



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

CONVERSION D'UN MOTEUR DIESEL EN UN MOTEUR POLY CARBURANT

Benjamin Arnoulet

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de
Bachelor en mécanique navale

Promoteur : Tim Janssens
Co-promoteur : Steefan Bueken
Année académique : 2020 – 2021

Avant – propos

Ce mémoire est réalisé en vue de l'obtention du diplôme de Bachelor en mécanique navale à l'École Supérieure de Navigation d'Anvers. Il étudiera le fonctionnement de la bicarburation sur les moteurs ainsi que la possibilité de créer un moteur polyfuel en effectuant un rétrofit d'un générateur fonctionnant au diesel.

J'ai choisi ce sujet afin d'approfondir mes connaissances sur le fonctionnement des moteurs bicarburant. En effet ce type d'installation devient de plus en plus courante à bord des navires-commerces.

Je tiens à remercier mes promoteurs, monsieur Tim Janssens et monsieur Steefan Bueken pour leur encadrement et leur temps qu'ils m'ont consacrés malgré la situation actuelle qui n'a pas facilité ce travail. Je tiens aussi à remercier ma famille qui m'a soutenu et permis de réaliser ces études.

Résumé

Dans ce travail de fin d'études, nous allons convertir un moteur diesel pour qu'il puisse fonctionner avec d'autres carburants et devenir ainsi un moteur polycarburant sur un fonctionnement en bicarburation.

Pour cela, nous avons regardé le fonctionnement de la bicarburation et avons étudié les avantages et les inconvénients de l'utilisation des moteurs bicarburation.

Le moteur bicarburation est un moteur qui utilise le diesel comme carburant pilote, car le diesel permet de déclencher la combustion du second carburant de substitution.

Nous avons établi un plan pour réaliser un système d'injection indirect du gaz qui va nous permettre d'admettre du gaz dans la chambre de combustion du moteur. Nous avons réalisé un système se basant sur le fonctionnement d'un carburateur pour moteur à essence, mais pour fonctionner avec du gaz.

Nous avons ensuite effectué des relevés sur les gaz d'échappement produits par le moteur afin de comparer les modifications dans leurs caractéristiques. Ainsi nous avons pu comparer l'impact d'un fonctionnement en bicarburation sur les gaz d'échappement.

Abstract

In this thesis, we will convert a diesel engine to run on other fuels and thus become a flex-fuel engine in dual-fuel operation.

To do this, we looked at the operation of dual-fuel and studied the advantages and disadvantages of using dual-fuel engines.

The dual-fuel engine is an engine that uses diesel as a pilot fuel, as the diesel is used to initiate the combustion of the second alternative fuel.

We have drawn up a plan to implement an indirect gas injection system that will allow us to admit gas into the engine's combustion chamber. We designed a system based on the operation of a petrol engine carburetor, but to work with gas.

We then took readings of the exhaust gases produced by the engine to compare the changes in their characteristics. In this way we were able to compare the impact of bi-fuel operation on the exhaust gases.

Table des matières

Contexte	1
Chapitre 1 : Introduction	3
1. Principe de fonctionnement d'un moteur bicarburant	4
2. Combustion	5
3. Avantage et Inconvénient du dual Fuel	7
3.1. Avantage écologique	7
3.2. Avantage économique	7
3.3. Inconvénient	9
Chapitre 2 : Les carburants et leurs émissions	10
1. Gaz d'échappement	10
1.1. Oxyde d'azote	10
1.2. Oxyde de soufre	11
1.4. Dioxyde de carbone	11
1.3. Monoxyde de carbone	12
1.5. Hydrocarbure	13
1.6. Particules fines	14
2. Carburant traditionnel	15
2.1. Diesel	15
2.2. Fioul lourd marin	17
2.3 Carburant en mode bicarburant	18
3.1. Mélange diesel/GPL	18
3.2. Mélange diesel/GNL	20
3.3 Interprétation des résultats en bicarburant	22
Chapitre 3 : Adaptation du moteur	23
1. Le moteur	23

2. Adaptateur.....	24
2.1. Admission de gaz.....	24
2.2. Carburateur	26
2.3. Les adaptateurs installation automobile.....	27
3. Adaptateur pour générateur JAVAC.....	29
3.1. Mélangeur Air/Gaz	29
3.2. Circuit de gaz	30
3.3 Adaptateur de l'admission	31
3.4 Diffuseur de gaz.....	32
3.5 Représentation théorique de l'assemblage.....	32
3.6 Assemblage	33
3.7 Démarrage.....	35
Chapitre 4 : L'expérience.....	36
1. Outils de mesure	36
3. Méthodologie de la mesure.....	37
4. Les résultats	38
Conclusion	40
Bibliographie.....	41
Annexe A	45

Liste des figures

Figure 1: Principe de fonction d'un moteur dual-fuel	4
Figure 2 : Combustion dans un moteur diesel	5
Figure 3 : Combustion dans un moteur diesel bicarburant	6
Figure 4 : Explication d'une tour de raffinage	15
Figure 5 : Compositions des gaz d'échappement du diesel	16
Figure 6 : Système bicarburant injection direct	24
Figure 7 : Système bicarburant à injection indirect	25
Figure 8 : Schéma carburateur élémentaire	26
Figure 9 : Schéma carburateur à venturi	27
Figure 10 : Montage mélangeur – diffuseur	27
Figure 11 : Mélangeur de gaz	28
Figure 12 : Mélangeur présent sur le moteur	28
Figure 13 : Schéma mélangeur air/gaz.....	29
Figure 14 : Croquis mélangeur Air/gaz	29
Figure 15 : Schéma du circuit de gaz.....	30
Figure 16 : Régulateur de proportion variable	30
Figure 17 : Schéma adaptateur admission	31
Figure 18 : Adaptateur	31
Figure 19 : Schéma diffuseur.....	32
Figure 20 : Schéma de l'assemblage avec exemple de diffusion	32
Figure 21: Vue de face de l'assemblage de l'installation	33
Figure 22 : Vue de côté de l'assemblage de l'installation	34
Figure 23 : Support + sonde de mesure des gaz d'échappement	36
Figure 24 : Présentation du dispositif de test	37

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison densité énergétique des différents carburants	9
Tableau 2 : Composition fioul lourd marin.....	17
Tableau 3 : Compositions gaz d'échappement FOL	17
Tableau 4 : Caractéristique du moteur de test.....	18
Tableau 5 : Propriétés des carburants	19
Tableau 6 : Résultats pour le mélange GPL par rapport au 100% diesel	19
Tableau 7 : Caractéristique du moteur de test.....	20
Tableau 8 : Caractéristique du biogaz.....	21
Tableau 9 : Résultats pour le mélange GNL par rapport au 100% diesel.....	21
Tableau 10 : Caractéristique du générateur JAVAC.....	23
Tableau 11 : Différence entre 100% diesel et en bicarburation (sans charge).....	39
Tableau 12 : Différence entre 100% diesel et en bicarburation (avec charge)	39

Liste des abréviations

CO	=	Monoxyde de Carbone
CO ₂	=	Dioxyde de Carbone
FOL	=	Fioul Lourd
GNL	=	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	=	Gaz de Pétrole liquéfié
H ₂ O	=	Eau
HC	=	Hydrocarbure
HFO	=	<i>Heavy Fuel Oil</i>
MDO	=	<i>Marine Diesel Oil</i>
NO	=	Monoxyde d'Azote
NO _x	=	Oxydes d'Azote
OMS	=	Organisation Mondial de la Santé
PM	=	<i>Particulate Matter</i>
PM	=	Particule Fine
PMI	=	Point Mort Inférieur
PMS	=	Point Mort Supérieur
ppm	=	Partie Par Million
RGE	=	Recirculation des Gaz d'Échappement
SO _x	=	Oxyde de Souffre
TPM	=	Tour par Minute
VLGC	=	<i>Very Large Gas Carrier</i>
ZCE	=	Zones de Contrôle des Emissions

Contexte

En 2020, en Europe, 13% des morts sont liés à la pollution. Cela représente 630 000 morts prématurées, dont plus de 400 000 décès liés à la pollution de l'air. C'est un rapport de l'agence européenne sur l'environnement (AEE) qui sonne l'alerte. L'OMS indique que la pollution de l'air est le principal risque environnemental pour la santé dans le monde avec 5% des décès annuels mondiaux. Toujours selon l'OMS la pollution atmosphérique est également responsable d'allergies, de maladies respiratoires, de cancers ainsi que la baisse de la fertilité (European Environment Agency, 2020).

De plus, les émissions de gaz carbonique comme le dioxyde de carbone sont responsables de l'accroissement de l'effet de serre et donc de l'augmentation de la température qui est un facteur du dérèglement climatique (European Environment Agency, 2020). Cette pollution atmosphérique a un impact désastreux sur l'environnement et on estime aussi à 12 000 morts prématurées en Europe dues à l'augmentation du nombre de vagues de chaleur...

Pour rappel, l'objectif de l'accord de Paris est de limiter l'augmentation de la température à moins de 2°C d'ici 2100. Les émissions d'oxyde de soufre et d'oxyde d'azote sont responsables de l'acidification de la pluie, océan... Cela a pour effet d'impacter les écosystèmes ce qui menace la faune et la flore ainsi que les propriétés du sol. Et donc sur le long terme a un impact négatif sur l'Homme (Unies, 2015).

Aujourd'hui, près de 87% des émissions de dioxyde carbone produites par l'homme proviennent de la combustion de combustibles fossiles. Les 13% restants proviennent de l'utilisation des sols par l'homme et de certains procédés industriels tels que la production de ciment (4%) (Le Quéré et al., 2013).

Chapitre 1 : Introduction

L'industrie maritime est un des contributeurs du réchauffement climatique. Pour réduire son impact sur l'environnement, l'industrie maritime est sans cesse obligée de s'améliorer en développant de nouvelles technologies pour améliorer et baisser leurs émissions. Il existe déjà beaucoup de solutions qui peuvent être combinées pour limiter son impact sur l'environnement. Comme passé à du pétrole à faible teneur en soufre, par exemple du fioul intermédiaire (IFO) ou du fioul lourd (HFO) qui a été traité pour réduire sa teneur en soufre ou passer à un carburant distillé tel que le diesel marin (MDO) ou le gazole marin (MGO).

Mais il existe aussi des solutions après la combustion dans le moteur. En faisant recirculer une partie des gaz d'échappement d'un moteur vers les cylindres du moteur, cette technologie s'appelle RGE pour réduire les NO_x .

Une autre méthode serait d'utiliser un purificateur de gaz d'échappement aussi appelé absorbeur-neutralisateur. Cette technologie est destinée à absorber et à neutraliser les gaz toxiques ou les particules. Plus connu sous le nom de scrubber qui vient de l'anglais. Il peut neutraliser de différentes manières :

- Une neutralisation humide qui par contact avec une solution humide, comme de l'eau par exemple, permet de capturer la poussière dans les gaz d'échappement.
- Une neutralisation sèche qui permet d'éliminer les gaz acides tels que le dioxyde de soufre. Pour cela on utilise de l'alumine activée. Les systèmes de neutralisation à sec peuvent être classés en deux catégories :
 - L'injection de réactif sec qui implique l'ajout d'un produit alcalin
 - La vaporisation de réactif liquide, les gaz d'échappement sont orientés dans une tour d'absorption où les gaz rentrent en contact avec une suspension alcaline finement atomisée.

Mais il est aussi possible d'intervenir sur la combustion elle-même. C'est-à-dire sur la chambre de combustion tout en gardant un carburant de base comme le diesel, mais mélangé avec un autre carburant comme du gaz par exemple. Ce système de bicarburation plus connu sous son appellation anglophone Dual-Fuel. C'est le sujet que nous allons étudier dans ce mémoire. L'avantage de ce système c'est qu'il permet une flexibilité dans les carburants utilisés. C'est pour cela que nous allons réaliser un moteur polyfuel basé sur une utilisation bicarburant.

