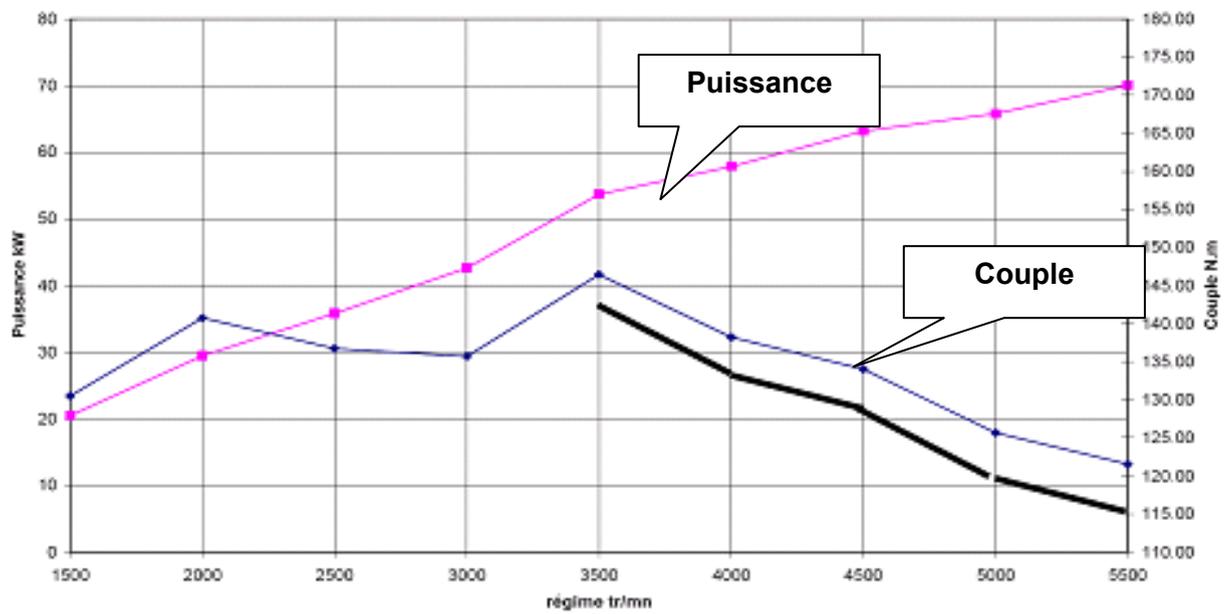


Fig2.6: Performances du moteur GNC

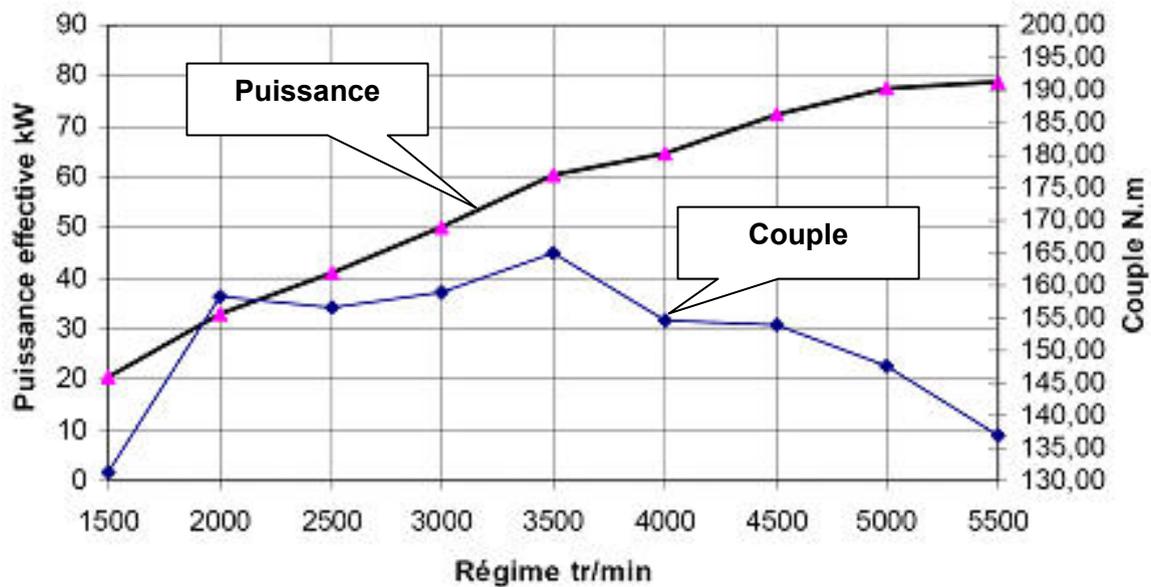


Fig2.7 : Performances du moteur essence

Tableau 2.3 : Différence de puissance entre le fonctionnement essence et GNC.

	Moteur essence (kW)	Moteur GNC (kW)	Différence. (kW)	Différence en % par rapport au moteur essence
Puissance au régime de couple maxi.	60	53,7	6,3	10,5%
Puissance maxi	79	70	9	11,4

➤ Rendement global du moteur à 3500 tr.min-1:

Carburant	Puissance fournie par le carburant (kW)	Puissance effective	Rendement global	Différence en % par rapport au moteur essence
GNC	213	54	$54/213 \times 100 = 25,35\%$	$\frac{(26,77 - 25,35)100}{26,77} = 5,3\%$
Essence	226	60,5	$60,5/226 \times 100 = 26,77\%$	

2.5 Les émissions de polluants :

Pendant la combustion se forment des composés qui polluent l'environnement, et dont les quantités émises doivent donc être réduites Ces polluants principaux sont de 4 types :

- Oxydes d'azote : NOx
- Monoxyde de carbone : CO
- Hydrocarbures imbrûlés : HC
- Particules.

➤ Les oxydes d'azote

La combustion crée à partir de l'azote et de l'oxygène de l'air de l'oxyde d'azote NO. Ce gaz, instable, s'oxyde en NO₂ dans l'atmosphère, et crée en présence d'hydrocarbures et de soleil un brouillard corrosif et dangereux pour la respiration.

Comme plusieurs combinaisons d'azote et d'oxygène coexistent pendant et après la combustion, on les désigne d'un terme générique : NO_x.

La quantité de NO_x formée pendant la combustion dépend de deux facteurs principaux :

- Le niveau de température
- Le temps que passe le mélange à cette température pendant la combustion.

La formation de NO_x est maximum lorsque la température de combustion est maximale. Si on fonctionne avec un rapport stœchiométrique et que l'on enrichit le mélange (plus de gaz, moins d'air), la quantité de NO_x diminue. En effet, il y a moins d'oxygène disponible, des températures plus faibles, donc moins d'oxydation de l'azote. Si on appauvrit le mélange (plus d'air et moins de gaz), la teneur en NO_x augmente au départ. Ensuite, elle diminue car l'excès d'air fait chuter la température de combustion.

➤ Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz inodore et incolore produit par une combustion incomplète. Même en faible concentration, il prend la place de l'oxygène dans le processus de la respiration, et crée des asphyxies pouvant être mortelles. Ce dernier sera oxydé dans l'air en CO₂.

La création de monoxyde de carbone est causée par les facteurs suivants :

- Air de combustion insuffisant (mélange riche)
- Mauvais mélange air gaz (hétérogénéité)
- Temps d'oxydation du carbone insuffisant
- Refroidissement de la combustion avant qu'elle soit complète.

Il faut donc éviter les mélanges riches et hétérogènes, ainsi que le refroidissement brusque qui peut intervenir au contact des parois de cylindres, si le refroidissement est assuré à une température trop basse (moteur froid).

➤ Hydrocarbures imbrûlés

Les imbrûlés HC se forment dans les mêmes conditions que le monoxyde de carbone (CO).

➤ Particules

Les particules sont créées par la combustion incomplète de gazole et fuel lourds. Elles sont négligeables et pratiquement inexistantes dans un moteur à gaz utilisant le gaz du réseau.

Les émissions de particules réglementaires sont nulles dans le cas des moteurs à gaz naturel. [8]

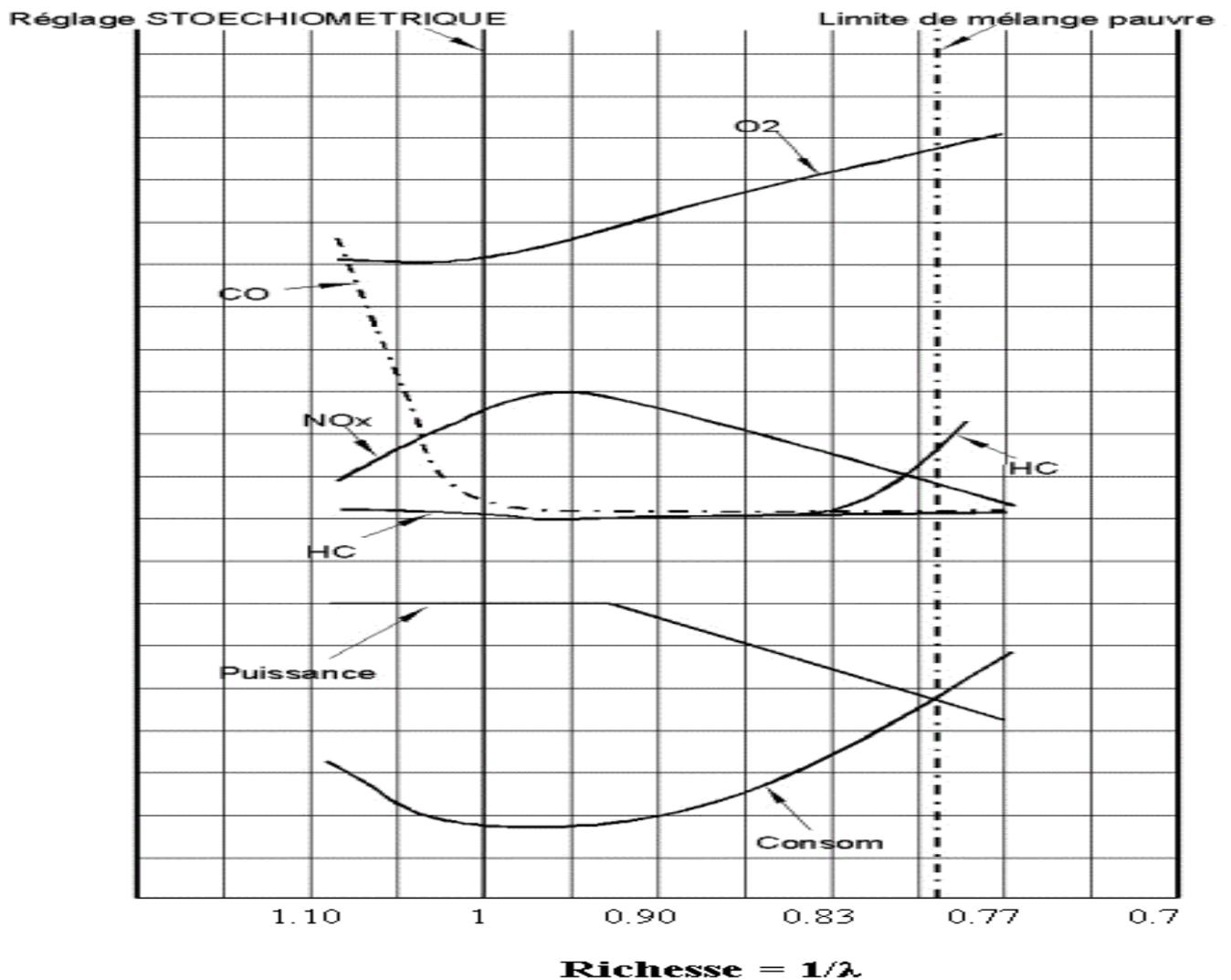


Fig2.8: Emissions en fonction de la richesse

Au plan des polluants, on observe que les émissions de fumées et de particules inhérentes à un moteur Diesel disparaissent en combustion GNC, tandis que les nuisances acoustiques sont fortement réduites.