1. Principe de fonctionnement d'un moteur bicarburant

Le principe de fonctionnement d'un moteur multi carburant est de fonctionner grâce à deux carburants simultanément, on appelle cela un fonctionnement bicarburant, plus connu sous l'appellation Dual-Fuel en anglais.

Il y a deux catégories de carburant. Premièrement le carburant de substitutions qui est là pour remplacer une partie du diesel, c'est sous l'état gazeux qu'il est injecté grâce un mélangeur dans l'admission ce qui crée un mélange air essence. Comme ce mélange ne peut s'auto enflammer nous avons besoin d'un carburant secondaire pour crée l'allumage. Ce carburant est généralement du diesel qui est directement injecté dans la chambre de combustion, c'est le carburant pilote (plus connus sous le nom de pilote fuel).

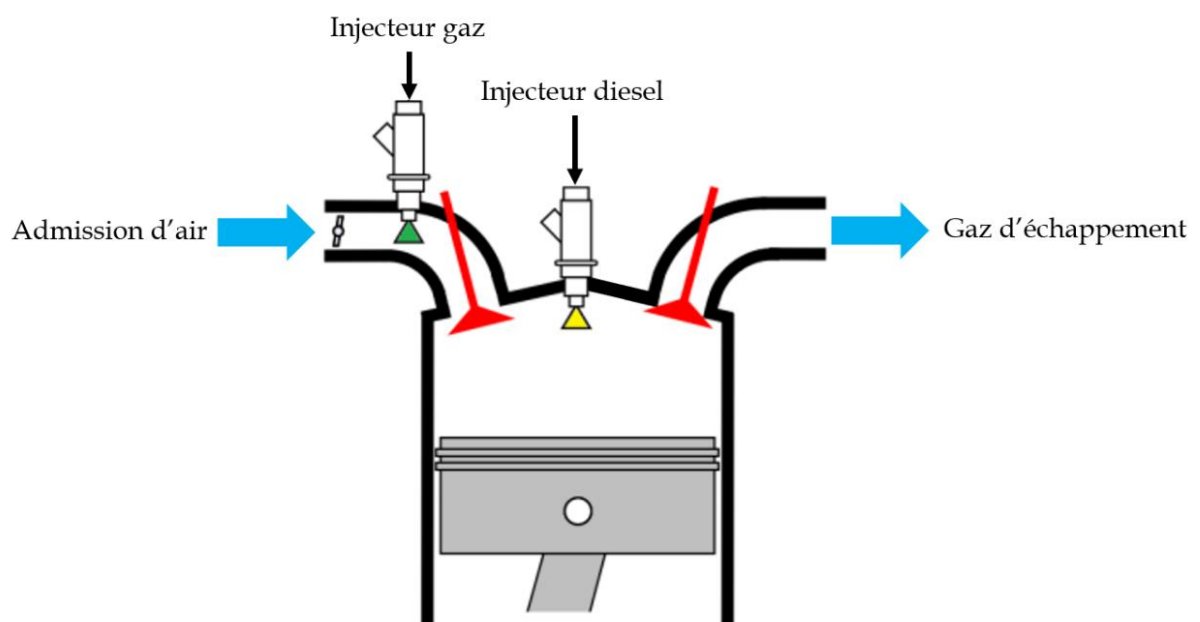


Figure 1: Principe de fonction d'un moteur dual-fuel

Source : Propre travail

2. Combustion

Pour que la combustion se produise dans un moteur bicarburant il est important qu'une certaine quantité de carburant liquide soit injectée dans un mélange d'air et de gaz. Le fait que les moteurs biocarburants sont pour la plupart des moteurs fonctionnement avec du diesel il est important d'examiner le processus de combustion dans le cas d'un moteur diesel et d'un moteur bicarburant.

Ce graphique montre les différents changements dans la chambre de combustion. Les changements de pression par rapport à l'angle du point mort haut de la bielle pour un processus de combustion uniquement diesel.

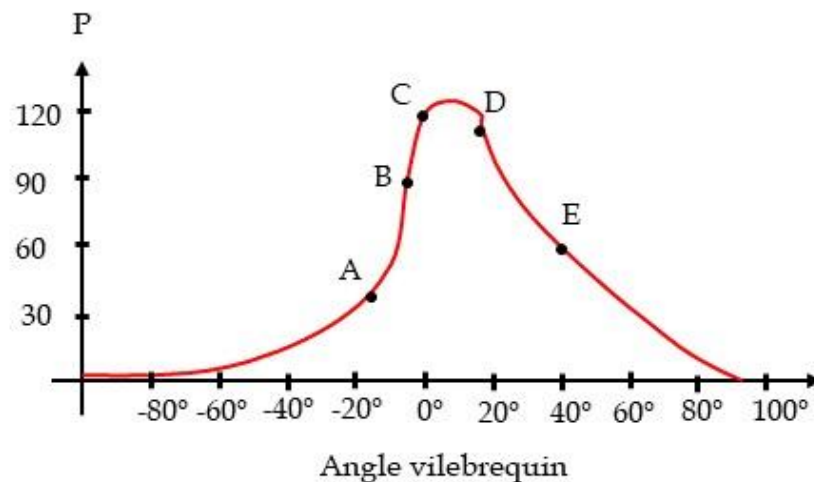


Figure 2 : Combustion dans un moteur diesel

Source : Propre travail, d'après les recherches de Nwafor (2003)

- A → B Période d'allumage
- B → C Combustion pré-mélangée
- C → D Combustion contrôlée
- D → E Combustion tardive

Dans le cas d'un fonctionnement à double combustible, le processus de combustion comporte 5 étapes.

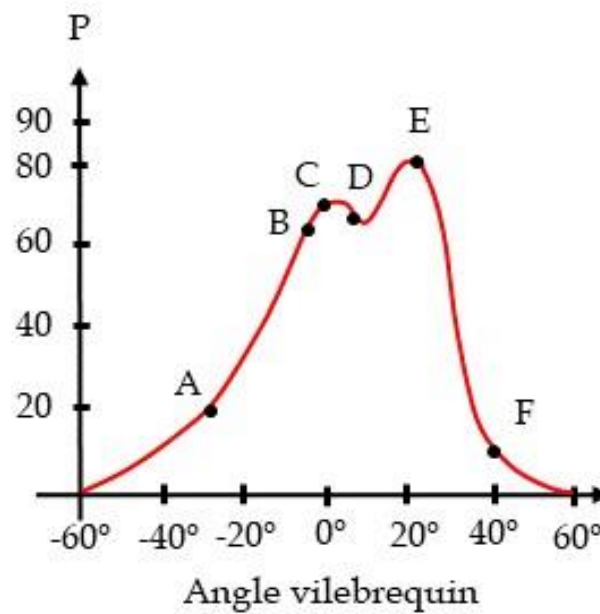


Figure 3 : Combustion dans un moteur diesel bicarburant

Source : Propre travail, d'après le travail de Nwafor (2003)

- A → B Allumage du combustible liquide pilote
- B → C Combustion pré-mélangée du combustible
- C → D Retard d'allumage du combustible de substitution
- D → E Combustion rapide du combustible de substitution
- E → F Combustion par diffusion

3. Avantage et Inconvénient du dual Fuel

3.1. Avantage écologique

La principale motivation à l'adoption rapide par l'industrie maritime du gaz comme carburant pour les navires est l'adoption de nouvelles réglementations sur les émissions. Les nouvelles mesures ont d'abord imposé d'abaisser les niveaux de soufre, d'abord à 0,1% dans les zones de contrôle des émissions (ZCE) à partir de 2015, puis à 0,5% au niveau mondial à partir de 2020 (MARPOL ANNEX IV, 2019). La principale différence entre ces nouvelles limites d'émission de soufre et les réglementations précédentes réside dans le fait qu'elles s'appliqueront à tous les navires, et pas seulement aux navires les plus récents. Cela signifie que les propriétaires de navires qui utilisent actuellement des fiouls lourds (HFO) sont dans l'obligation d'opérer un retrofit sur le navire et doivent opter pour de nouvelles solutions.

Les différentes solutions actuellement disponibles sont de filtrer grâce à des épurateurs les gaz d'échappement, l'utilisation de combustible distillé telle que le diesel marin (MDO) ou l'utilisation de carburants de substitution comme le gaz par exemple.

L'utilisation de gaz s'avère avoir de nombreux avantages, car il permet de réduire les émissions des oxydes de soufre (SOx) d'environ de 99% (Golng, s. d.).

3.2. Avantage économique

Une autre motivation importante pour l'adoption d'un système dual-fuel à bord des navires, est le prix du GNL qui probablement va devenir de plus en plus attractif. Car la demande en combustibles distillés sera probablement très élevée, ce qui fera augmenter le coût par rapport aux combustibles lourds, qui, constitués principalement des huiles résiduelles restant après le processus de distillation d'autres produits pétroliers, resteront probablement relativement bon marché.

Le choix le plus approprié dépendra de nombreux facteurs, mais sera principalement influencé par les coûts relatifs du HFO, du MDO et des combustibles gazeux, et par le temps passé dans des zones où les émissions de soufre sont fortement limitées.

La troisième option consiste à passer au dual-fuel. Comme le prix des carburants gazeux devrait être plus stable, et pourrait même baisser en termes relatifs avec l'apparition de nouvelles méthodes d'extraction, cette option semble attrayante, du moins dans les zones où l'infrastructure d'approvisionnement existe déjà ou est prévue.

L'un des principaux avantages du dual fuel est qu'il offre de la flexibilité ainsi que de la redondance. Cela permet aux navires de choisir le carburant en fonction des modèles opérationnels et des facteurs économiques. Par exemple, un transporteur de gaz aura le moteur réglé pour un équilibre entre le liquide et le gaz, en utilisant le gaz lorsqu'il est facilement disponible (par exemple, en tant que produit d'évaporation de la cargaison), lorsqu'il est moins cher, ou dans les ZCE, et du combustible conventionnel à d'autres moments. Un remorqueur, un navire de soutien en mer ou un ferry de courte distance sera optimisé pour fonctionner avec du gaz comme combustible principal, avec la possibilité d'utiliser des combustibles liquides pour les opérations hors routine.

Mais, quels que soient les avantages du GNL comme combustible, la disponibilité du gaz est considérée comme une question clé. Si les navires ne peuvent pas stocker le GNL là et au moment où il est nécessaire, il n'y a aucune incitation à recourir à cette option.

Certains experts font une analogie avec l'avènement du navire à moteur à combustion interne, qui avait besoin de diesel plutôt que de charbon utilisé par les navires à vapeur. Cela n'a guère freiné l'essor du moteur Diesel pour la propulsion des navires. La plupart des experts considèrent que le soutage du GNL est une situation classique "de la poule et de l'œuf". Si le carburant n'est pas disponible, la demande sera faible, mais sans demande, il est peu probable qu'il soit disponible.

3.3. Inconvénient

Malgré que l'utilisation du dual fuel montre des perspectives prometteuses, il montre aussi quelques inconvénients. Premièrement pas tous les navires ont la possibilité de fonctionner en dual fuel. Pour cela les propriétaires des navires peuvent effectuer un rétrofite. Cela nécessite un certain investissement de départ. D'après *hellenicshippingnews*, la compagnie BW Group est en train d'effectuer ces changements pour ses navires de classe VLGC. Le coût par navire est d'environ 9 millions de dollar. Deuxièmement, suite à un rétrofite un navire fonctionnant au dual fuel a toujours besoin de diesel pour fonctionner. Donc il est toujours dépendant de celui-ci.

Il faut aussi pouvoir stocker ces nouveaux carburant à bord. Ils ont une densité inférieure au diesel et donc ils prennent plus de volume :

Tableau 1 : Comparaison densité énergétique des différents carburants

Source : Martz (2011)

Carburant	Densité énergétique (par rapport au diesel)
Diesel	100%
Essence	90%
GPL	65%
Gaz naturel (GN)	18%
GNC	25%
GNL	60%

De plus ces carburants nécessitent des méthodes de transport bien particulier, car ils doivent être transportés sous forme liquide, -48°C pour le GPL et -162°C pour le GNL à pression atmosphérique. Ils sont aussi très dangereux, car inflammables.

Chapitre 2 : Les carburants et leurs émissions

1. Gaz d'échappement

Les principaux produits de la combustion des carburants pétroliers dans l'air sont le dioxyde de carbone, l'eau et l'azote. Les autres composants proviennent principalement d'une combustion incomplète.

1.1. Oxyde d'azote

Les oxydes monoazotés NO et NO₂ (NO_x) réagissent avec l'ammoniac, l'humidité et d'autres composés pour former de la vapeur d'acide nitrique et des particules connexes.

Impact sur la santé :

Les petites particules peuvent pénétrer profondément dans les tissus pulmonaires sensibles et les endommager, provoquant une mort prématurée dans les cas extrêmes. L'inhalation d'espèces de NO augmente le risque de cancer du poumon et de cancer colorectal et l'inhalation de ces particules peut provoquer ou aggraver des maladies respiratoires telles que l'emphysème et la bronchite et des maladies cardiaques.

Impact sur l'environnement : Des niveaux élevés de NO_x peuvent avoir un effet négatif sur la végétation, notamment des dommages aux feuilles et une croissance réduite. Ils peuvent rendre la végétation plus sensible aux maladies et aux dommages causés par le gel.

Les NO_x réagissent également avec d'autres polluants en présence de la lumière du soleil pour former de l'ozone qui peut endommager la végétation à des concentrations élevées.

1.2. Oxyde de soufre

Les oxydes de soufre sont les différents types de composés contenant du soufre et de l'oxygène, et dont la structure suit la formule générale S_xO_y . Aujourd'hui on recense 13 oxydes de soufre, les plus stables étant SO_2 et SO_3 . Les composés S_2O , S_2O_2 , SO_4 et SO sont entre autres instables. Ce dernier se décompose totalement en moins d'une seconde. Le plus important est le dioxyde de soufre, SO_2 est un gaz toxique incolore.

Impact sur la santé : Une concentration atmosphérique supérieure à 5 ppm devient très dangereuse pour l'Homme. Knoel (1997)

Impact sur l'environnement : Pour certaines plantes, une concentration dès 1 ou 2 ppm est déjà nocive. (Knoel (1997)

1.4. Dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone (formule chimique CO_2) est un gaz acide incolore dont la densité est supérieure d'environ 53 % à celle de l'air sec.

Impact sur la santé : Le dioxyde de carbone a une odeur forte et acide et génère un goût d'eau gazeuse dans la bouche. Cependant, aux concentrations normalement rencontrées, il est inodore. Ainsi, à 2 % de CO_2 dans l'air, l'amplitude respiratoire augmente. À 4 %, la fréquence respiratoire s'accélère. À 10 %, peuvent apparaître des troubles visuels, des tremblements et des sueurs. À 15 %, c'est la perte de connaissance brutale. À 25 %, un arrêt respiratoire entraîne le décès. (Respire asso, 2016, p. 2)

Impact sur l'environnement : Le gaz carbonique est le principal gaz à effet de serre sur notre planète.

1.3. Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone (formule chimique CO) est un gaz inflammable incolore, inodore et insipide, légèrement moins dense que l'air. Le monoxyde de carbone est produit par l'oxydation partielle de composés contenant du carbone. Il se forme lorsqu'il n'y a pas assez d'oxygène pour produire du dioxyde de carbone (CO₂), par exemple lors du fonctionnement d'un brûleur ou d'un moteur à combustion interne.

Impact sur la santé : Il y a un risque d'intoxication chez l'homme, quand une personne respire du monoxyde de carbone, ce gaz entre dans son sang et y prend la place de l'oxygène. Cela endommage les tissus et peut être très dangereux pour la santé.

Impact sur l'environnement : Le CO affecte les écosystèmes en participant à l'acidification de l'air, des sols et des cours d'eau.

En plus, ce gaz influence indirectement l'effet de serre comme il contribue à l'augmentation des principaux gaz à effet de serre tels que le CO₂ (dioxyde de carbone), le CH₄ (méthane) et le N₂O (oxyde nitreux). Ainsi, une quantité élevée en CO dans l'atmosphère contribue indirectement à un réchauffement de la planète.

En plus, le CO participe à la formation de l'ozone troposphérique, qui lui peut avoir une influence directe et néfaste sur les écosystèmes. (Le gouvernement du grand-duché de luxembourg, 2019a)

1.5. Hydrocarbure

Un hydrocarbure est un composé organique entièrement constitué d'hydrogène et de carbone. Les hydrocarbures sont généralement incolores et hydrophobes et ne dégagent qu'une faible odeur. En raison de la diversité de leurs structures moléculaires, il est difficile de généraliser davantage. La plupart des émissions anthropiques d'hydrocarbures proviennent de la combustion de combustibles fossiles, y compris la production et la combustion de carburant.

Dans la liste des hydrocarbures se trouve le méthane, propane, butane, etc.

Impact sur la santé :

Il y a différents risques sur la santé. Un risque de toxicité (par inhalation, ingestion, contact cutané), qui est variable selon les produits, parfois élevés, avec risque cancérogène pour certains d'entre eux, parmi notamment la famille des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dont le benzène.

Impact sur l'environnement : En soi, les hydrocarbures ne présentent aucun risque. Cependant, lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil et/ou aux oxydes d'azote, ils subissent une réaction chimique. Ils contribuent à l'effet de serre et à l'appauvrissement de la couche d'ozone. Elles réduisent également la capacité de photosynthèse des plantes, augmentent les taux de cancer chez les animaux, ainsi que le risque de maladies respiratoires. Le plus connu et le plus dangereux des hydrocarbures est la marée noire. Les marées noires détruisent la vie végétale marine et tuent et mettent en danger des centaines de milliers, voire des millions, d'animaux chaque année.

1.6. Particules fines

Les particules également connues sous le nom de Particules en suspension (plus connu sous l'acronyme PM qui vient de l'anglais *Particulate Matter*) ce sont des particules microscopiques de matière solide ou liquide en suspension dans l'air.

Impact sur la santé : Les effets sur la santé de l'inhalation de particules en suspension dans l'air ont été largement étudiés chez l'homme et l'animal et comprennent l'asthme, le cancer du poumon, les problèmes cardiovasculaires, la mort prématurée.

Impact sur l'environnement : Les poussières en suspension ont la capacité d'absorber et de diffuser la lumière et de provoquer ainsi une limitation de la visibilité. Des effets indésirables peuvent aussi être observés sur les écosystèmes comme les particules fines peuvent se déposer sur le sol ou peuvent être absorbées par les plantes entraînant une diminution dans la croissance de celles-ci. En se déposant sur le patrimoine immobilier, les particules contribuent aussi à la dégradation des bâtiments et des monuments en milieu urbain. (Le gouvernement du grand-duché de luxembourg, 2019b)

2. Carburant traditionnel

Nous avons décidé d'étudier deux types de carburants dits traditionnels pour leurs usages courants comme le diesel très présent comme carburant automobile, qui représente 47,8% du parc automobile belge (Gouvernement belge, 2020). Ainsi que le fioul lourd qui est un carburant très utilisé dans l'industrie maritime.

2.1. Diesel

Le diesel est issu de trois manières différentes pour être produit. La première et la plus répandue est par le raffinage du pétrole brut.

Le passage du pétrole brut aux produits pétroliers se fait en plusieurs étapes dans les raffineries. Une première distillation s'effectue à pression atmosphérique, à 350/400 °C. Les vapeurs de brut remontent dans une tour de distillation tandis que les molécules les plus lourdes restent à la base. Les résidus lourds sont soumis à une seconde distillation, dans une autre colonne.

Après ces séparations, on passe à des procédés de conversion, à 500 °C, comme le craquage catalytique ou l'hydrocraquage, qui « cassent » les molécules encore trop lourdes pour obtenir gaz, essence et gazole. Puis la dernière étape dit du procédé d'amélioration qui est là pour éliminer les molécules corrosives ou néfastes à l'environnement, en particulier le soufre.

Définition de Planete energie (2014)

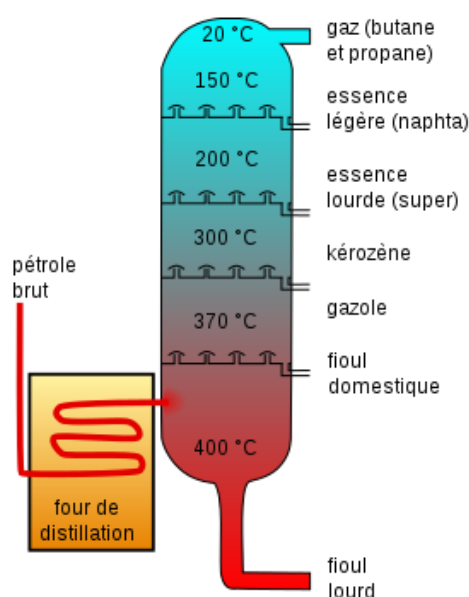


Figure 4 : Explication d'une tour de raffinage

Source :Psarianos & Knott (2007)

Des alternatives au diesel qui ne sont pas dérivées du pétrole, mais beaucoup moins présentes sur le marché. Comme le biodiesel qui peut être 100% produit par l'agriculture à partir d'éthanol et d'huile végétale.

Le carbone et l'hydrogène constituent l'origine du carburant diesel comme la plupart des combustibles fossiles. Pour un équilibre thermodynamique idéal, la combustion complète du carburant diesel ne produirait que du CO₂ et du H₂O dans les chambres de combustion du moteur (Tamphasana Devi, Patel, & Bhatla, 2010).

Cependant, de nombreuses raisons (le rapport air-carburant, le moment de la combustion, la turbulence dans la chambre de combustion, la forme de la combustion, la concentration air-carburant, la température de combustion, etc.) rendent cela impossible, et un certain nombre de produits nocifs sont générés pendant la combustion. Les produits nocifs les plus importants sont le CO, les HC, les NO_x et les PM.

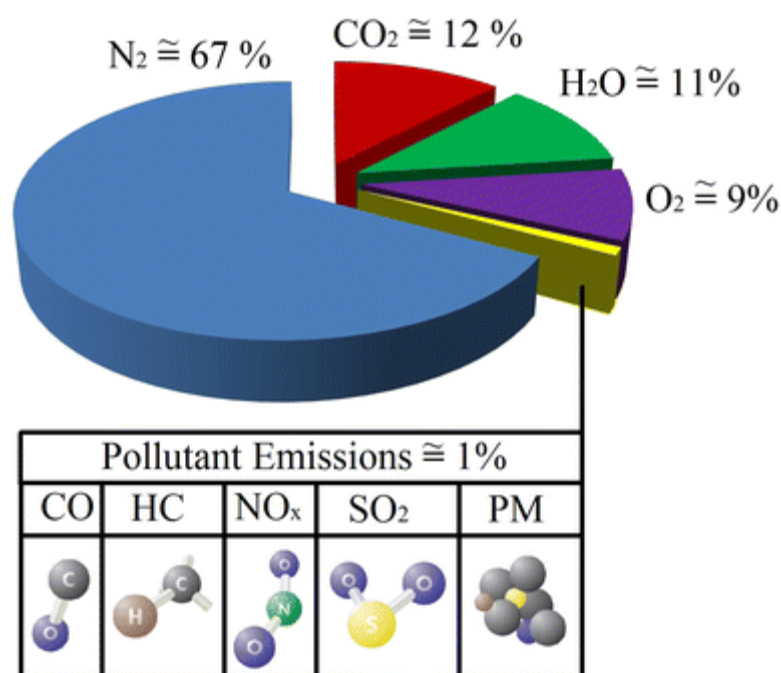


Figure 5 : Compositions des gaz d'échappement du diesel

Source : Majewski & Khair (2006)

2.2. Fioul lourd marin

Le fioul lourd abrégé FOL en français, mais plus connu sous le nom de HFO pour *Heavy Fuel Oil* en anglais est le carburant marin le plus utilisé dans l'industrie maritime. Issu de la distillation du pétrole, il fait partie de la coupe pétrolière la plus lourde.