Les émissions d'oxyde d'azote, qui sont très basses dans le cas d'un catalyseur trifonctionnel, demeurent à un niveau inférieur à celui fixé par les normes dans le cas d'une combustion en mélange pauvre.

La composition des hydrocarbures imbrûlés est d'au moins 90 % de méthane et ils ne comportent pas de composés aromatiques contrairement à l'essence. Le méthane est, par contre, un gaz à effet de serre direct au même titre que les dioxydes de carbone et d'azote qui sont responsables du réchauffement de l'atmosphère. Toutefois, si les moteurs alimentés au GNC émettent davantage de méthane, la production associée de dioxyde de carbone est moindre que dans le cas d'un carburant conventionnel et le rapport CO_2/CH_4 à l'échappement demeure favorable au GNC.

La figure 2.9 qui reflète les niveaux comparés d'émissions de gaz à effet de serre en fonction du carburant, montre que le GNC conserve un avantage net sur l'essence et moindre sur le gazole. [6]

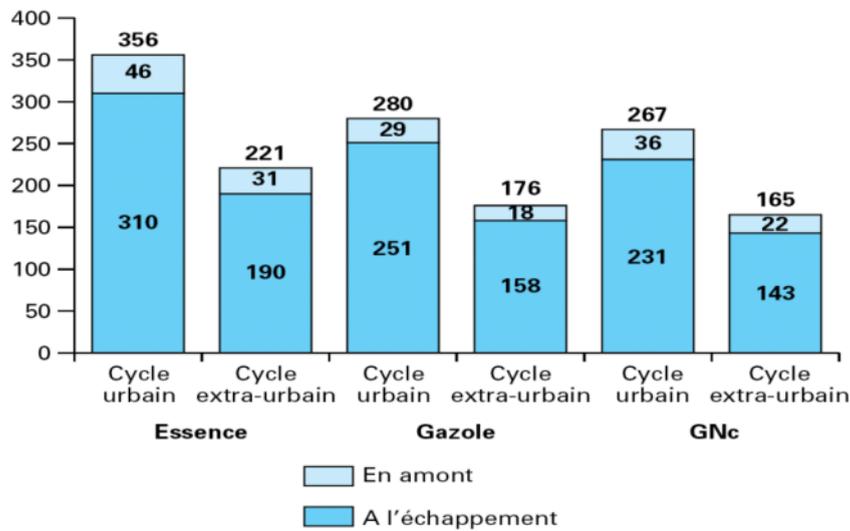


Fig2.9 : Émissions comparées de gaz à effet de serre en fonction du carburant du puits à la roue.

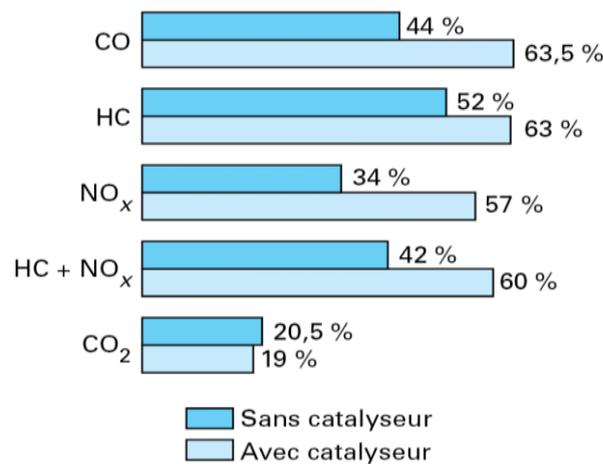


Fig2.10: Réduction des émissions de polluants d'un moteur GNC à bicarburant par rapport à la filière essence

La figure 3.11 illustre les écarts sensibles d'émissions de polluants en faveur du GNC à l'échappement d'un moteur bicarburant non optimisé et l'on constate une diminution marquée de l'ensemble des émissions.

2.6 Technologie du GNC :

Introduction :

Compte tenu de l'indice d'octane élevé du GNC, sa combustion est réalisée généralement par une bougie sur les moteurs à allumage commandé.

- Les véhicules légers adoptent des moteurs à essence modifiés (système d'admission de gaz par détentes successives et électrovanne). Le rapport volumétrique n'est que faiblement augmenté par rapport à l'essence et ce pour permettre le fonctionnement avec les deux carburants.
- Pour les moteurs à essence la bicarburant est possible et généralement réalisée.

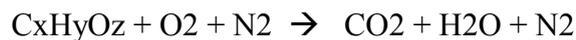
A ce jour, Il n'existe que quelques moteurs dédiés au gaz et donc l'utilisation du GNC comme carburant nécessite donc des modifications lourdes telles que :

- Changement ou modification du répartiteur d'admission pour placer les injecteurs de gaz (ou carburateur) et du boîtier papillon qui va régler la charge.
- Changement de tout le circuit carburant : pompe, mise en place d'un détendeur, filtre à huile sur le circuit gaz.

2.6.1 Définitions :

➤ *Stœchiométrie et mélange pauvre*

Le rapport stœchiométrique est le rapport des masses **air/carburant** pour avoir une combustion complète idéale selon l'équation classique de la combustion :



Ce rapport est de 14 à 14,5 pour les hydrocarbures liquides (essence, gazole) et de 13,8 à 17 pour le GNC.[10]

On appelle mélange stœchiométrique un mélange dont la quantité d'air est exactement nécessaire à la combustion (pas d'excès).

On dit qu'un mélange est pauvre quand la quantité d'air admise dépasse celle nécessaire à la combustion (excès d'air).

On dit mélange riche un mélange où la quantité d'air entrante dans le mélangeur inférieure à celle nécessaire à la combustion.

2.6.2 Les techniques d'alimentation :

Les techniques d'alimentation paraissent a priori plus aisées à mettre en œuvre avec un carburant gazeux comme le GNC qu'avec l'essence à l'état liquide. En réalité, l'introduction d'une quantité précise de carburant, adaptée à chaque point de fonctionnement et ceci quelle que soit l'origine du gaz, est parfois difficile à réaliser problèmes de contrôle de richesse, de fiabilité du doseur et du détendeur, compte tenu des grandes variations de débit. En outre, des contraintes importantes sont imposées par le maintien d'une faible dispersion de richesse entre les cylindres, la minimisation des pertes au remplissage.

2.6.3 L'injection électronique :

Ce système se généralise pour sa robustesse, sa précision, le bouclage possible avec une sonde lambda. Un progrès important est à attendre de l'avènement de l'injection multipoints pour améliorer le dosage par cylindre.

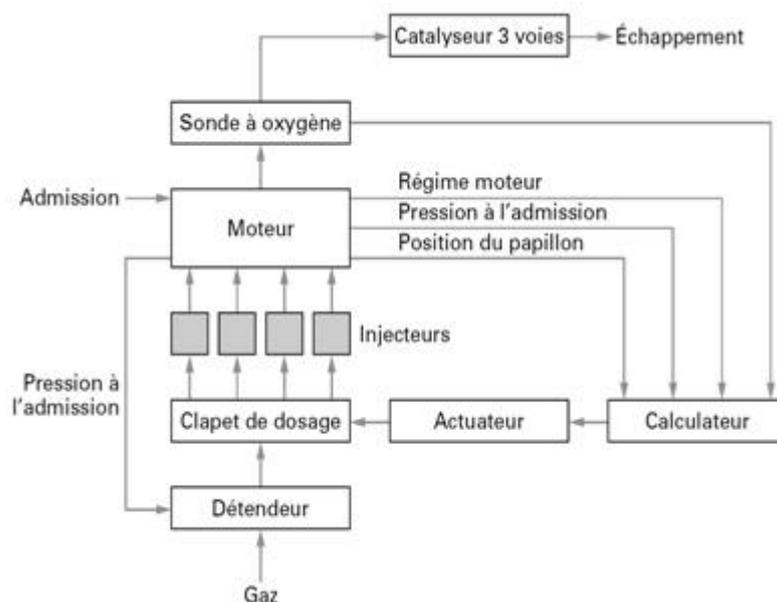


Figure 2.11 : Synoptique générale en fonctionnement GNC

Contrairement aux carburateurs, ces systèmes introduisent le carburant sous pression, ce qui permet un dosage plus précis de la quantité à injecter. En outre, la suppression du Venturi entraîne une diminution des pertes de charges à l'admission.

Bien sûr, comme sur les moteurs à essence, l'injection peut être réalisée soit de manière centralisée (monopoint), soit en amont de chaque cylindre (multipoint).

Parmi la technique monopoint, l'une des plus utilisées sur les véhicules de tourisme est désignée par le sigle GFI (Gaseous Fuel Injection). Le principe utilisé est un peu particulier : le carburant,

détendu à environ 7 bars, est dosé à l'aide de 7 injecteurs soniques, puis introduit dans le collecteur d'admission par le biais d'un seul "gicleur-injecteur".

Les systèmes monopoints équipant les véhicules industriels sont plutôt du type Tecjet de Deltec. De technologie plus classique, ils ne comprennent qu'un seul clapet doseur introduisant le gaz sous pression dans un mélangeur. La régulation du flux de gaz (figure 4.3) est gérée par le calculateur, d'après les données fournies par des capteurs et suivant les stratégies de contrôle développées sur le carburateur Deltec.

Les dispositifs d'injection multipoint présentent plusieurs avantages qui n'existent pas en monopoint. Ils minimisent, en effet, les risques de retour de flamme à l'admission, de même qu'ils améliorent la répartition du carburant entre les cylindres. Dans le procédé développé par Koltec et Necman, le gaz, dont la pression est contrôlée par un détendeur à deux étages, est dosé, puis distribué à chaque injecteur (figure 6.5). La gestion du flux de gaz introduit peut être effectuée en boucle ouverte ou fermée, suivant le calculateur utilisé. [12]

CHAPITRE3:

Le banc d'essai TE16

Dans ce travail, nous présentons la conversion en bicarburation essence/gaz du banc d'essai moteur TE16 équipé d'un moteur FORD 2271-E à 4 cylindres en ligne, à taux de compression de 8:1 ayant une cylindrée de 1098 cm³.

3.1 Description du banc d'essai TE 16 :

3.1.1 Généralités :

Le banc d'essai est conçu pour les moteurs standard FORD à essence, PETER PJ 1600 CC diesel, ou autres moteurs en option. Dans cette étude, on s'intéresse uniquement au premier moteur FORD.

Le banc d'essai dispose de :

- un dynamomètre électrique accouplé au moteur, qui sert à démarrer ce dernier. Une fois que le moteur est mis en marche, le dynamomètre devient générateur de courant.
- Une console de commande portant les instruments de mesure de certains paramètres du moteur.
 - Un oscilloscope qui permet l'obtention des diagrammes pression en fonction du volume P (v) et de l'angle P (θ).
 - Un réservoir d'air relié au carburateur par un tube flexible.
 - Un système de refroidissement comportant une pompe électrique.
 - Un réservoir de carburant placé à un niveau supérieur du sol.
 - Un calorimètre permettant le refroidissement des gaz d'échappement avant qu'ils soient évacués vers l'extérieur.
- un moteur Ford 1098 CC à essence.

3.1.2 Les différents organes du banc d'essai :

➤ *Dynamomètre :*

Les caractéristiques du dynamomètre sont :

- capacité 22.5 kW.
- Vitesse maximale 3600 tr/mn.
- Bras de levier 368 mm.
- Puissance disponible lors de l'entraînement des moteurs thermiques égale à 0.85 fois celle de la puissance de freinage.

Le dynamomètre est conçu pour fonctionner dans les deux sens de rotation. Il comporte un régulateur à thyristor; c'est une unité de récupération à quatre secteurs qui retourne l'énergie générée sous forme de courant alternatif au réseau.

Avec cet arrangement, il est possible de faire varier la vitesse, en appliquant un couple constant sur le régulateur et vice-versa.