Tableau 2 : Composition fioul lourd marin

Source : Winnes & Fridell (2009)

Propriétés	Fioul lourd
Viscosité à 50°C (mm ² /sec)	404
Densité à 15°C (g/cm ³)	0.9895
Carbone (% wt)	87.7
Hydrogène (% wt)	10.4
Nitrogène (% wt)	0.46
Souffre (% wt)	1.6
Oxygène (% wt)	<0.3
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	40.43

*wt = masse fraction (en anglais), fraction massique (en français)

Tableau 3 : Compositions gaz d'échappement FOL

Source : Winnes & Fridell (2009)

Carburant	PM (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	HC (g/kWh)	CO ₂ (g/kWh)	SO ₂ (g/kWh)
FOL	0.42 – 1.25	14.0	0.5	677	11.5

Émissions spécifiques résultantes de particules et de gaz (g/kWh) pour le moteur diesel d'un camion-citerne de 4,5 MW fonctionnant avec du HFO à partir de l'analyse des gaz d'échappement.

2.3 Carburant en mode bicarburant

3.1. Mélange diesel/GPL

Le gaz de pétrole liquéfié est un mélange de propane et butane stocké sous forme liquide. Issue du raffinage du pétrole brut, le butane et le propane constituent entre 2 et 3 % de l'ensemble des produits obtenus. Ils constituent les coupes les plus légères issues de la distillation du pétrole brut. Ces gaz sont également récupérés à l'issue d'opérations de traitement « secondaires », après la phase de distillation. Selon sa provenance, une tonne de pétrole brut traité produit 20 à 30 kg de GPL « Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) » (2013).

Cette étude menée par le département d'ingénierie mécanique de puissance à la faculté d'ingénierie de Mattaria à l'université de Helwan, au Caire en Égypte a voulu connaître quel est le meilleur de propane et butane dans le GPL pour un moteur fonctionnant à la bicarburation.

Dans cette étude ils ont utilisé un moteur non préparé pour un fonctionnement en bicarburation auquel ils ont adapté un système de retrofit, basé sur un pré-mélange de air/gaz avant l'admission.

Tableau 4 : Caractéristique du moteur de test

Source : Saleh (2008)

Model	112M – Helwan
Type	4 temps, injection directe
Refroidissement	Par eau
Nombre de cylindres	2
Diamètre du cylindre (mm)	112
Course (mm)	115
Volume (cm ³)	2266
Ratio de compression	16.4
Vitesse (rpm)	1500
Puissance (HP)	26

Tableau 5 : Propriétés des carburants

Source : Saleh (2008)

Propriété	Propane	Butane	Diesel
Gravité spécifique, pour le gaz (à 15°C, 1 atm)	1.55	2.07	0.83
pour le diesel à 15°C	Gaz	Gaz	Liquide
Pouvoir calorifique, kJ/kg	46300	45800	43162
Teneur en soufre par poids, %.	0.02	0.02	0.5
Besoin théorique en air, kg/kg	15.6	15.4	14.5
Température d'inflammabilité, °C	1980	1775	1720
Point d'ébullition, °C	-42	-0.5	260
Limite inférieure d'inflammabilité, vol%	2.1	1.86	0.6
Limite supérieure d'inflammabilité, vol%	10.1	8.41	5.6

Tableau 6 : Résultats pour le mélange GPL par rapport au 100% diesel

Source : Saleh (2008)

Propane (%)	Butane (%)	η_{fc} (%)	NO _x (%)	CO (%)	SO ₂ (%)
90	10	-0.33	-1.1	0.4	-2
70	30	-0.33	-6.7	0.8	-4.4
90	10	-1.0	-6.5	1.0	-2.2
70	30	-3.0	-21.5	1.3	-5.8

Dans cette étude, le diesel a été remplacé à 40% et nous voyons clairement que c'est le mélange de 70% de propane et 30% de butane qui est le plus performant. Il faut noter que lors de cette étude les mesures ont été effectuées à pleine charge et le moteur a été équipé d'un RGE (recirculation des gaz d'échappement).

3.2. Mélange diesel/GNL

Le gaz naturel est essentiellement composé de méthane. La majorité de la production mondiale provient de gisement (c'est alors un gaz naturel fossile). Mais une solution alternative existe à l'extraction, car il est possible de produire du biogaz. Ce gaz issu de la fermentation de produit organique produit du méthane, une fois purifié nous obtenons du biométhane qui peut être utilisé dans le réseau.

Dans cette étude menée par le laboratoire des moteurs à combustion interne du département de génie mécanique à l'institut national de technologie de Rourkela en Inde, a pour objectif de mesurer les bénéfices d'une bicarburant avec du gaz naturel. Le gaz naturel liquéfié (GNL) est du gaz naturel (principalement du méthane, CH_4 , avec un certain mélange d'éthane, C_2H_6) qui a été refroidi jusqu'à l'état liquide pour faciliter et sécuriser le stockage ou le transport non pressurisé. Dans cet institut, ils ont utilisé du biogaz qui a été produit par digestion anaérobie de gâteaux déshuilés non comestibles provenant d'unités de broyage d'huile.

Dans cette expérience c'est aussi un mélange air/gaz qui est injecté dans la chambre de combustion.

Tableau 7 : Caractéristique du moteur de test

Source : Barik & Murugan (2014)

Description	Valeurs
Type	4 temps, injection directe
Nombre de cylindres	1
Diamètre du cylindre (mm)	87.5
Course (mm)	115
Volume (cm^3)	662
Ratio de compression	17.5
Vitesse (rpm)	1500
Puissance (KW)	4.4

Tableau 8 : Caractéristique du biogaz

Source : Barik & Murugan (2014)

Propriété	Valeurs
Pouvoir calorifique (Mj/kg)	27.53
Densité à 1 atm, 15°C (kg/m ³)	1.2
Ratio stœchiométrique	17.23
Limite d'explosivité (vol% dans l'air)	7.5 - 14
Nombre d'octane	130
Température d'auto-inflammation (°C)	600 - 650
Équivalent en carburant (huile/m ³ de gaz)	0.6 – 0.65
Limite d'explosion (vol% dans l'air)	6 - 12
Pression critique (bar)	75 – 89
Température critique (°C)	-82.5
Point d'ébullition (°C)	-120 à -150

Tableau 9 : Résultats pour le mélange GNL par rapport au 100% diesel

Source : Barik & Murugan, (2014)

Débit de gaz	CO	HC	NO	Fumée
1.2 kg/h	+ 24%	+ 41%	- 42.8%	- 62%
0.9 kg/h	+ 17%	+30 %	*	- 49%

*Plus faible qu'une utilisation 100% au diesel, mais données non communiqué

3.3 Interprétation des résultats en bicarburant

Nous observons que dans les études déjà mener que lorsque que nous utilisons un moteur bicarburant que ce soit sous GPL ou encore sous GNL les résultats sont presque identiques.

Dû à l'augmentation du CO₂ dans la chambre de combustion. Cette augmentation est due à plusieurs facteurs ; premièrement le gaz ne remplace pas seulement le diesel, mais aussi l'air admis dans le moteur. Deuxièmement la teneur en carbone dans les gaz. Le CO₂ favorise les combustions incomplètes donc augmente le niveau de CO dans les gaz d'échappement. Les CO augmentent aussi, car les gaz contiennent du carbone. Dans l'étude menée sur le moteur bi carburant utilisant du GPL, si le ratio de propane augmente les CO augmente aussi, car le butane est plus riche en carbone/hydrogène que le propane.

Mais aussi diminue les NO car comme la concentration de CO₂ qui a une chaleur spécifique molaire élevée, dilue la charge et abaisse considérablement la température du cycle. En outre, le CO₂ contenu dans le gaz réduit la concentration en oxygène de la charge, ce qui entraîne une baisse générale de la température du cycle.

Les oxydes de souffres diminue, car les carburants de substitutions sont plus pauvres en soufre que le diesel.

Les émissions de HC sont dues à la combustion incomplète du carburant. L'admission du biogaz par le collecteur d'admission réduit le volume d'air aspiré ; la combustion se fait donc avec moins d'oxygène, ce qui entraîne une augmentation des émissions de HC. Le chevauchement entre les soupapes d'admission et d'échappement pour faciliter l'aspiration peut également entraîner une augmentation des émissions d'HC pour la combustion de bicarburant, car le mélange d'air et de biogaz non brûlé quitte le cylindre par le collecteur d'échappement.

Les émissions de particules fines elles aussi diminuent quand nous utilisons un carburant de substitution. (Kang, Chu, Lee, Kim, & Min, 2018; Liu, Yang, Wang, Ouyang, & Hao, 2013)

Chapitre 3 : Adaptation du moteur

1. Le moteur

Pour ce projet nous utiliserons le générateur électrique JAVAC SDE 6500 T2 pouvant fournir une puissance 4.2 KW et une puissance maximale de 4.5 KW. Pour cela il est alimenté grâce à un moteur diesel Yamasaki. Ce monocylindre à injection direct fournit une puissance de 9.8 CV à 3000tr/min.

Tableau 10 : Caractéristique du générateur JAVAC

Source : d'après le catalogue JAVAC

Voltage	230/380 50Hz
Fusible	16 Amp
Efficiencie	60%
Courant Maximal	+10% sur 6 min
Puissance	4.2 KW
Puissance maximale	4.5 KW
TPM	3000 tpm
Cos phi	0.99
Alternateur	2 + 3 KW/220/380
Puissance moteur	9.8 CV Diesel
Refroidissement	Refroidissement par air
Injection	Direct
Contenue moteur	418 cc
Compression	20/1

À l'aide de ces informations, nous pouvons déduire la quantité d'air absorbé par le moteur. Ce moteur à un volume de 0,418 litre, comme le moteur n'est pas 100% étanche entre le moment d'échappement et d'admission nous supposons qu'il absorbera 90% de ce volume soit environ 0,376 litre. Comme le moteur a une rotation 3000tr/min en fonctionnement normal et que c'est un 4T, il y a 1500 phases d'admission par minute ce qui fait 564 litres d'air par minute ou 0,73 kg d'air par minute.

2. Adaptateur

2.1. Admission de gaz

Pour injecter du gaz dans le moteur, il existe deux manières principales :

2.1.1. Injection directe

C'est un système qui est présent sur les navires fonctionnant au bicarburant. Une injection directe signifie que le gaz est injecté directement dans la chambre de combustion comme pour le diesel. Le mélange s'effectue alors direct dans le cylindre.

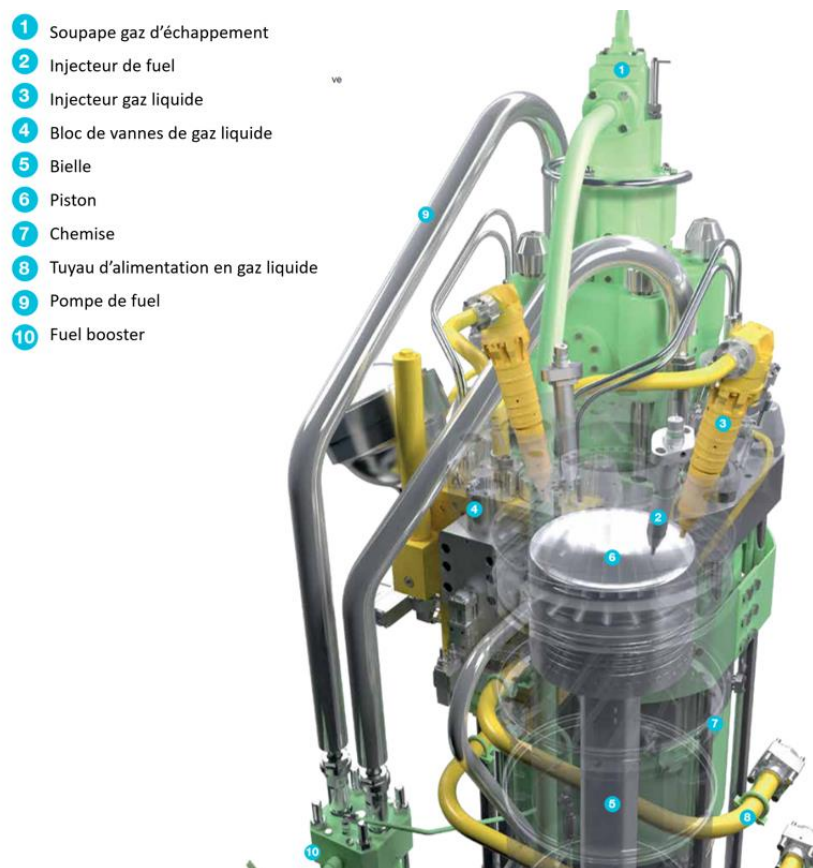


Figure 6 : Système bicarburant injection direct

Source : MAN (s. d.)