Un tacho-générateur est monté sur le dynamomètre et est en liaison avec le régulateur à thyristor. La précision de la vitesse est réalisée à 0.1 % de la pleine échelle. Une cellule de charge, reliée au carter du dynamomètre, mesure le couple de renversement de ce dernier.



Fig3.1 : dynamomètre

➤ **Console de commande :**

La console est montée séparément au banc d'essai. Elle comporte les équipements nécessaires à l'ajustement de la charge et de la vitesse.

Le courant de charge et la vitesse sont donnés par des indicateurs analogiques.

Quatre indicateurs à affichage digital donnent.

- Le couple en N.m
- La vitesse en tr/mn.
- Le temps en sec.
- Le nombre total de tours.

Un boîtier est situé sur le côté gauche de la console pour l'alimentation en électricité. [13]

➤ **Oscilloscope :**

Comme il a été déjà signalé, l'oscilloscope nous permet d'avoir les digrammes $P = f(V)$ et $P = f(\theta)$ du moteur ceci après un réglage minutieux du codeur.

Le codeur est fixé sur un cache de sécurité, ce dernier est fixé au moteur du coté poulie où un axe en provenance de l'intérieur du moteur, plus précisément de l'axe du vilebrequin dépasse la poulie, pour que le codeur puisse être accouplé avec celui-ci. [14]



Fig3.2 : oscilloscope

➤ **Réservoir d'air :**

Le réservoir d'air est relié au carburateur par l'intermédiaire d'un tube flexible après passage par le filtre à air. Sur le réservoir se trouve un débitmètre visqueux d'eau colorée, gradué en millimètre d'eau ($\text{mm } H_2O$) donnant la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de réservoir.

Du coté gauche de ce dernier se trouve un orifice de décharge, de coefficient k_3 .



Fig3.3: Réservoir a air

➤ *Système de refroidissement :*

L'eau provenant du robinet est récupérée dans un bac, la pompe le fait monter vers le débitmètre en passant dans les conduites où se trouve un thermomètre.

Une fois l'eau traverse le débitmètre, elle entre dans le moteur en passant en premier lieu par la pompe qui la fait circuler dans le bloc moteur ainsi que la culasse. Un échange de chaleur se produit, l'eau froide venant de l'extérieur gagne de la chaleur par contre celle se trouvant à l'intérieur en perd, c'est le thermomètre qui le mentionne quand l'eau quitte le moteur pour regagner une autre fois le bac. Le surplus d'eau est évacué grâce à un orifice sur la partie supérieure du bac.



Fig3.4 : bac et pompe de refroidissement

➤ **Calorimètre des gaz d'échappement :**

Le calorimètre est en matière métallique ; c'est un échangeur de chaleur cylindrique contenant de l'eau qui circule de haut en bas. Dans ce cylindre existe plusieurs autres cylindres de diamètre inférieur permettant l'évacuation des gaz d'échappement.

La circulation de l'eau est à contre-courant, juste à l'entrée et sortie du calorimètre se trouvent deux thermomètres, sur la partie inférieure et la partie supérieure du calorimètre se trouvent deux fils de connexion au thermocouple. [15]



Fig3.5: calorimètre des gaz d'échappement

➤ **L'analyseur de gaz d'échappement :**

L'analyseur de gaz d'échappement **ETT 8.55** sert à l'analyse des gaz d'échappement de voitures, au contrôle ou au diagnostic du moteur.

L'appareil peut être utilisé sur les moteurs à essence à 4 temps et le moteur WANKEL à 4 temps.

En outre l'appareil **ETT** permet la mesure de la vitesse de rotation et de la température du moteur.

Les composants des gaz d'échappement analysés sont *CO*, *HC*, *CO2* et *O2*.

Cet appareil peut être utilisé individuellement ou en liaison avec des systèmes de test, des interfaces correspondantes sont prévues à cet effet. [16]



Fig3.6 : Analyseur de gaz

➤ **Réservoir de carburant**

Le réservoir de combustible est placé sur un support en acier comprenant un réservoir de 25 litres de combustible avec jauge de niveau, un filtre et un débitmètre volumétrique à une capacité 50, 100 et 200 centimètre cubes. A l'aide d'un chronomètre on peut mesurer la durée de la consommation de 50 CC donc le débit volumétrique. La liaison réservoir carburateur est assurée par un tuyau en matière plastique transparent.



Fig3.7 : réservoir a essence.

➤ **Le moteur :**

Le moteur qui fait l'objet de notre étude se caractérise par Marque Ford (essence).

- Type 2217
- Cylindrée 1098 CC.
- Taux de compression constant 8.
- Course 53.29 mm.
- Alésage 80.98 mm.
- 4 temps, 4 cylindres.
- Refroidi à l'eau.

Sur la culasse se trouve un capteur de pression (piézoélectrique). L'ouverture du papillon du carburateur (Le carburateur est de marque solex à simple corps) se fait à l'aide d'un bouton, se trouvant sur la console, marqué THROTTLE (accélérateur).

Le moteur est relié au dynamomètre par un manchon élastique. La poulie du moteur est marquée d'un trait blanc sur sa circonférence pour nous permettre de repérer le P.M.H.

Le contacteur d'allumage et les jauges de pression et de température d'huile du moteur sont disposés à proximité du moteur thermique. Pour une vitesse de rotation de 3600 tr/mn, il délivre une puissance de 22 kW.



Fig3.8 : moteur Ford

3.2 Les Composantes de kit pour l'alimentation en gaz naturel comprimé :

Pour faire la conversion de moteur il faut d'abord avoir le kit de GNC, ce kit est constitué de différentes composantes qu'on cite ci-dessous :

- La soupape de sécurité (surchauffe);
- L'électrovalve de coupure haute pression (dans le réservoir) ;

- Le détendeur à deux étages ;
- Le débitmètre de gaz et robinet de dosage ;
- L'électrovalve de coupure basse pression ;
- Le transducteur de jauge de carburant ;
- Le changement de mode automatique ;
- Le commutateur gaz-essence ;
- Le mélangeur air-gaz ;
- un réservoir cylindrique stockant du GNC à 200 bars ;
- La tuyauterie en inox.

CHAPITRE4: La Conversion du moteur en injection multipoint

Notre étude sur la conversion au GNC a été menée sur un moteur à essence ayant les mêmes caractéristiques que le moteur ford du banc d'essai TE16 mais à injection multipoint.

Les moteurs GNC et essence (bicarburation) offrent des avantages importants sur le plan économique (prix au litre de gaz). En outre le carburant (GNC) est propre (émissions de CO, HC et NOx inférieures aux moteurs à essence ; pas de plomb et traces infimes de soufre), et avec l'injection électronique GNC il n'y a pratiquement pas de perte de puissance par rapport à l'injection essence.

4.1 Principe de fonctionnement :

Le GNC est stocké dans un réservoir à l'état gazeux à haute pression. Détendu en gaz basse pression dans le réducteur de pression, il est envoyé aux valves d'injection par un boîtier de distribution.

L'électronique contrôle la quantité de GNC en agissant sur ce distributeur

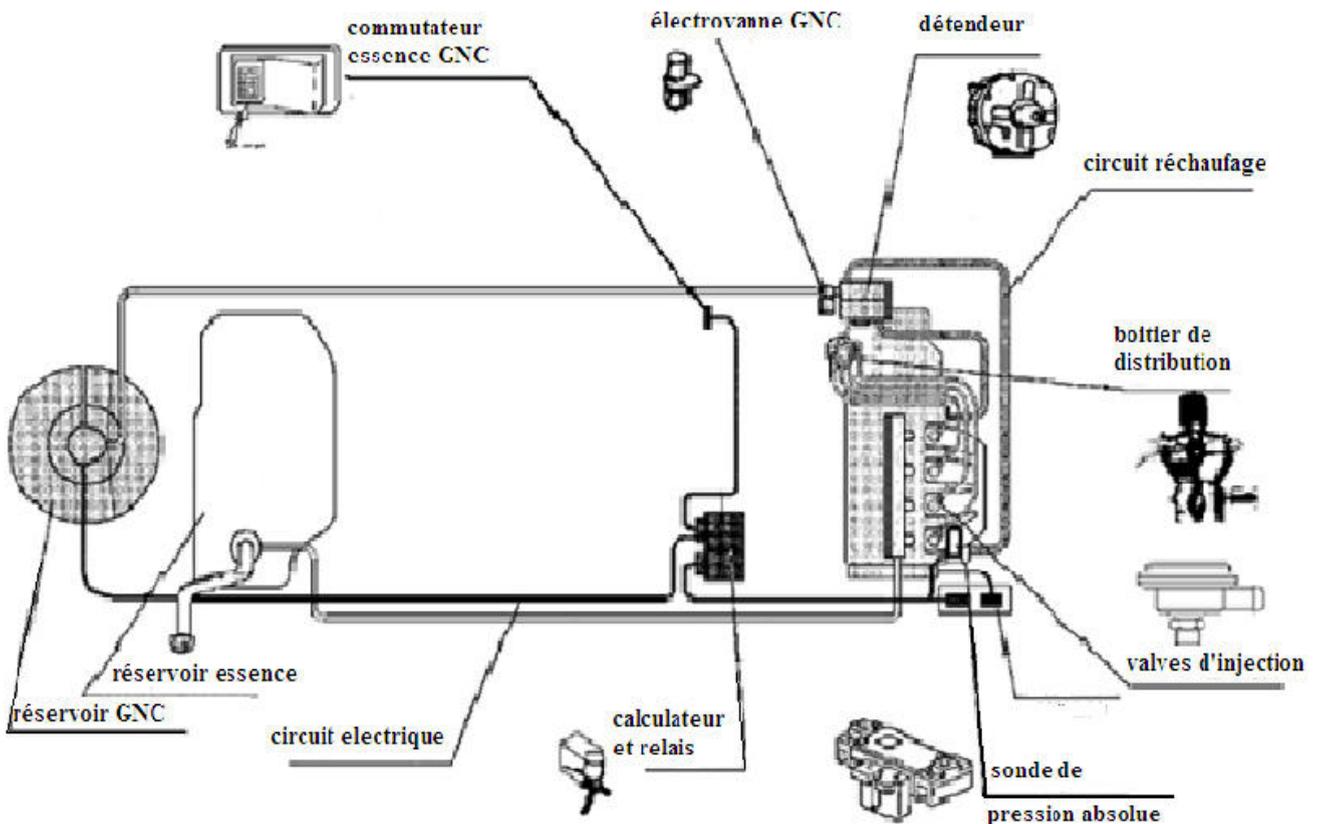


Fig4.1: Schéma de fonctionnement

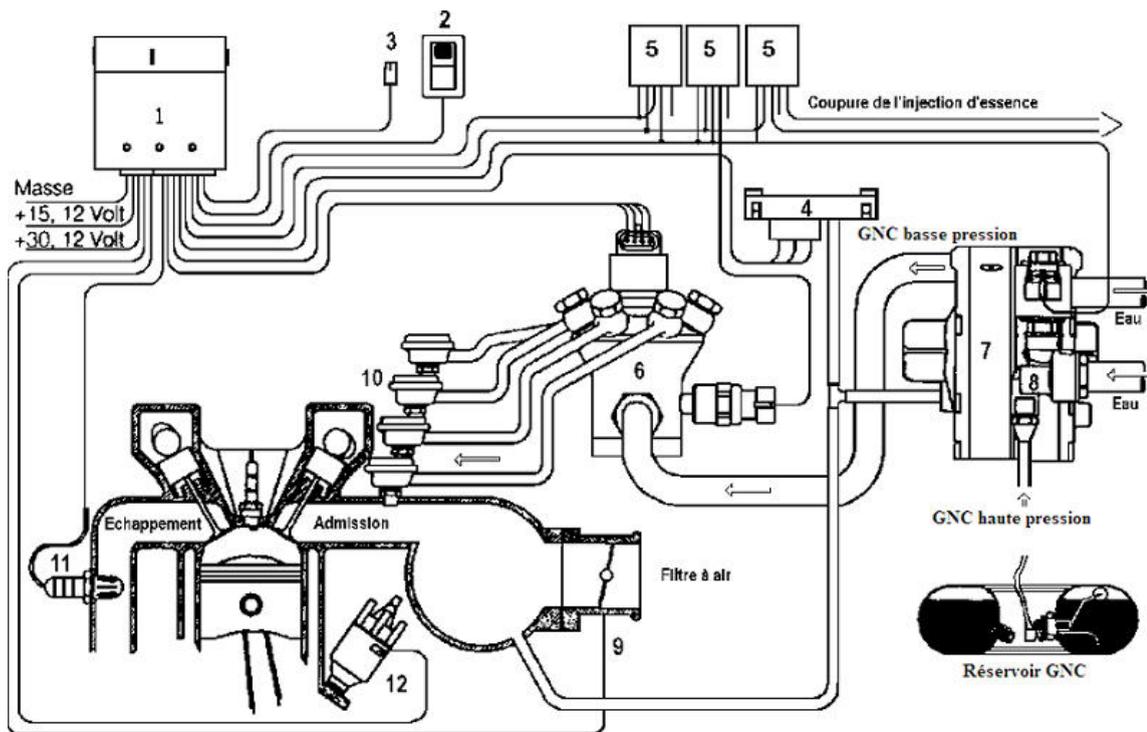


Fig4.2 : Agencement des différents composants [17]

Tableau4.1 : les différentes composantes

1	Calculateur GNC	7	détendeur de pression
2	Commutateur de sélection de carburant	8	Électrovanne de fermeture de GNC
3	Prise de diagnostic	9	Indicateur de position du papillon des gaz
4	Sonde de pression absolue	10	Valves d'injection de GNC
5	Relais	11	Sonde lambda
6	Boîtier de distribution	12	Signal de régime moteur

4.2 Les différentes composantes de kit GNC :

➤ L'électrovanne de fermeture de GNC :

Cette vanne 8 est fixée sur le détendeur de pression 7 (voir schéma "Agencement des différents composants")

La vanne de fermeture de GNC est une vanne à pilotage électromagnétique. Elle est commandée par le calculateur et autorise l'écoulement du gaz à l'état vapeur du réservoir vers le réducteur de pression. Le calculateur donne cet ordre dès le moment où l'on procède à la commutation au GNC.

La vanne de fermeture de gaz est une vanne "négative"; par conséquent, il convient de toujours prendre en compte le sens de l'écoulement; l'alimentation s'effectue sur la face inférieure (voir flèche).

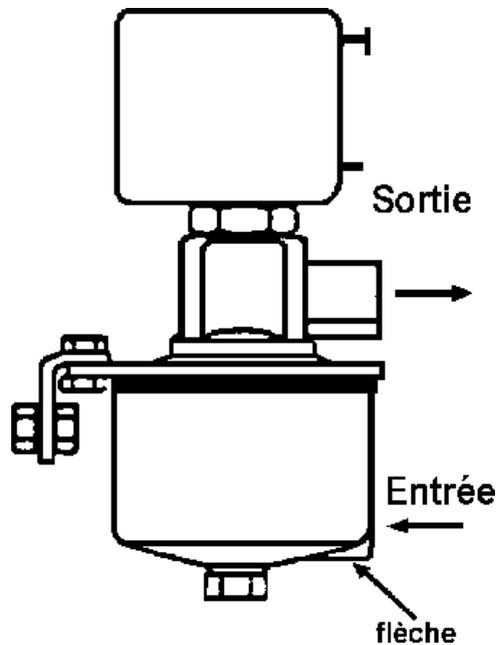


Fig4.3 : électrovanne de fermeture.

➤ Le détendeur de pression :

Le plan correspond à un état transitoire du fonctionnement ; les pressions de service sont juste atteintes dans les deux étages. Par conséquent les soupapes sont fermées.

La nomenclature de ce plan est donnée page précédente ci-dessus

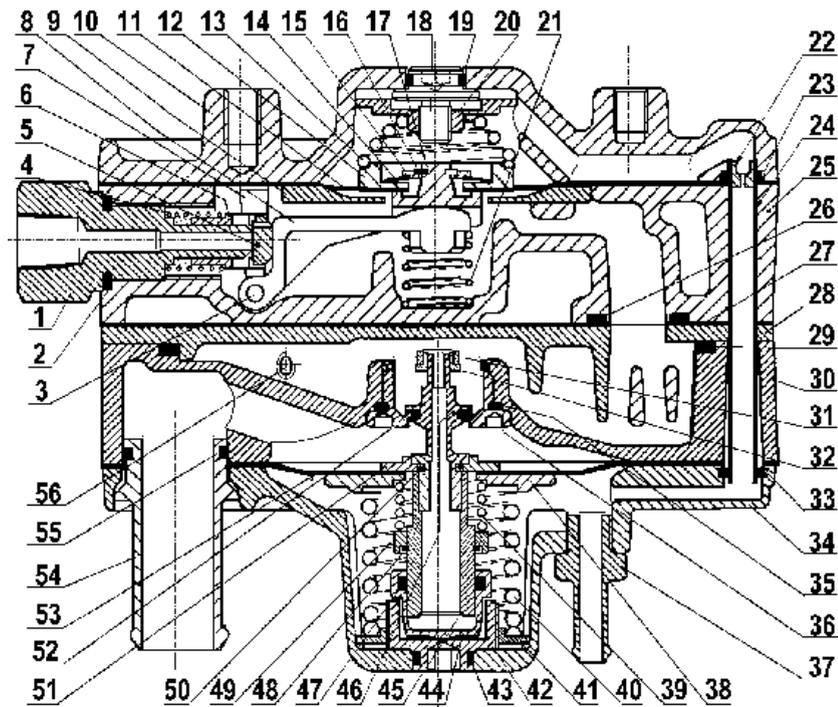


Fig4.4 : Plan du détendeur de pression

Tableau4.2 : Nomenclature du détendeur de pression. [17]

1	Siège de soupape du 1 ^{er} étage	29	Joint torique du boîtier du 2 ^{ème} étage
2	Joint torique	30	Boîtier du 2 ^{ème} étage
3	Axe du levier de 1 ^{er} étage	31	Palier de la soupape du 2 ^{ème} étage
4	Ressort du clapet de la soupape du 1 ^{er} étage	32	Guide soupape du 2 ^{ème} étage
5	clapet de soupape du 1 ^{er} étage	33	Joint torique
6	Support du clapet de la soupape du 1 ^{er} étage	34	Couvercle du 2 ^{ème} étage
7	Support de l'axe du levier	35	Joint torique
8	Levier du 1 ^{er} étage	36	Siège de soupape du 2 ^{ème} étage
9	Couvercle de l'échangeur de chaleur	37	Raccord à vis à dépression
10	Couvercle du 1 ^{er} étage	38	Retenue des ressorts du 2 ^{ème} étage
11	Membrane du 1 ^{er} étage	39	Ressort de sécurité du 2 ^{ème} étage
12	Siège de la soupape de surpression	40	Ressort de soupape du 2 ^{ème} étage
13	Ressort conique du 1 ^{er} étage	41	Retenue de ressort de soupape
14	Rondelle ressort de surpression	42	Vis de réglage du 2 ^{ème} étage

15	Rondelle d'appui	43	Joint torique
16	Circlips	44	Cylindre
17	Soupape de surpression	45	Piston plongeur
18	Vis de réglage du 1 ^{er} étage	46	Soupape du 2 ^{ème} étage
19	Joint torique de l'écrou de réglage	47	Joint
20	Retenue de ressort de 1 ^{er} étage	48	Circlips
21	Ressort du levier du 1 ^{er} étage	49	Retenue de ressort de sécurité
22	Restricteur de dépression	50	Joint torique du piston plongeur
23	Joint torique	51	Pince de membrane
24	Conduite de dépression	52	Joint torique
25	Corps de l'échangeur de chaleur	53	Membrane du 2 ^{ème} étage
26	Joint torique	54	Raccord à vis de sortie de gaz
27	Bourrage du collecteur d'eau	55	Joint torique
28	Couvercle du collecteur d'eau	56	Bouchon de vidange du réglage de pression

➤ *Fonctionnement du premier étage :*

Quand aucune pression de gaz n'est présente, la soupape du premier étage est toujours ouverte. C'est le ressort conique du premier étage (13) qui déplace la membrane du premier étage (11) à l'encontre de la force du ressort (21) du levier du premier étage (8). De ce fait, le levier du premier étage (8) articulé autour de l'axe (3) ouvre la soupape du premier étage.

Lorsque le GNC arrive à la pression du réservoir à l'entrée de la soupape du premier étage, la membrane (11) du premier étage se déplace à l'encontre de la force du ressort conique (13). Le levier du premier étage (8) poussé par le ressort (21) suit le mouvement de la membrane (11). Le levier (8) pousse le clapet (5) et ferme la soupape du premier étage.

Le premier étage est réglé sur une pression de 2,4 bars lorsque la pression collecteur est de 1 bar. Les variations de la pression collecteur font descendre la pression de GNC dans le premier étage. Cette pression est de 1,6 bar lorsque la pression collecteur est de 0,2 bar.

Le réglage de la pression de consigne (2,4 bar) s'effectue en tournant la vis de réglage du premier étage (18).

➤ *Fonctionnement du deuxième étage :*

Etant donné que la première diminution de pression s'effectue dans le premier étage du détenteur, il se peut que la pression réglée y subisse encore certaines variations. Pour cette raison, un

second réglage de pression est souhaitable pour obtenir une pression parfaitement constante. Ce réglage est assuré dans le deuxième étage du détendeur.

La pression du premier étage est appliquée via la soupape ouverte du deuxième étage (46) à la membrane du deuxième étage (53). La pression va augmenter dans ce deuxième étage car le débit traversant le raccord de sortie de gaz (54) est faible. Lorsque la pression atteint la pression de consigne de 1,96 bar, la membrane (53) se déplace à l'encontre du ressort du deuxième étage (40). De ce fait, la soupape du deuxième étage (46) se ferme.

Les variations de la pression collecteur font descendre la pression de GNC dans le deuxième étage jusqu'à 1,16 bar.

Le réglage de la pression de consigne (1,96 bar) s'effectue en tournant l'écrou de réglage du deuxième étage (42).

➤ *Rétroaction de la soupape du deuxième étage :*

Etant donné le sens de fermeture de la soupape du deuxième étage (46), la pression du premier étage peut exercer une influence sur l'équilibre de cette soupape, donc sur la pression du deuxième étage, pour prévenir ce phénomène, la soupape est tubulaire permettant à la pression du premier étage de s'exercer des deux cotés de la soupape (46). Il en résulte que l'ouverture et la fermeture de cette soupape sont indépendantes de la pression de premier étage.

➤ *Protection contre la surpression du premier étage :*

Dans la chambre du premier étage se trouve une quantité de gaz qui est enfermée entre deux soupapes (5) et (46). De par leurs dispositions dite "négatives", elles ne peuvent pas s'ouvrir sous l'action d'une surpression de ce gaz. Pour cette raison, le premier étage est équipé d'une soupape de sécurité (17). Ce dispositif intervient lorsqu'une pression de 3,5 bars est atteinte.

Lorsque cette pression est atteinte, la soupape de surpression (17) est appuyée sur la vis de réglage (18). Si la pression augmente, la membrane (11) ainsi que le siège de la soupape de surpression (12) se déplacent à l'encontre de la force du ressort conique (13) ouvrant ainsi la soupape.

L'excès de gaz peut, s'évacuer via la conduite de dépression (24) et le raccord à dépression (37) vers le collecteur d'admission.