C'est un système complexe nécessitant au minimum de deux injecteurs pour admettre les deux carburants dans le cylindre. Ce système a besoin d'une haute pression pour être injecté dans le système. C'est un système complexe fonctionnant grâce à des pompes basse et haute pression.

2.1.2. Injection indirecte

La seconde méthode consiste en l'injection du carburant de substitution dans l'admission d'air.

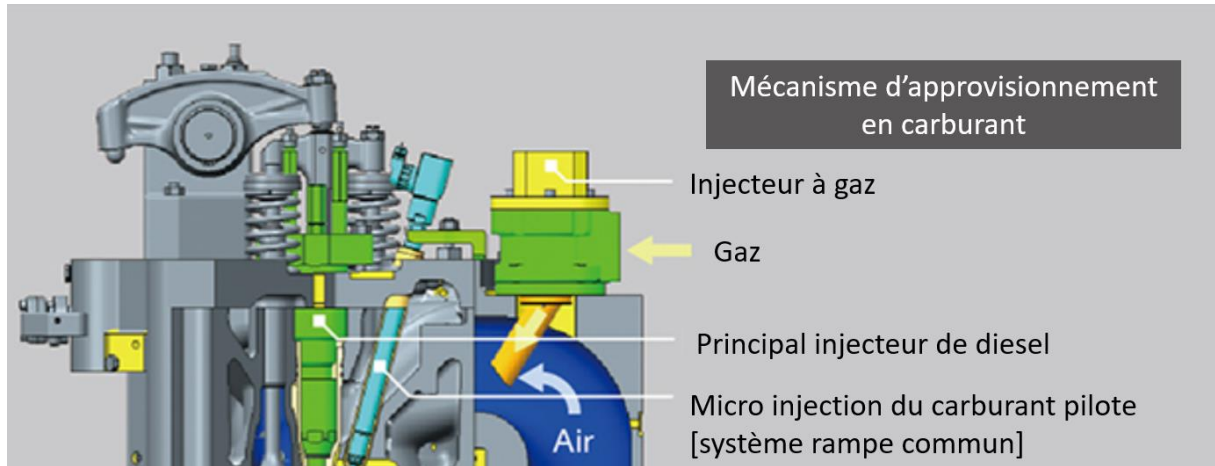


Figure 7 : Système bicarburant à injection indirect

Source : Yanmar (s. d.)

Ce système que nous trouvons sur des moteurs de plus petite puissance a l'avantage de nécessiter d'un système moins complexe pour pouvoir fonctionner.

Pour que nous puissions injecter un second carburant dans le moteur, nous allons donc nous baser sur ce second système à injection indirect. Pour cela nous devons créer un adaptateur qui nous permettra d'injecter dans la chambre de combustion un mélange air/gaz déjà mélangé.

2.2. Carburateur

Le carburateur permet de fournir au moteur un mélange air/carburant vaporisé dans une certaine proportion. On le retrouve sur les moteurs essence.

2.2.1. Le carburateur élémentaire

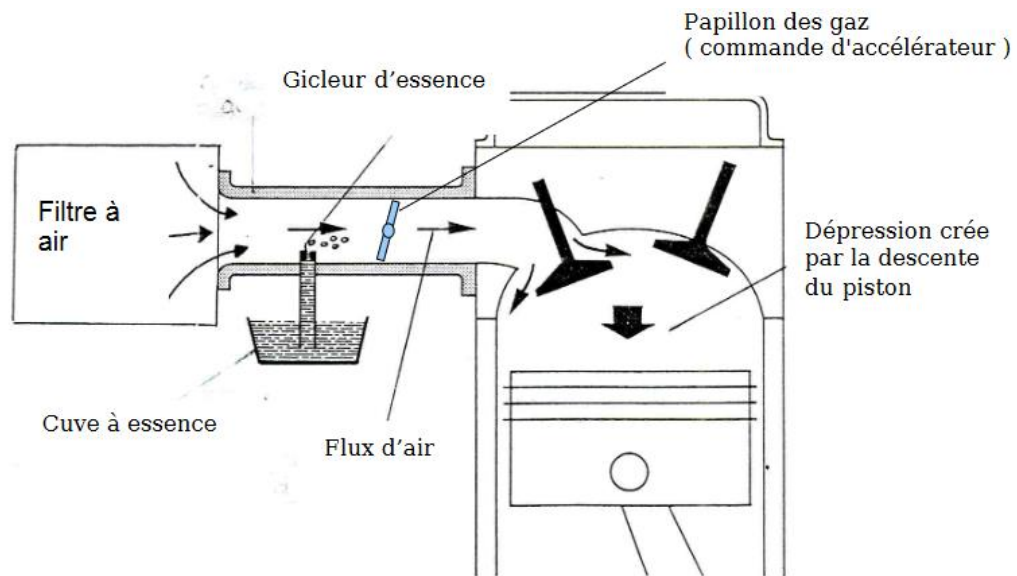


Figure 8 : Schéma carburateur élémentaire

Source : leschroniquesdegoliath.com, s. d

Dans ce type de carburateur l'aspiration du carburant par l'air se fait grâce à la dépression créée par la descente du piston à son PMI. C'est la phase d'admission.

2.2.2. Le carburateur avec venturi

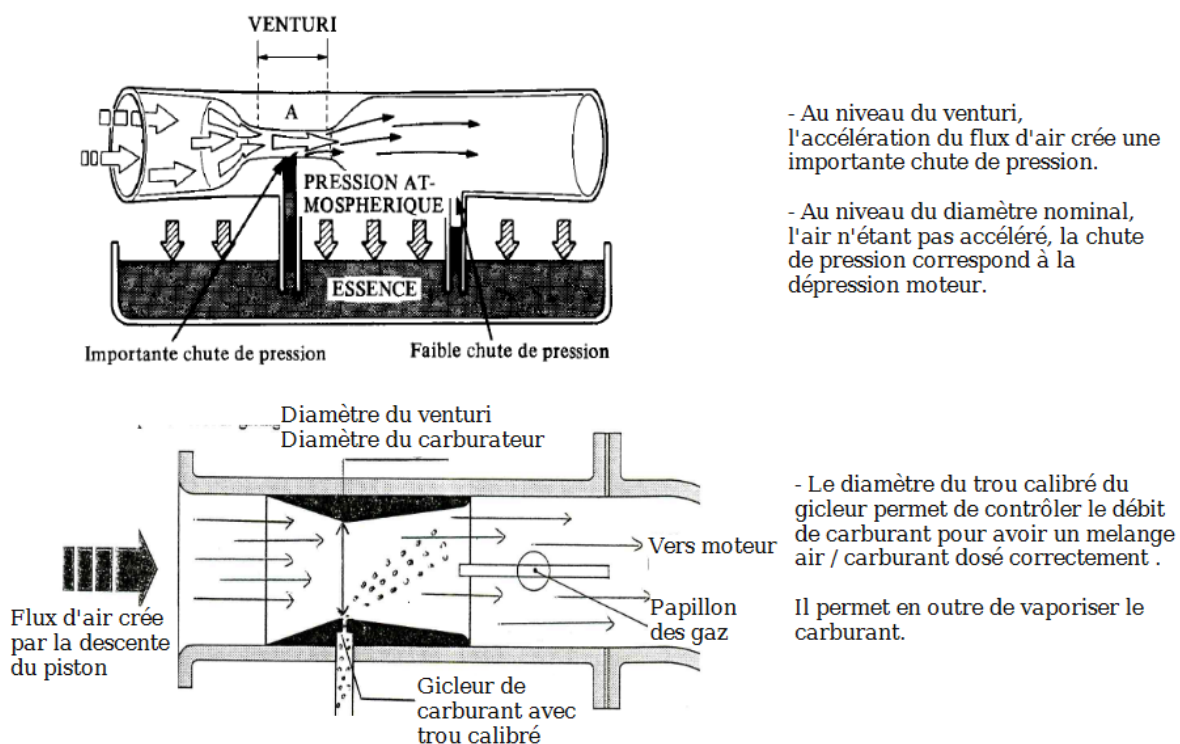


Figure 9 : Schéma carburateur à venturi

Source : leschroniquesdegoliath.com, s. d.

2.3. Les adaptateurs installation automobile

Aujourd'hui, l'utilisation de gaz comme le GPL dans les véhicules essence est de plus en plus courante.

Le mélangeur – diffuseur distribue le gaz d'une manière dite décentralisée (monopoint).

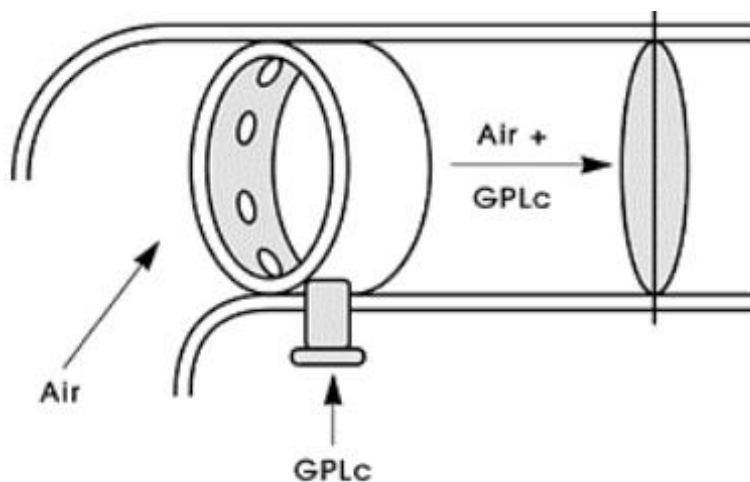


Figure 10 : Montage mélangeur – diffuseur

Source : Dossier technique A.N.F.A. (2000)



Figure 11 : Mélangeur de gaz

Source : LOGASMART, s. d.

Cette pièce permet l'injection et le mélange dans le conduit d'admission d'air du moteur. Suite à une modification précédente du moteur pour un autre sujet de mémoire le moteur en été équipé.



Figure 12 : Mélangeur présent sur le moteur

Source : photo personnelle

Comme c'est un mélangeur pour voiture celui était sur dimensionné pour ce moteur.

3. Adapteur pour générateur JAVAC

Comme vu précédemment le système déjà présent n'est pas adapté pour ce projet. Nous devons donc réaliser un nouveau système. Comme nous injectons des quantités réduites le monde automobile n'est pas dimensionné pour donc nous nous sommes orientés vers ce qu'il se fait avec les brûleurs.