➤ **Le boîtier de distribution :**

Le GNC arrive du détendeur sous forme gazeuse à une pression comprise entre 1,96 et 1,16 bar et *entre dans le boîtier de distribution.*

➤ *Plan du boîtier de distribution*

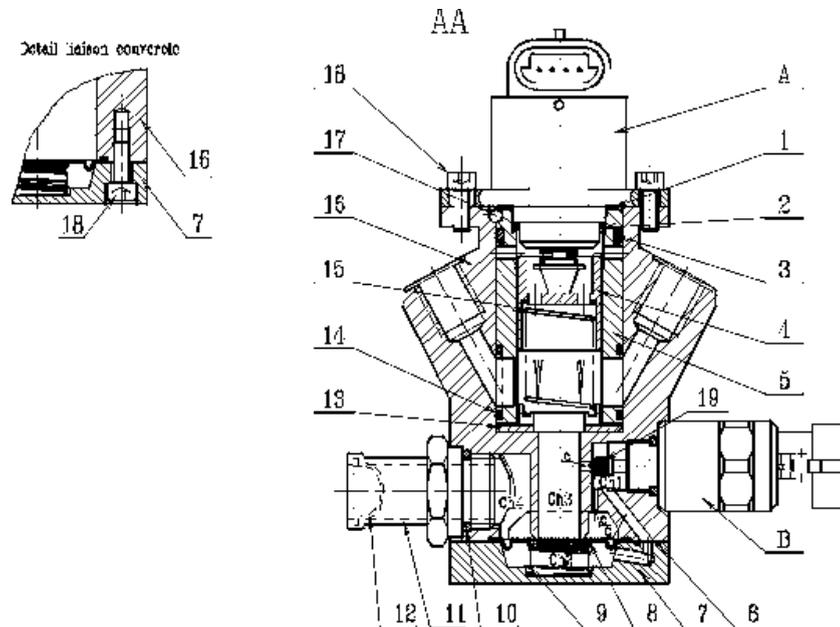


Fig4.5 : boîtier de distribution

Tableau4.3:Nomenclature du boîtier.

Re	Désignation	9	Ressort de rappel de vanne
A	Moteur pas-à-pas	10	Joint torique de la tuyère d'alimentation
B	Commande de vanne électromagnétique	11	Tuyère d'alimentation
1	Bague d'ondulation 22 x 0,8	12	Filtre
2	Joint torique du moteur	13	Bague de repositionnement
3	Joint torique du noyau central	14	Joint torique
4	Piston plongeur	15	Ressort du piston plongeur
5	Noyau central du boîtier de distribution	16	Corps du boîtier de distribution
6	Joint torique de l'orifice de	1	Bille ø 3
7	Couvercle de la vanne inférieure	18	Vis CHc, M4- 10
8	Membrane de la vanne inférieure	19	Cône de fermeture

➤ **Fonctionnement du boîtier :**

➤ Fonction principale :

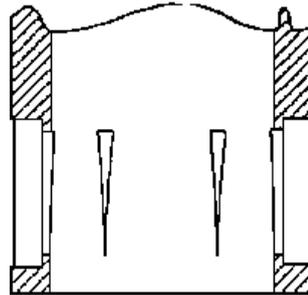


Fig4.6 : le boîtier

Le passage du gaz dans ce boîtier se fait à travers le noyau central fixe (5), dans lequel sont percées 6 fentes de dimensions identiques (voir nomenclature et plan du boîtier et figure ci-contre).

Un piston plongeur (4) glisse verticalement à l'intérieur du noyau masquant de ce fait plus ou moins les fentes.

Un moteur pas-à-pas (A), commandé par un ordinateur provoque le déplacement du piston.

L'entrée du gaz dans ce boîtier est gérée par une vanne de fermeture de gaz à commande électromagnétique.

Le boîtier de distribution est par conséquent l'élément qui dose la quantité de gaz nécessaire, dans toutes les conditions, au fonctionnement du moteur.

La quantité de gaz dosée dépend à la fois de l'ouverture des fentes dans le boîtier et de la pression du gaz en amont du module de dosage (pression de 1,16 à 1,96 bar)

➤ Fonctions complémentaires :

Le ressort (15) situé sous le piston plongeur assure que ce piston suive toujours le déplacement du moteur pas à pas et que le jeu présent soit repoussé d'un même côté dans toutes les conditions.

Toutes les éventuelles impuretés dans le module de dosage se traduiront, si celles-ci sont plus grandes que l'ouverture de passage des fentes, par des perturbations au niveau des fentes. Ces impuretés influenceront tout de suite essentiellement le fonctionnement au régime de ralenti. Du côté admission du module de dosage, un filtre (12) est installé pour éviter tout encrassement. En outre, lors du repositionnement du piston plongeur, celui-ci sera guidé le long des ouvertures de passage des fentes, ce qui éliminera toute éventuelle impureté. Le

repositionnement est une remontée totale du piston plongeur (4) qui est effectuée à chaque démarrage du moteur.

➤ **Fonctionnement du moteur pas à pas :**

Ce moteur est repéré (A) sur le plan du boîtier de distribution, il fait partie de l'ensemble boîtier.

Le moteur pas à pas se compose d'un stator à deux bobines et d'un rotor à aimants permanents. Le stator est polarisé alternativement nord-sud et provoquera de ce fait la rotation du rotor. Sous l'action de la tige (8), le cône (9) effectuera un mouvement linéaire entrant ou sortant et réglera ainsi le piston plongeur pas-à-pas. La plage de réglage totale est de 0 à 255 pas (phases) et la vitesse de réglage est de 160 pas par seconde.

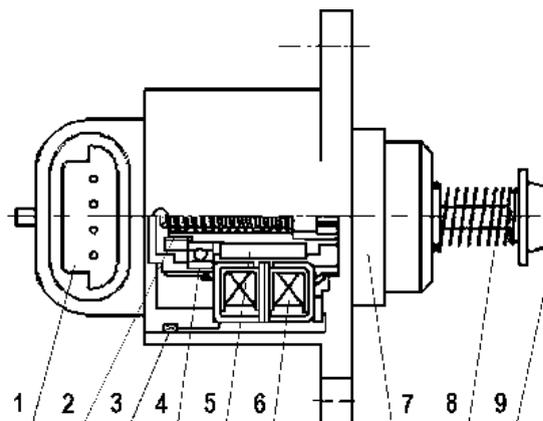


Fig4.7:moteur pas a pas

Tableau4.4 : nomenclature du moteur pas à pas

Rep	Désignation	Rep	Désignation
1	Raccordement à fiche	5	Rotor à aimants permanents
2	Arbre vis	6	Bobines du stator
3	Joint torique	7	Palier avant
4	Palier arrière	8	Ressort
		9	Cône

➤ **Fonctions de la vanne de fermeture de gaz. :**

Cette vanne de fermeture de gaz à sa commande électromagnétique repérée (B) sur le plan du boîtier de distribution, elle fait partie de l'ensemble boîtier.

Etant donné que la pression du GNC est partout supérieure à la pression dans le collecteur, il est inévitable que le contenu du vaporisateur et des conduits circule vers le boîtier de distribution lorsque le moteur est arrêté. Le boîtier de distribution n'est jamais entièrement exempt de fuites. De ce fait, lors du démarrage, une quantité indéfinie de gaz peut être présente dans le collecteur d'admission. Pour palier à cet inconvénient, la vanne de fermeture de gaz est fermée lorsque le moteur est arrêté.

La vanne peut également servir à couper l'alimentation de gaz pendant la décélération du moteur. Cette coupure d'alimentation peut s'avérer souhaitable en rapport avec les émissions de gaz d'échappement ou avec la consommation de carburant. Dans certains systèmes d'injection d'essence, le collecteur d'admission est aéré lors des décélérations. Dans ce cas, la coupure du débit de gaz est nécessaire.

Dans les systèmes d'injection d'essence, l'injection de carburant est souvent inhibée lorsque le régime maximal du moteur est dépassé. En fonctionnement au GNC, la vanne de fermeture de gaz peut être utilisée pour assurer cette fonction.

Lorsque le fonctionnement au GNC est activé par le conducteur, le démarrage du moteur se fait toujours à l'essence. Après un certain délai, le calculateur fait commuter en fonctionnement au GNC par l'intermédiaire de la vanne de fermeture de gaz.

➤ *Fonctionnement de la vanne de fermeture de gaz*

Etant donné que le débit de GNC qui traverse la vanne de fermeture de gaz est relativement grand, une force importante est requise pour ouvrir la vanne. Diverses expériences, ont montré que cette ouverture ne peut pas être assurée par une bobine électrique. Pour résoudre ce problème, on a construit une vanne à commande indirecte.

Commande électromagnétique (B) non activée (voir plan et nomenclature)

La vanne de fermeture de gaz est fermée. Lorsqu'une pression de gaz est générée dans la chambre circulaire (4) de la tuyère d'alimentation (11), cette pression s'établira également, via un orifice calibré (c), dans la chambre (1).

Le gaz circule de cette chambre (1) vers la chambre (2) située sous la membrane (8), à travers le canal (d).

La pression est identique des deux côtés de la membrane, mais compte tenu des surfaces sur lesquelles s'exerce cette pression la vanne reste fermée. Le petit ressort de rappel (9) accélère la fermeture lorsque les pressions sont faibles.

Vanne électromagnétique (B) activée (voir plan et nomenclature)

Le cône de fermeture de la soupape (19) ouvre le passage vers la chambre (3). Quand le passage dans les fentes de (5) est ouvert, la pression sur la face inférieure de la membrane (8) diminue. La perte de charge au niveau du canal (d) est inférieure à la perte de charge au niveau de l'orifice (c). Il en résulte que la force exercée par la pression sur la face supérieure de la membrane (8) déplace la membrane à l'encontre de la force du ressort (9) et de la force due à la pression sur la face inférieure de la membrane (8). Ainsi le passage direct de la chambre(4) à la chambre (3) est ouvert.

➤ **Les valves d'injection :**

- **Plan et nomenclature**

1	Couvercle
2	Membrane
3	Corps
4	Joint torique
5	Buse de sortie
6	Clips
7	Raccord à vis d'entrée

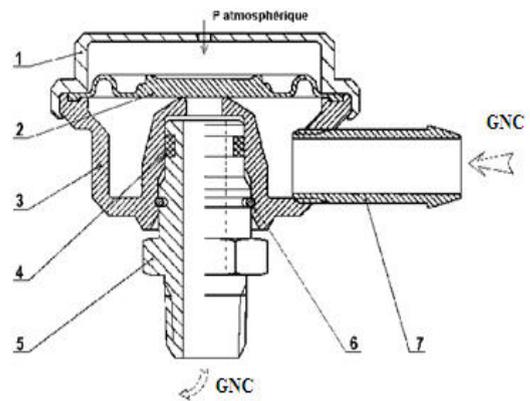


Fig4.8 : valve d'injection.

Fonctionnement :

Le gaz sortant du boîtier de distribution est injecté dans chaque cylindre via une conduite d'injection et une valve d'injection (10) directement en amont de la soupape d'admission. Ces valves ne renferment qu'une membrane souple, par conséquent le fonctionnement des valves est "passif", c'est-à-dire qu'elles ne sont pas commandées par le calculateur électronique.

➤ **La sonde de pression absolue :**

La sonde de pression absolue ou sonde MAP (Manifold Absolute Pressure) est une sonde qui mesure la pression absolue dans le collecteur d'admission et convertit celle-ci ensuite en un signal de tension analogique (entre 5,0 et 0 V) pouvant être lu par le calculateur.

La sonde reçoit à la borne C une alimentation de 5 Volt au départ du calculateur et est reliée à la masse via la borne A.

A partir de la borne B de la sonde MAP est transmis le signal de tension analogique qui représente pour le calculateur une mesure de la charge du moteur. Le signal de la sonde MAP est utilisé pour calculer le débit d'injection.