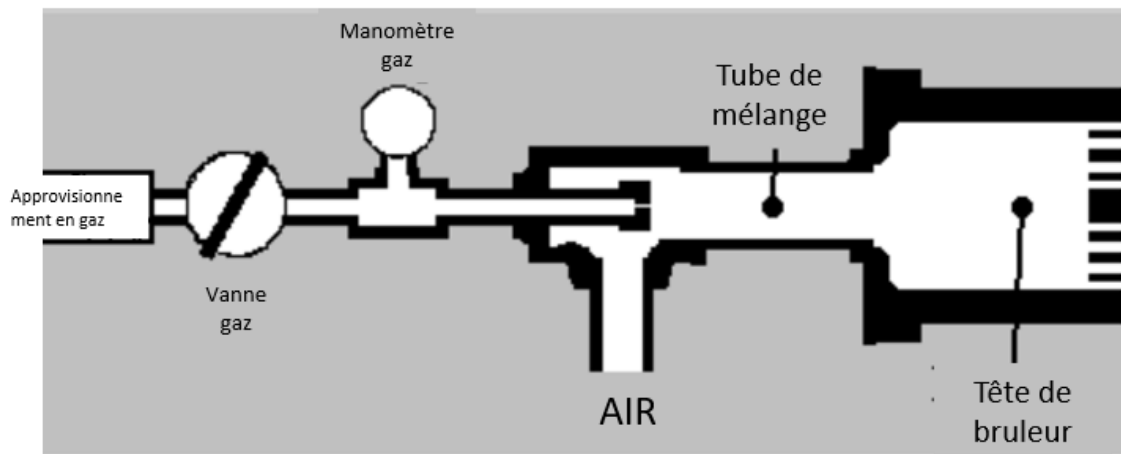


Figure 13 : Schéma mélangeur air/gaz

Source : joppaglass.com, s. d. , traduction personnelle

3.1. Mélangeur Air/Gaz

En nous inspirant de modèle déjà existant nous avons choisi de créer une admission sans effet venturi et de baser nos constructions sur le carburateur élémentaire, afin d'injecter le gaz dans le conduit d'admission.

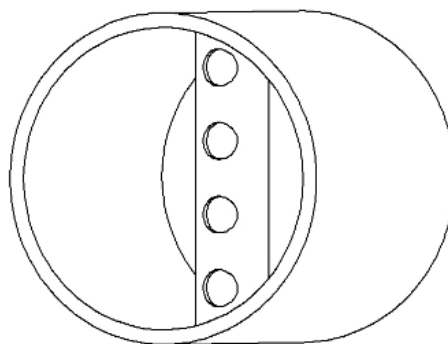


Figure 14 : Croquis mélangeur Air/gaz

Source : Propre travail

3.2. Circuit de gaz

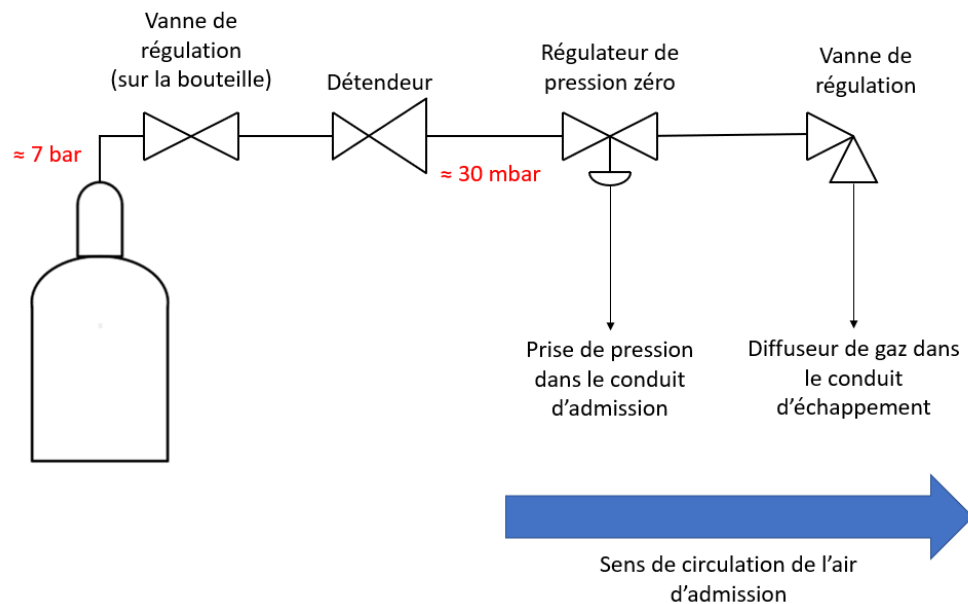


Figure 15 : Schéma du circuit de gaz

Source : Propre travail

3.2.1. Régulateur de proportion variable

Cette valve de régulation joue le rôle de la cuve à niveau constant dans un carburateur. Car comme dans un carburateur plus le niveau d'essence est haut plus le débit sera élevé. Dans ce circuit c'est la même chose, plus la pression est élevée plus le débit le sera aussi. La valve va donc réguler le débit à partir de la pression dans le conduit d'admission afin que le gaz injecté soit de pression équivalente ou une légère surpression.

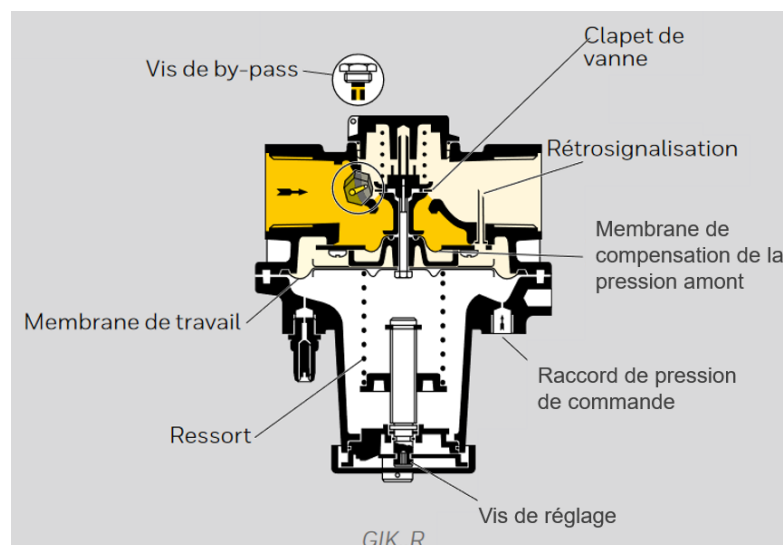


Figure 16 : Régulateur de proportion variable

Source : Krom Schroder (2012)

3.3 Adapteur de l'admission

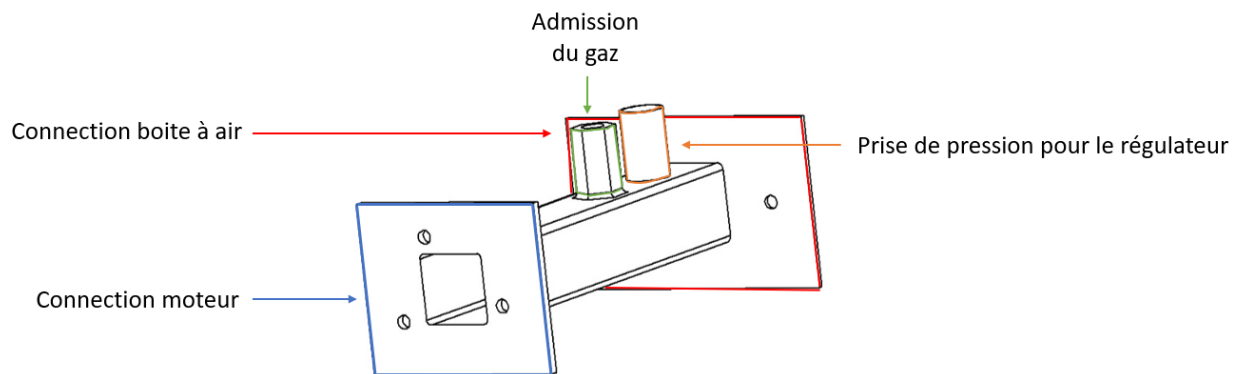


Figure 17 : Schéma adaptateur admission

Source : Propre travail

Voici la pièce que nous allons créer afin de l'insérer entre la boîte à air et l'orifice d'admission du moteur. Grâce à cette pièce nous allons pouvoir injecter le gaz et prendre la mesure la pression dans le conduit d'admission.

Cette pièce est l'assemblage d'un tube de carrée de 35 mm avec une longueur de 200 mm. De chaque côté une plaque soudée sert de fixation au moteur ainsi que pour la boîte à air. Sur la face du haut, deux perçages sont effectués le premier sur lesquels nous avons soudé une douille taraudée afin de connecter la prise de mesure de la pression. Le second perçage de 10mm avec un écrou sans taraudage afin d'insérer le diffuseur à gaz.



Figure 18 : Adaptateur

Source : Propre travail

3.4 Diffuseur de gaz

Pour réaliser le diffuseur que nous allons insérer dans l'adaptateur nous avons utilisé un tube rond de 10 mm de diamètre auquel nous avons obstrué une extrémité à l'aide d'une soudure. Pour diffuser le gaz, nous avons réalisé différents percages de 2,5 mm sur la partie insérée du tube.

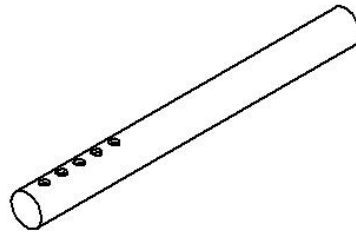


Figure 19 : Schéma diffuseur

Source : Propre travail

3.5 Représentation théorique de l'assemblage

Une fois le diffuseur assemblé dans l'adaptateur, voici ce qu'il devrait se passer dans l'installation. Le gaz arrivant par le haut grâce au diffuseur va se mélanger avec l'air d'admission dans l'adaptateur.

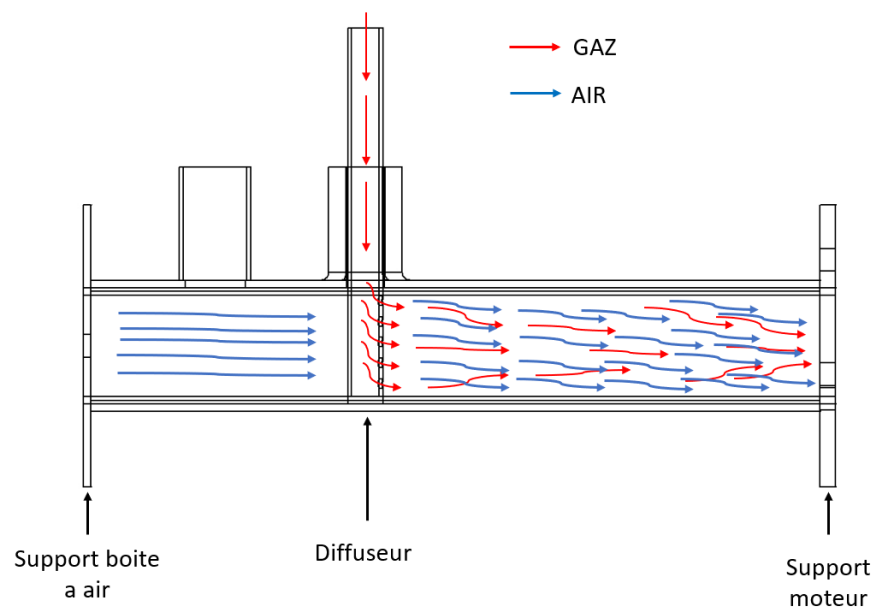


Figure 20 : Schéma de l'assemblage avec exemple de diffusion

Source : Propre travail

3.6 Assemblage

Une fois les plans et les pièces rassemblés nous avons procédé à l'assemblage de l'installation.



Circuit de gaz

Prise de pression dans le
conduit d'admission

Boîte à air

Régulateur de pression zéro

Diffuseur

Figure 21: Vue de face de l'assemblage de l'installation

Source : Propre travail

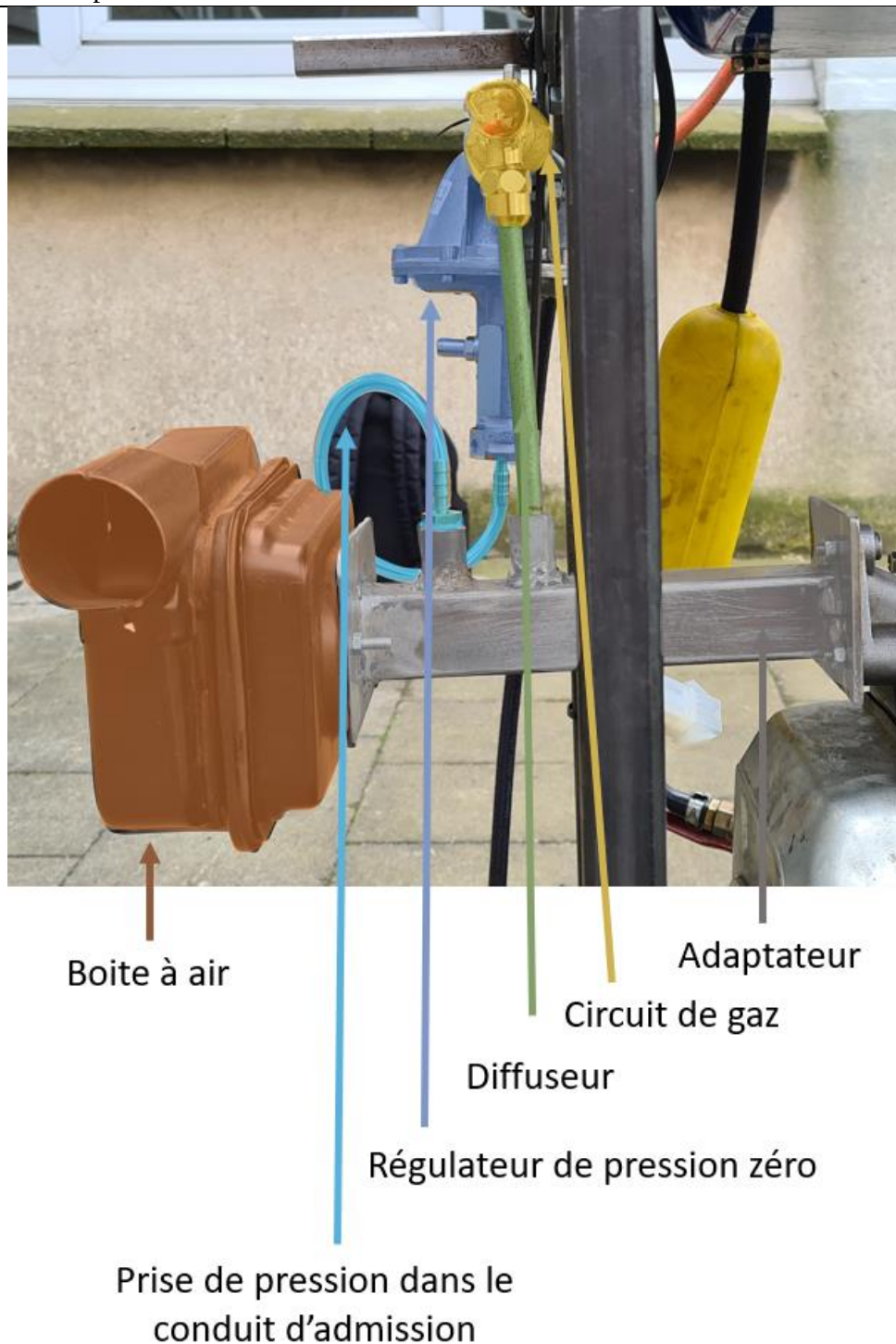


Figure 22 : Vue de côté de l'assemblage de l'installation

Source : Propre travail

Afin de connaître l'étanchéité du circuit de gaz, nous l'avons mis sous pression à l'aide d'un compresseur et d'un nanomètre. Une pression de 1 bar est admise dans le circuit, toute en fermant la vanne avant le diffuseur. Après une heure la pression est toujours à un bar donc notre circuit est étanche.

3.7 Démarrage

Nous avons procédé à un premier démarrage sous GPL. Pour cela nous devons toujours effectuer le démarrage sans gaz soit 100% au diesel. Afin d'éviter une surpression dans le moteur est de créer des dommages irréversibles.

Lors de ce premier démarrage, nous avons fait face au phénomène de cognement dans le moteur alors que nous injectons une infime partie de gaz.

Le phénomène de cognement : Ce sont les taux élevés de montée en pression associée à l'auto-allumage du carburant pendant la phase de combustion pré-mélangée qui produisent le bruit caractéristique de "cognement" largement associés aux moteurs diesel. Ce bruit est souvent appelé "cognement diesel" ou "rugosité de la combustion". Lorsqu'il est excessif, le cognement du diesel entraîne la propagation d'ondes de pression de grande amplitude à des fréquences régies par la résonance de la chambre de combustion et, comme dans le cas du cognement de l'allumage commandé, il peut être extrêmement préjudiciable à la durée de vie du moteur. Le cognement du moteur diesel n'a pas été un facteur fondamentalement limitant de la même manière que le cognement de l'allumage commandé en termes de conception du moteur, cependant, le cognement du moteur diesel est reconnu comme un problème considérable associé à l'utilisation de carburants alternatifs dans les moteurs diesel de type bicarburant. L'utilisation croissante des biocarburants et les limites de performance associées à un cognement excessif dans les moteurs bicarburants font du cognement un paramètre important à surveiller, tant du point de vue des performances du moteur que de la santé.

Traduction de "DIESEL KNOCK COMBUSTION AND ITS DETECTION USING ACOUSTIC EMISSION" Lowe, Lin, Wu, & Tan, s. d.

Afin de limiter, voire supprimer ce problème nous avons essayé intervenir sur la quantité de diesel injecté. Nous avons décidé de réduire la quantité de diesel afin diminuer la vitesse par deux. Pour cela nous avons utilisé un tachymètre (car le moteur n'est pas équipé d'un compte tour d'origine) que nous avons placé sur le volant moteur afin de trouver le réglage qui nous permet de maintenir la vitesse du moteur à 1500 tr/min.

Une fois la vitesse atteinte nous avons renvoyé du gaz et pus injecter une quantité quasiment égale qu'a l'utilisation normale du moteur avant que l'effet de cognement réapparaisse.

Chapitre 4 : L'expérience

1. Outils de mesure

Pour mesurer les gaz d'échappement de notre moteur en utilisation mono et biocarburants afin d'observer s'il y a des changements nous allons utiliser un coffret d'analyse pour système d'analyse de combustion de la marque Testo (TESTO 350 MARITIME). Pour mesurer la concentration en ppm des différents gaz présents après la combustion des différents carburants nous allons utiliser la sonde présente qui permet la détection de O₂, CO, NOX (NO + NO₂ séparément), SO₂.

Pour ce faire Mr Janssens a préalablement crée un conduit d'échappement pouvant accueillir la sonde.

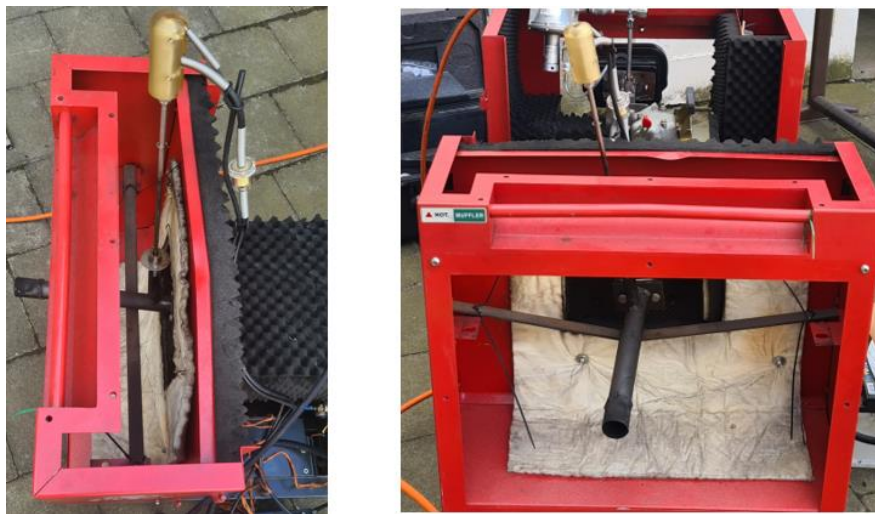


Figure 23 : Support + sonde de mesure des gaz d'échappement

Source : Propre travail

3. Méthodologie de la mesure

Pour mesurer les gaz d'échappement, nous avons besoin de faire plusieurs échantillonnages de 5 minutes en alternant avec une charge et sans charge. La charge utilisée est un chauffage de 2KW.

Premièrement avec un fonctionnement 100% diesel nous allons effectuer au total huit testes, quatre sans charge puis quatre avec charge, toujours en les alternant et laissant une minute entre chaque changement de conditions afin que les gaz d'échappement ce régule.

Une fois les mesures effectuées nous basculons sur utilisation bicarburant et recommençons la même méthode. Pour le fonctionnement à bicarburation, nous avons réglé la quantité de gaz à la limite du cognement moteur quand celui-ci était sans charges.



Figure 24 : Présentation du dispositif de test

Source : Propre travail

Pour alimenter le moteur en gaz nous avons utilisé une bouteille de gaz GPL propane de l'entreprise PRIMAGAZ. Cette bouteille à un contenu de 10,5 kg de propane.

Les mesures on était effectué a la vitesse de fonctionnement d'origine du générateur c'est-à-dire à 3000tr/min.

Le jour des essais, la température extérieure était aux alentours de 14°C, un vent d'environ 20 km/h et un temps nuageux.

4. Les résultats

Une fois nos mesures collectées, nous avons effectué une moyenne des données relevées pour chaque échantillon d'une durée de 5min (voir Annexe A).

Premièrement, nous pouvons comparer les résultats sans charges.

Nous observons une diminution des NO_x de -6,05%, cette variation est légère, car nous utilisons du GPL propane. Comme l'explique l'étude de l'institut national de technologie de Rourkela en Inde sur l'influence du ratio de propane butane qui compose le GPL. Ainsi plus le propane représente une quantité importante de ce ratio, moins l'impact sur les NO_x est important.

La raison principale est que le propane agit comme un diluant dans le mélange imbrûlé, augmentant la capacité thermique de la charge de la bouteille et réduisant efficacement la quantité d'oxygène libre qui peut réagir avec l'azote pour produire des NO_x (Saleh, 2008).

Les émissions de NO sont plus faibles dans le cas de l'utilisation de la bicarburation que dans celui du diesel de -40,70%. Ceci est dû à la présence de CO_2 qui augmente de presque 11% et comme le CO_2 a une chaleur spécifique molaire élevée, dilue la charge et abaisse la température du cycle de manière significative. En outre, le CO_2 présent dans le gaz réduit la concentration en oxygène de la charge, ce qui entraîne une baisse générale de la température du cycle. Par conséquent, la formation de NO est supprimée par l'effet combiné de ces phénomènes.

Le NO_2 augmente lui de manière significative, +31,28%, mais reste tout de même une petite partie des NO_x , car dans une utilisation 100% au diesel le moteur rejette en moyennes 26,57 ppm et en mode bicarburation à 34,89 ppm.

Par contre nous notons une forte augmentation du monoxyde de carbone dans les gaz d'échappement de +57,95%. Cela est dû à une combustion incomplète en raison d'un manque d'oxydant, car l'injection d'un mélange carburant/air plus élevé va entraîner une combustion inadéquate.

Tableau 11 : Différence entre 100% diesel et en bicarburation (sans charge)

Source : Propre travail

COMPARAISON	% CO2d	% O2d	ppm NOxd	mg/m ³ NOxd	ppm H2d	ppm NOd	ppm NO2d	ppm COd	ppm SO2d
100% DIESEL sans charge	1,60	0,09	55,03	73,63	27,05	28,41	26,57	301,69	22,25
BICARBURANT sans charge	1,78	0,36	51,70	69,27	30,71	16,85	34,89	476,52	22,97
Résultat	10,98%	-	-3,33	-4,36	+3,66	-11,56	+8,31	+174,83	+0,71
			-6,05%			-40,70%	+31,28%	+57,95%	+3,21%

Dans un second temps nous avons effectué des relevés en rajoutant une charge de 2KW sur le générateur sans faire varier la quantité de gaz admise. Ce qui a pour influence d'augmenter la quantité de diesel admis dans le cylindre. Car ce moteur est équipé dans un gouverneur qui va réguler sa vitesse à 3000tr/min.