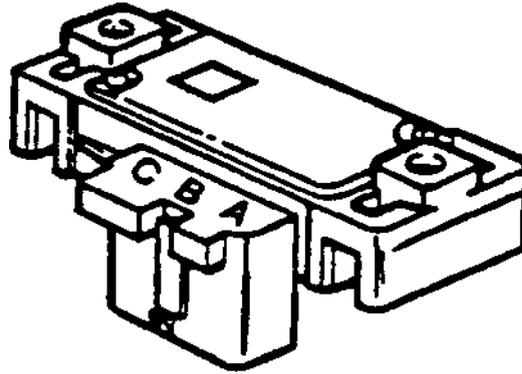


Fig4.9 : sonde de pression absolue.

➤ **Le calculateur :**

Fonctionnement :

Le calculateur 1 ordonne au boîtier de distribution l'augmentation de débit de gaz vers les valves d'injection (Voir fonctionnement du boîtier de distribution).

Le calculateur décide de ce débit en fonction de deux paramètres principaux: le régime du moteur et la charge.

Il compare ces informations à un diagramme caractéristique qui est programmé pour un grand nombre de régimes du moteur et de charges (pressions collecteur).

A chaque modification du régime du moteur et/ou de la charge du moteur, le calculateur cherche, dans le diagramme caractéristique, le nombre de pas correspondant à la nouvelle combinaison régime/charge et règle le moteur pas à pas en conséquence.

Après ce choix lu sur le diagramme et ordonné au moteur pas à pas, la sonde Lambda analyse les gaz brûlés et envoie à son tour un signal électrique au calculateur. Le calculateur ordonne l'ajout ou le retrait d'un certain nombre de pas au moteur pas à pas afin d'optimiser le fonctionnement du véhicule et cela comme pour une carburation à essence.

Le calculateur assure les fonctions complémentaires suivantes :

Démarrer en mode essence quelle que soit la présélection de carburant faite par le conducteur. Si la présélection est GNC : le basculement est automatique après une temporisation.

Corriger les valeurs du diagramme caractéristique de fonctionnement lorsque le moteur fonctionne à froid.

Basculer en fonctionnement essence si le mélange GNC-air est trop pauvre.

Surveiller le fonctionnement des différents capteurs. Remplacer les signaux défectueux par une valeur de secours. Avertir, le manipulateur, de la défaillance via le voyant situé dans le commutateur de sélection.

Activer un code de défaillance qui peut être lu par un technicien via la prise de diagnostic.

➤ **Insuffisance de la réponse du calculateur :**

Le moteur pas à pas utilisé ici, avec sa capacité d'effectuer 160 pas à la seconde, ne serait pas encore suffisamment rapide pour éviter à tout moment les problèmes d'allumage et les trous à l'accélération. Le moteur doit en effet réagir très rapidement aux mouvements de la pédale d'accélérateur.

La solution à ce problème consiste à augmenter la pression du gaz traversant le boîtier de distribution lorsque la charge du moteur augmente. C'est dans le détendeur de pression qu'est produite cette augmentation de pression

Le débit de gaz est alors très rapidement augmenté, par l'association d'une augmentation de la section de passage, et d'une augmentation de la pression.

➤ **Schéma électrique :**

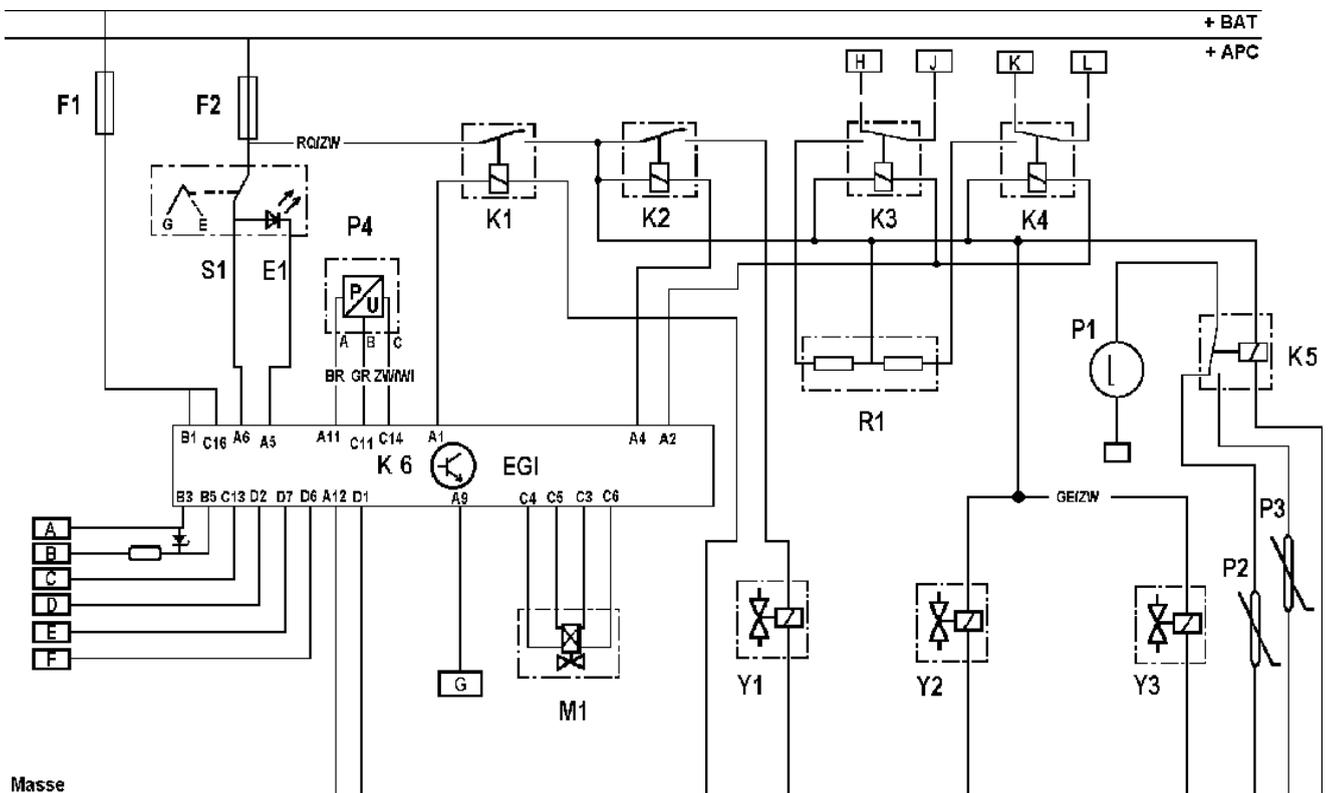


Fig4.10 : schéma électrique de fonctionnement

code	Description	Code	Description
E1	témoins de contrôle de fonctionnement	P1	jauge de carburant sur le tableau de bord
F1	fusible de 7,5 A.	P2	élément du réservoir à carburant
F2	fusible de 7,5 A.	P3	élément du réservoir à GNC
K1	relais de sécurité	P4	sonde de pression absolue (MAP)
K2	relais de vanne de gaz du boîtier	R1	résistance de remplacement
K3	relais de débranchement d'injecteur	S 1	commutateur de sélection de carburant
K4	relais de débranchement d'injecteur	Y1	vanne de gaz du boîtier
K5	relais de commutation de la jauge du réservoir	Y2	vanne de fermeture de GNC
K6	calculateur du système d'injection de	Y3	soupape d'alimentation de gaz
M1	GNC moteur pas à pas		

Rep	Connexion	Rep	Connexion
A	masse du signal de régime moteur.	G	prise de diagnostic.
B	signal de régime moteur.	H	injecteurs d'essence.
C	signal de position du papillon des gaz.	I	calculateur du système d'injection d'essence.
D	masse du signal de papillon des gaz.	J	injectrice d'essence.
E	signal de la sonde lambda.	K	calculateur du système d'injection d'essence.
F	masse du signal de la sonde lambda.		

➤ **La soupape de sécurité (surchauffe)**

Elle se trouve au niveau de la vanne de la bouteille de stockage, cette soupape protège le système d'alimentation en GNC en laissant automatiquement s'échapper à l'air libre le gaz naturel du réservoir de GNC au cas où celui-ci serait exposé à des chaleurs dépassant 100°C.

➤ **L'électrovalve de coupure haute pression (dans le réservoir)**

Électrovalve haute pression intégrée au réservoir, qui coupe automatiquement l'arrivée du gaz naturel si le moteur ne fonctionne pas au gaz, ou en cas de fuite importante dans le système.

Comme le GNC est soumis à une forte détente, on dérive une partie du circuit de refroidissement eau moteur pour réchauffer le groupe détenteur.

➤ **L'électrovalve de coupure basse pression**

Cette soupape de sûreté supplémentaire coupe automatiquement l'arrivée du gaz au compartiment moteur si le moteur ne fonctionne pas au GNC.

➤ **Le transducteur de jauge de carburant**

Ce transmetteur de pression, corrigé en température, convertit avec exactitude la pression du réservoir en quantité de carburant dans le système GNC et l'affiche sur la jauge de carburant du tableau de banc.

➤ **Le changement de mode automatique :**

C'est un dispositif placé après le détenteur, il permet au banc de passer automatiquement à l'alimentation en essence, mais seulement lorsque la réserve de gaz est épuisée.

Dans les moteurs à essence, il est bien connu que l'écoulement du combustible à l'admission est plus lent que celui de l'air à cause de l'inertie du combustible qui est en partie à l'état gazeux. Cependant, dans les moteurs au gaz le combustible est gazeux. La vitesse du mélange à l'injection atteint la vitesse sonique de 450m/s : 3 fois plus rapide qu'un combustible liquide. Cela est à prendre en compte pour le réglage du retard à la fermeture de la soupape d'admission.

4.2 Stockage et ravitaillement en GNC :

La pression de stockage vers 200 bar constitue une valeur optimale pour une énergie embarquée, pour le ravitaillement de notre banc on doit prendre un réservoir qui se comporte de 2 bouteilles en acier avec les quelles on peut alimenter notre banc durant toute l'année scolaire, qu'on doit citer leur caractéristique juste après.

4.2.1 Réservoirs GNC :

La solution la plus classique consiste à utiliser des réservoirs en acier sous une pression de 200 bars (20 MP). Les réglementations imposent que ceux-ci puissent résister à une pression de 600 bars en cas d'échauffement accidentel provoqué, par exemple, par un incendie. Ces contraintes imposent des capacités maximales de stockage de l'ordre de 0,15 (nm³) de gaz par kg de réservoir.

D'autres matériaux sont préférés à l'acier. Ce sont l'aluminium seul ou fretté avec des fibres de verre, les composites résines- fibres de verre ou résines-fibres de carbone, ces enveloppes permettent, par rapport aux réservoirs en acier, de multiplier par quatre les capacités de stockage, à poids égal, mais au côté économique les réservoirs en acier sont les moins chers par rapport aux autres types.

Mais quelle que soit la technologie retenue, il apparaît qu'une pression de stockage de 200 bars constitue une valeur optimale. En effet, en dessous de ce seuil, la quantité d'énergie embarquée est trop faible; au-dessus, l'augmentation d'épaisseur des parois, imposée pour des questions de sécurité, entraîne un trop fort accroissement de poids.

Le dispositif de sécurité est constitué par une soupape qui s'ouvre sous une pression de 350 bars, cette pression pouvant être atteinte en cas d'incendie à l'intérieur de laboratoire. Le fait que le réservoir puisse résister à une pression de 600 bars prémunit ainsi contre le risque de rupture des parois.

Pour cela on trouve plusieurs types de réservoirs qu'on les classe en fonction de technologies utilisées.

Selon la norme ISO 11439, les réservoirs sont classés selon quatre types :

Tableau 4.5:les types des bouteilles de gaz naturel. [18]

Type	Technologie
CNG 1	Métal
CNG 2	Liner(*) métallique renforcé par un filament (**) continu imprégné de résine (bobiné sur la partie cylindrique)
CNG 3	Liner métallique renforcé par un filament continu imprégné de résine (entièrement bobiné)
CNG 4	Filament continu imprégné de résine sur liner polyéthylène (tout composite)

Pour notre étude on a choisi le 1er type.