Ce qui a pour effet de réduire l'impact du gaz sur les changements dans les gaz d'échappement.

Tableau 12 : Différence entre 100% diesel et en bicarburation (avec charge)

Source : Propre travail

COMPARAISON	% CO2d	% O2d	ppm NOxd	mg/m ³ NOxd	ppm H2d	ppm NOd	ppm NO2d	ppm COd	ppm SO2d
100% DIESEL avec charge	2,45	0,00	134,94	180,84	21,20	107,65	27,29	195,87	24,81
BICARBURANT avec charge	2,69	0,00	138,04	184,94	23,81	98,57	39,42	302,18	31,34
Résultat	9,60%	0,00%	+3,10	+4,09	+2,61	-9,08	+12,13	+106,31	+6,53
			+2,30%			-8,43%	+44,47%	+54,28%	+26,30%

Conclusion

Nous avons vu, dans les pages précédentes, l'intérêt d'utiliser dans le domaine maritime un système bicarburant car celui-ci apporte des avantages économiques et écologiques. C'est pourquoi, dans ce travail de fin d'études, nous avons créé un système pour convertir un moteur diesel en moteur polycarburant basé sur un fonctionnement en bicarburation.

Nos recherches ont établi qu'une injection indirecte était le choix le plus réaliste par rapport à un système d'injection direct du gaz dans le cylindre. Pour injecter ce gaz, nous nous sommes inspirés du système de carburateur que l'on trouve sur les moteurs essence, mais adapté pour injecter du gaz.

Une fois ce moteur réalisé, nous l'avons fait fonctionner sous son régime habituel (diesel) puis en mode bicarburation (gaz propane) afin de comparer les changements dans les gaz d'échappement. Ces tests ont permis de mettre en évidence un changement positif dans les émissions des gaz d'échappement qui sont moins polluants. Ces améliorations constatées dans les émissions pourraient être encore plus importantes si nous changions les caractéristiques du carburant de substitutions. Par exemple en remplaçant le propane par un mélange de propane et de butane comme le démontrent d'autres études.

Ce mémoire a permis de démontrer qu'un système de biocarburant est plus écologique. Et que par ailleurs ce système combiné avec d'autres méthodes permettrait de rendre les moteurs thermiques moins polluants et donc ce système devraient être de plus en plus présent dans le futur.

Bibliographie

- Barik, D., & Murugan, S. (2014). Investigation on combustion performance and emission characteristics of a DI (direct injection) diesel engine fueled with biogas–diesel in dual fuel mode. *Energy*, 72, 760-771. doi:10.1016/j.energy.2014.05.106
- Dossier technique A.N.F.A. (2000). GPL C. Consulté le 17 mai 2021, à l'adresse http://www.educauto.org/files/file_fields/2013/11/18/gplc.pdf
- European Environment Agency. (2020). *Healthy environment, healthy lives how the environment influences health and well-being in Europe*. Consulté à l'adresse https://www.eea.europa.eu/publications/healthy-environment-healthy-lives/at_download/file
- Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) : Définition, composition, chiffres clés sur le butane et le propane. (2013, 21 avril). Consulté le 22 mai 2021, à l'adresse <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gaz-de-petrole-liquefies-gpl>
- Golng. (s. d.). News. Consulté le 21 mars 2021, à l'adresse http://www.golng.eu/en/news___/why-dual-fuel-is-the-best-answer-for-gas-fuelled-ships-15862.html
- Gouvernement belge. (2020, 14 septembre). Parc de véhicules | Statbel. Consulté le 21 mai 2021, à l'adresse <https://statbel.fgov.be/fr/themes/mobilite/circulation/parc-de-vehicules>
- Joppaglass. (s. d.). Burners, Page 2. Consulté le 17 mai 2021, à l'adresse <https://www.joppaglass.com/burner/burnr2.html>
- Kang, J., Chu, S., Lee, J., Kim, G., & Min, K. (2018). Effect of operating parameters on diesel/propane dual fuel premixed compression ignition in a diesel engine.

International Journal of Automotive Technology, 19(1), 27-35. doi:10.1007/s12239-018-0003-6

Knovel (Firm). (1997). *Chemistry of the elements*. Place of publication not identified: Elsevier.

Krom Schroder. (2012). Régulateurs de proportion gaz GIK. Consulté le 17 avril 2021, à l'adresse

<https://docuthek.kromschroeder.com/documents/download.php?lang=fr&doc=52215>

Le gouvernement du grand-duché de luxembourg. (2019a, 5 juin). Effets du CO sur la santé et

l'environnement. Consulté le 7 mai 2021, à l'adresse

[http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/CO/effets-](http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/CO/effets-CO.html)

[CO.html](http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/CO/effets-CO.html)

Le gouvernement du grand-duché de luxembourg. (2019b, 5 juin). Effets des PM sur la santé

et l'environnement. Consulté le 7 mai 2021, à l'adresse

[http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/PM/sante-et-](http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/PM/sante-et-environnement-PM.html)

[environnement-PM.html](http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/PM/sante-et-environnement-PM.html)

Le Quéré, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., Marland,

G., et al. (2013). The global carbon budget 1959–2011. *Earth System Science Data*,

5(1), 165-185. Copernicus GmbH. doi:<https://doi.org/10.5194/essd-5-165-2013>

Les chroniques de goliath. (s. d.). Carburateur. Consulté le 9 avril 2021, à l'adresse

<https://www.leschroniquesdegoliath.com/wp-content/uploads/2015/02/carburateur.pdf>

Liu, J., Yang, F., Wang, H., Ouyang, M., & Hao, S. (2013). Effects of pilot fuel quantity on

the emissions characteristics of a CNG/diesel dual fuel engine with optimized pilot

injection timing. *Applied Energy*, 110, 201-206. doi:10.1016/j.apenergy.2013.03.024

LOGASMART. (s. d.). Mélangeur de gaz, 52mm, gpl, gnc, Conversion de gaz, système

traditionnel, carburateur, EFI, essence, pour voiture | AliExpress. Consulté le 17 mai

2021, à l'adresse <https://fr.aliexpress.com/i/32904707055.html>

- Lowe, D. P., Lin, T. R., Wu, W., & Tan, A. C. C. (s. d.). DIESEL KNOCK COMBUSTION AND ITS DETECTION USING ACOUSTIC EMISSION, 11.
- Majewski, W. A., & Khair, M. K. (2006). *Diesel emissions and their control*. Warrendale, Pa: SAE International.
- MAN. (s. d.). Man_ps_retrofit_dual_fuel_conversion.pdf. Consulté à l'adresse https://www.man-es.com/docs/default-source/man-primeserv/ps_retrofit_and_upgrade/man_ps_retrofit_dual_fuel_conversion.pdf?sfvrsn=bf6f7ac2_20
- MARPOL ANNEX IV. (2019). MARPOL ANNEX IV, regulation 15. Consulté le 21 mai 2021, à l'adresse <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.321%2874%29.pdf>
- Martz, J. (2011, 10 novembre). Consulting—Specifying Engineer | Focusing on dual-fuel engine benefits. *Consulting—Specifying Engineer*. Consulté le 17 mai 2021, à l'adresse <https://www.csemag.com/articles/focusing-on-dual-fuel-engine-benefits/>
- Nwafor, O. M. I. (2003). The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions. *Renewable Energy*, 28(2), 171-181. doi:10.1016/S0960-1481(02)00032-0
- Planete energie. (2014, 10 septembre). Raffinage : Du brut aux produits pétroliers. *Planète Énergies*. Consulté le 21 mai 2021, à l'adresse <https://www.planete-energies.com/fr/medias/infographies/raffinage-du-brut-aux-produits-petroliers>
- Psarianos, & Knott, T. (2007). *Version vectorielle de Image:Crude Oil Distillation-fr.png*. Consulté le 21 mai 2021, à l'adresse https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crude_Oil_Distillation-fr.svg
- Respire asso. (2016). Dioxyde de Carbone (CO2). *Respire*. Consulté le 7 mai 2021, à l'adresse <https://www.respire-asso.org/dioxyde-de-carbone-co2/>

- Saleh, H. E. (2008). Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine. *Fuel*, 87(13), 3031-3039. doi:10.1016/j.fuel.2008.04.007
- Tamphasana Devi, T., Patel, A., & Bhatla, P. E., Ankit. (2010). Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 5 (2), 2010, iv. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 5, 2.
- Unies, N. (2015). Accord de Paris. *21ème Conférence des Parties* (p. 1-18).
- Winnes, H., & Fridell, E. (2009). Particle Emissions from Ships : Dependence on Fuel Type. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(12), 1391-1398. doi:10.3155/1047-3289.59.12.1391
- Yanmar. (s. d.). Dual Fuel Engine | Product Concept | Marine Commercial | YANMAR. YANMAR. Consulté le 22 mai 2021, à l'adresse https://www.yanmar.com/global/marinecommercial/products/dual_fuel_engine/index.html

Annexe A

100% DIESEL sans charge	% CO2d	% O2d	ppm NOxd	mg/m ³ NOxd	ppm H2d	ppm NOd	ppm NO2d	ppm COd	ppm SO2d
Relevé 1	1,36	0,00	43,03	57,56	28,78	20,66	22,30	265,66	19,42
Relevé 2	1,61	0,34	56,92	76,16	28,18	30,39	26,53	299,12	22,43
Relevé 3	1,71	0,00	59,75	80,04	27,09	31,25	28,52	320,82	23,68
Relevé 4	1,73	0,03	60,41	80,76	24,15	31,35	28,95	321,18	23,47
RESULTAT TOTAL	1,60	0,09	55,03	73,63	27,05	28,41	26,57	301,69	22,25

100% DIESEL avec charge	% CO2d	% O2d	ppm NOxd	mg/m ³ NOxd	ppm H2d	ppm NOd	ppm NO2d	ppm COd	ppm SO2d
Relevé 1	2,11	0,00	114,59	153,57	18,00	93,76	20,87	157,84	18,63
Relevé 2	2,46	0,00	136,16	182,42	22,61	109,00	27,09	195,00	25,19
Relevé 3	2,57	0,00	143,51	192,33	22,60	113,40	30,10	212,79	27,47
Relevé 4	2,66	0,00	145,51	195,04	21,61	114,45	31,08	217,84	27,96
RESULTAT TOTAL	2,45	0,00	134,94	180,84	21,20	107,65	27,29	195,87	24,81

BICARBURANT sans charge	% CO2d	% O2d	ppm NOxd	mg/m ³ NOxd	ppm H2d	ppm NOd	ppm NO2d	ppm COd	ppm SO2d
Relevé 1	1,72	0,38	43,35	58,10	52,49	4,56	38,84	736,78	24,29
Relevé 2	1,77	0,00	52,44	70,25	29,89	13,65	38,78	435,70	26,52
Relevé 3	1,81	1,08	56,23	75,40	20,63	25,12	31,24	363,27	21,21
Relevé 4	1,82	0,00	54,79	73,34	19,82	24,08	30,68	370,33	19,85
RESULTAT TOTAL	1,78	0,36	51,70	69,27	30,71	16,85	34,89	476,52	22,97

BICARBURANT avec charge	% CO2d	% O2d	ppm NOxd	mg/m ³ NOxd	ppm H2d	ppm NOd	ppm NO2d	ppm COd	ppm SO2d
Relevé 1	2,59	0,02	125,78	168,58	45,07	68,99	56,78	508,23	42,68
Relevé 2	2,68	0,00	140,87	188,72	19,85	104,10	36,73	252,05	29,86
Relevé 3	2,72	0,00	142,96	191,46	16,63	110,94	31,95	231,10	26,53
Relevé 4	2,73	0,00	139,69	187,13	16,36	107,62	32,00	236,94	26,09
RESULTAT TOTAL	2,68	0,00	137,33	183,97	24,48	97,91	39,36	307,08	31,29