4.2.2 Caractéristique technique de réservoirs : [3]

- dénomination : bouteille type CNG-1
- Matériel : Acier
- Traitement thermique : trempe et revenu
- Capacité : 80,0L
- Fluide véhiculé : GNC, Méthane
- Forme générale : cylindrique
- Longueur : 1025 +/- 20mm
- Diamètre extérieur : 356.0 +/- 1%
- Pression de service : 200 bars (a 15°C)
- Pression d'essai : 300 bars
- température de service : -40C/+65C
- température d'essai : Ambiance
- Matériel utilise : Acier 34CrMo4 (DIN17200-EN10083)
- Epaisseur minimale : 10mm
- Charge limite de rupture : 1099 N/mm²
- Limite d'élasticité : 890 N/mm²
- pression d'éclatement : >450bars
- durée de vie : 20 ans

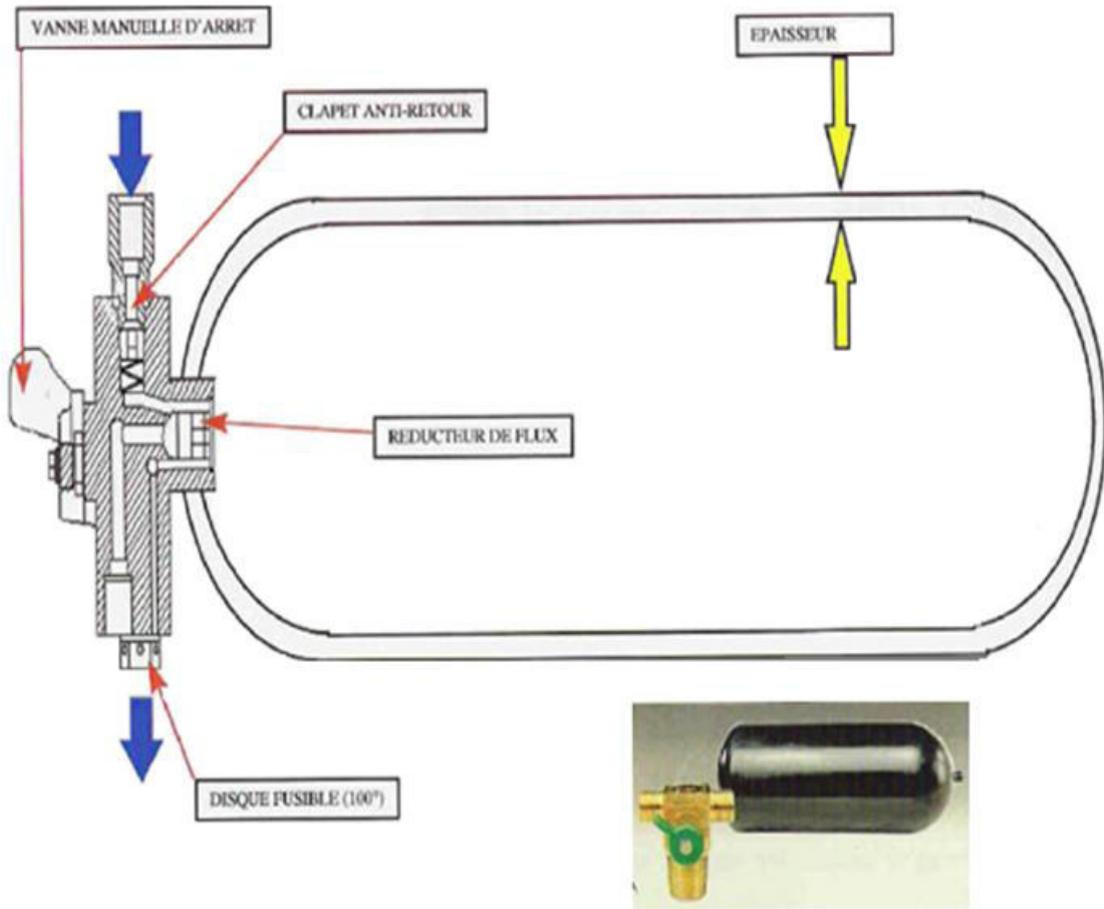




Fig4.11 : bouteille de GNC

4.2.3Circuit GNC:

Pour le circuit de gaz on doit choisi des tuyauteries en inox recouvertes de matière plastique qui résiste à la haute pression, de diamètre de 5mm pour minimise les pertes de charge.

4.3 Emplacement de réservoir :

Le réservoir doit être placé dans un endroit bien étudié et qui répond aux normes internationaux de sécurité.

-Plan de masse du département de génie mécanique :

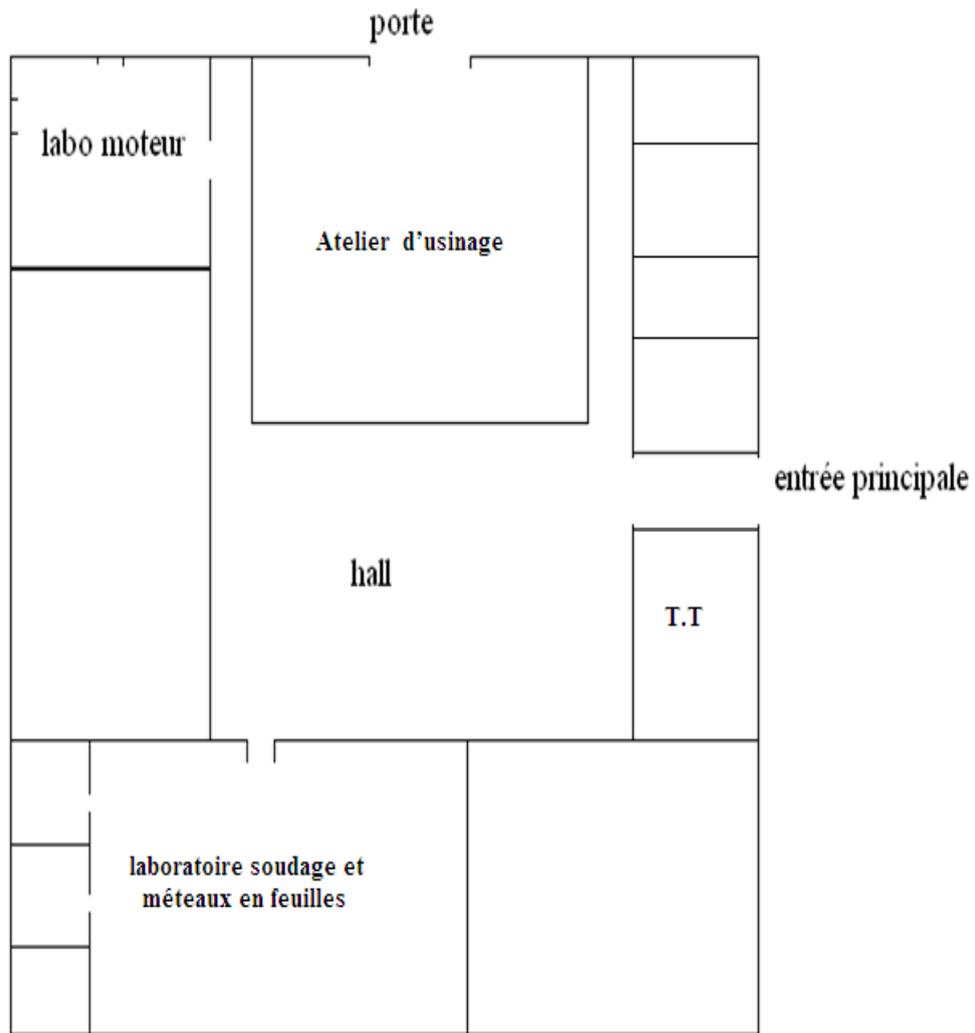


Fig4.12: département de génie mécanique

-plan de laboratoire moteur :

On présente ici le schéma de labo moteur et la place quelle doit occupé la niche des bouteilles de stockage.

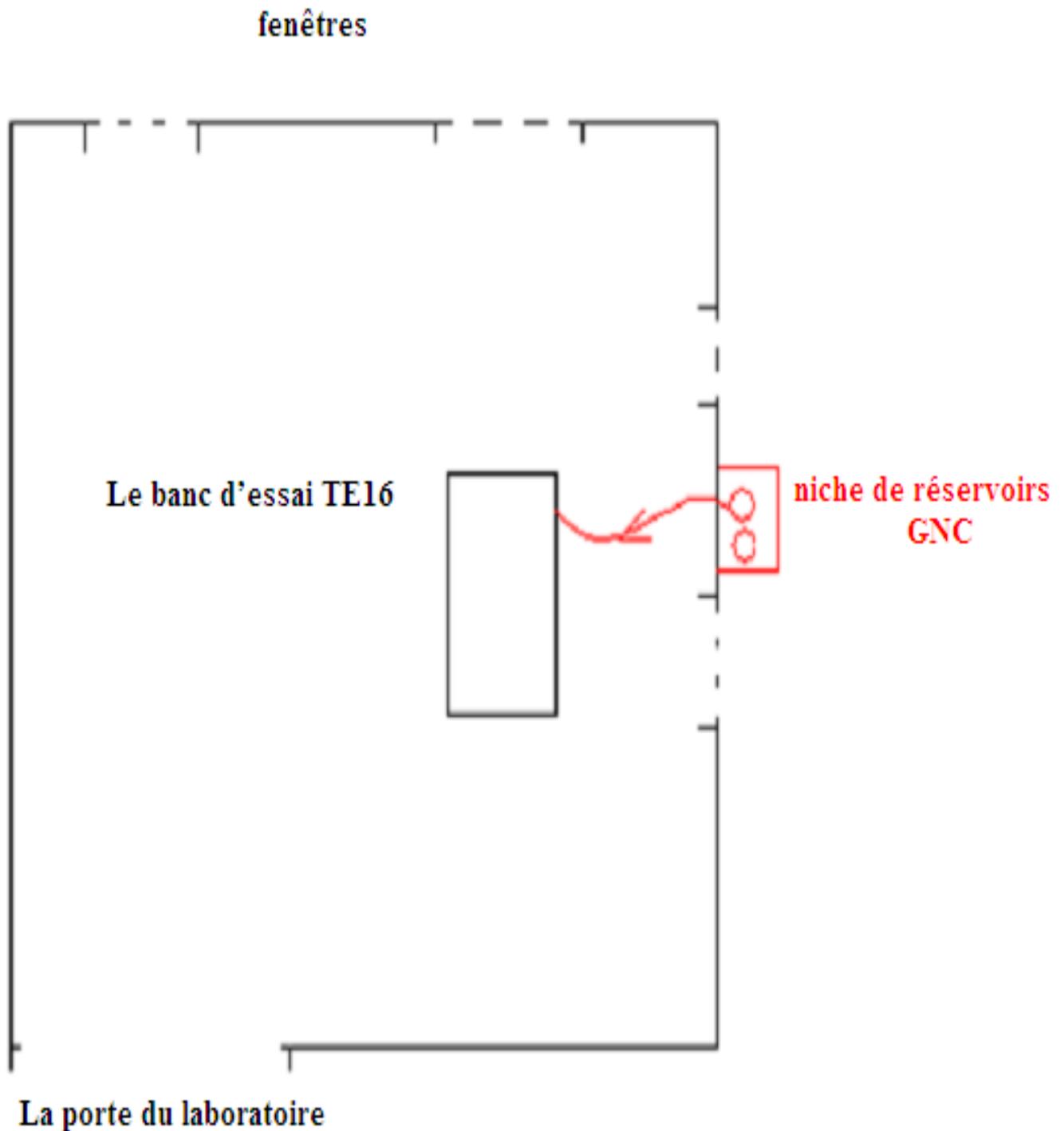


Fig4.13 : plan de masse de laboratoire moteur

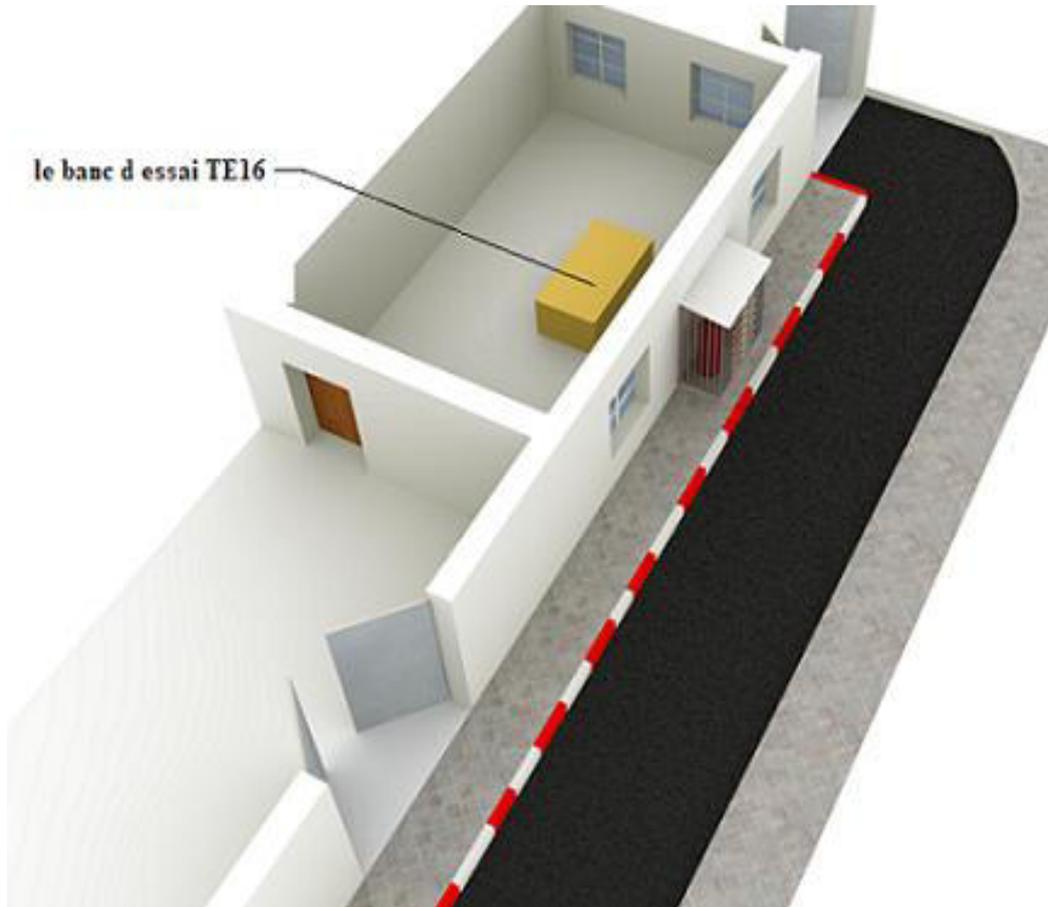


Fig4.14 : laboratoire moteur.

Pour l'emplacement des deux bouteilles, on a choisi l'endroit le plus proche du banc mais à l'extérieur du laboratoire. On met les deux bouteilles dans une petite niche qu'on doit construire. Cette petite niche, construite avec des barres en fer (cornière) sera munie d'une porte bien sécurisée qui permet l'échangeabilité des bouteilles en cas d'épuisement de gaz. Aussi la chambre doit avoir un toit en tôle métallique qui doit protéger les bouteilles des rayons solaires et des changements climatiques.

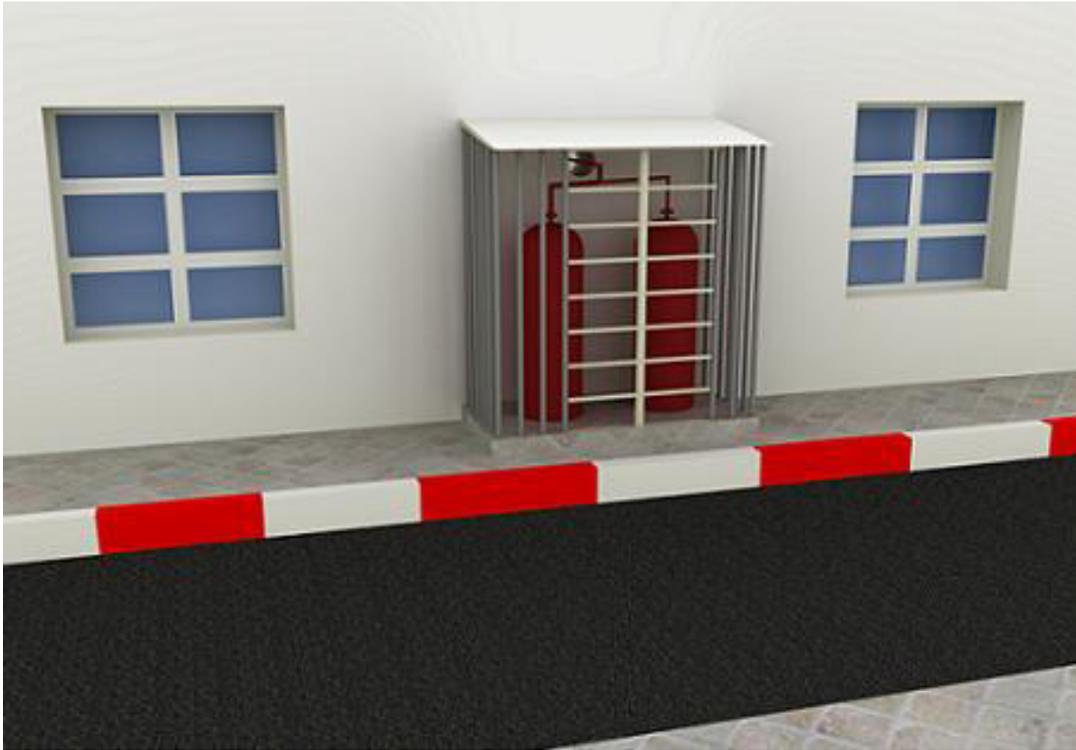


Fig4.15 : la niche

4.4. Mesure de sécurité de laboratoire :

Pour la sécurité de laboratoire on a pris en considération tous les risques encouru lors de la manipulation du banc et on a pris les précautions suivantes :

4.4.1 La ventilation :

Le moyen le plus simple pour prévenir la formation d'un nuage de gaz naturel dans le laboratoire est la ventilation ou l'aération.

Cette ventilation peut être :

-naturelle : la dilution se fait par l'ouverture de portes et de volets (munis de grille de ventilation qu'il est interdit de colmater) qui crée un courant d'air.

-mécanique : si la ventilation naturelle est insuffisante on doit crée un courant d'air par une ventilation forcée afin de permettre une dilution.

Les ventilations peuvent se déclencher soit manuellement par des déclencheurs manuels de types «bris de glace», ou par des systèmes qui sont liés avec des détecteurs de gaz et qui doit être déclenché automatiquement.



Fig4.16:ventilateur axial

4.4.2Détection de gaz :

La détection de gaz consiste à mesurer les concentrations de gaz dans la gamme de 0 à 100% de la LII (limite inférieure d'inflammabilité).

Le détecteur est relié à une centrale d'alarme. deux seuils de détection sont généralement retenus, le premier seuil à 10% de la LII et le deuxième à 25% de la LII. Aussi il est relié à une commande qui gère la coupure de réseau électrique et déclenche la ventilation mécanique.



Fig4.17 : détecteur de gaz naturel.

4.4.3 Matériel d'incendie :

Pour la protection de notre laboratoire des dégâts d'incendies on a procédé à mettre deux extincteur de 5Kg chacun et on les a placés à la portée du manipulateur pour qu'il puisse les utiliser rapidement en cas d'incendie.

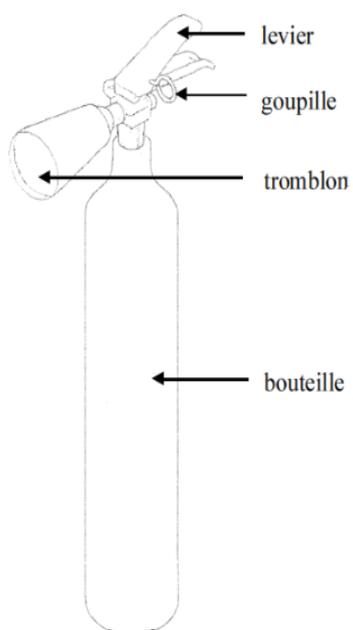


Fig4.18 : extincteur.

Conclusion :

La pollution due au gaz à effet de serre et les problèmes de l'environnement liés aux gaz d'échappement des moteurs thermiques nous ont conduits à penser à des solutions adéquates pour protéger notre planète.

C'est dans ce contexte que découle le but de notre projet qui consiste en l'étude de la conversion au gaz naturel comprimé du banc d'essai TE16.

Pour ce banc, le moteur est à carburation, mais comme nous avons vu que de précédents travaux ont été réalisés pour la conversion de ce type de moteur, et pour mieux suivre l'actualité, nous avons préféré étudier la conversion d'un moteur de même caractéristique que le précédent mais avec injection multipoint.

Malheureusement nous n'avons pas pu atteindre notre objectif tracé au début qui était la réalisation et l'installation d'un kit GNC car nous n'avons pas pu acheter le kit et le réservoir GNC faute de fournisseurs qui commercialisent ces kits en Algérie.

Nous dirons que l'occasion qui nous a été offerte de travailler sur un tel banc d'essai, a été bénéfique à plus d'un titre. Nous nous sommes familiarisés avec le banc d'essai, arrivés à assimiler son principe de fonctionnement, la technologie gaz, les différentes possibilités de conversion au GNC ainsi que beaucoup de notions d'électricité et d'électronique appliquée sur les bancs.

Pour des études ultérieures, nous proposons de faire la conversion du banc en injection mono et multipoint et de chercher à trouver d'autres solutions pour le stockage du gaz, d'élever les performances du moteur du banc d'essai. Aussi, il serait souhaitable de mettre en marche et d'étalonner l'analyseur des gaz d'échappement, afin de l'exploiter à divers travaux de recherche ; ce qui permettra aux promotions à venir de réaliser des manipulations très utiles pour leur formation et qui renforcera davantage leurs connaissances dans le domaine des moteurs.

Références bibliographiques:

- [1] Le gaz naturel pour véhicule (GNV) ADEME ;
- [2] MOUHOUB Karim, thèse de doctorat USTHB 1993 ;
Thèse de doctorat USTHB 1993 ;
- [3] Technique de l'ingénieur ; BM2594, MAGNET.DESCOMBES.
- [4] WLPGA IFP/Direction des études économiques/2004.
- [5] <http://lmoisy.free.fr/GNV.html>
- [6] <http://lmoisy.free.fr/GNV.html>
- [7] Techniques de l'Ingénieur BM 2 594, MAGNET & DESCOMBES
- [8] Robert Bosch GMBH ALLEMAGNE
- [9] M.Benbraika : Economie d'énergie. Application aux moteurs thermiques alternatifs.
- [10] bulletin technique de banc d'essai TE16
- [11] Plint engineers: electric engine indicator TE28
- [12] Bosch operating instruction exhaust-gas analyzer ETT8.55 EU
- [13] document SONELGAZ (MPV ELHAMA)
- [14] Observatoire de l'économie de l'énergie et des matières premières et DIDEME, novembre 2006.
- [15] contribution a l'étude technico-économique de la conversion au GNC des moteurs a carburants classiques, PGS 2008ENP.
- [16] .chagette.«Technique automobile».le moteur, Dunod , 1977,Paris.