

**Thème : optimisation de la recirculation des gaz d'échappement  
dans un moteur diesel utilisant l'huile végétale comme carburant**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER SPECIALISE GENIE  
ELECTRIQUE, ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES  
OPTION : GENIE ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES**



Présenté et soutenu  
publiquement par :  
M. Moussa **FOFANA**

Travaux dirigés par :  
Ing. Sayon **SIDIBE**

***UTER GENIE ENERGETIQUE ET INDUSTRIEL***

**Jury d'évaluation du stage :**

**Président :**

Dr. Yao **AZOUMAH**

**Membres et correcteurs :**

- Dr. Christel **BRUNSCHWIG**
- Ing. Sayon **SIDIBE**

## REMERCIEMENTS

- Une halte obligatoire pour témoigner notre reconnaissance et gratitude à l'endroit de nos illustres encadreurs. J'ai cité :
- Ing Sayon *SIDIBE*
- Pour son dévouement, ses conseils et son assistance permanente. Je salue sa grandeur humaine et ses immenses qualités professionnelles.
- A mes enseignants de de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie) pour l'enseignement et la formation reçus, parts importantes à toute réalisation humaine. Je salue particulièrement leur courage, leur dévotion et la noblesse de leur profession.
- Une attention particulière à l'endroit de « facilités union européenne » et à l'état burkinabé pour avoir permis cette formation.

## DEDICACE

Je dédie ce présent projet :

- ✚ A ceux mes parents dont l'affection et les instructions guident quotidiennement nos pas dans le sentier de la combativité. Leur chaleur humaine et leur intégrité demeurent gravées dans notre esprit. Nous nous inclinons devant leur mémoire.
- ✚ A mes braves et inlassables sœurs et frères dont je salue le courage et la grandeur exemplaires.
- ✚ A mes tantes, oncles, cousines, cousins, nièces et neveux pour leur attachement et fraternité sans faille,
- ✚ A mon ange bien aimée Oumou pour son soutien indéfectible, son assistance permanente,
- ✚ A tous mes amis, la promotion 2009-2010 Master Spécialisé génie électrique, énergétique, énergies renouvelables et à tous ceux dont les noms n'ont pu être cités pour leur contribution à ce travail.

## RESUME

C'est dans un contexte de crise énergétique et de préoccupations environnementales que ce présent mémoire a été initié. Il a pour objectif principal l'optimisation de la recirculation des gaz d'échappements avec l'huile de coton comme combustible dans un moteur diesel. Cette recirculation consiste à réinjecter une partie des gaz d'échappement mélangés à l'air neuf et introduits dans la chambre de combustion. Le moteur fonctionne en bicarburation et accouplé à un alternateur triphasé débitant dans des charges résistives variables. L'étude a permis de mettre en évidence les impacts de l'EGR sur la combustion avec une asphyxie totale du moteur à 30% de recirculation et sans effet lorsque le taux de recirculation est en deçà de 10%. Nous avons pu montrer d'une part que les performances thermiques du moteur se sont dégradées sous l'effet EGR avec une hausse des températures d'échappement atteignant 37,96% et celle des fumées 67,99%. D'autre part une élévation de la consommation spécifique touchant les 9,38% et une légère diminution du rendement global pour les charges élevées. Quand aux émissions de gaz l'effet EGR a entraîné une réduction importante du NOx de 66,47% avec un taux de recirculation de 20% pour 100% de charge. Par ailleurs les gaz comme le CO<sub>2</sub> et le CO connaissent une augmentation réelle pouvant atteindre respectivement 262,3% et 363,64%. Cette étude révèle une hausse des gaz émis sauf le NOx et l'oxygène qui sont réduits.

**Mots clés** : effet EGR, taux de recirculation, bicarburation

## ABSTRACT

It is in a context of energizing crisis and environmental preoccupations that this present memory has been initiated. It has for main objective the survey of the recirculation of the gases of exhausts with the oil of cotton as fuel in a motor diesel. This recirculation consists in reinjecting a part of the gases of exhaust mixed to the new air and introduced in the room of combustion. The motor functions in bicarburation and mated to a triphase alternator producing in loads variable resistances. The survey permitted to put in evidence the impacts of the EGR on the combustion with a total asphyxia of the motor to 30% of recirculation and without effect when the rate of recirculation is on this side of 10%. We could show on the one hand that the thermal performances of the motor deteriorated under the EGR effect with a rise of the exhaust temperatures reaching 37,96% and the one of smokes 67,99%. On the other

hand an elevation of the specific consumption touch the 9,38% and a light reduction of the global energizing efficiency for the elevated loads. When to the emissions of gas the EGR effect entailed a reduction important of the NO<sub>x</sub> of 66,47% with a rate of recirculation of 20% for 100% of load. Otherwise gases as the CO<sub>2</sub> and the CO know a real increase capable to reach 262,3% and 363,64% respectively. This survey reveals a rise of gases emitted except the NO<sub>x</sub> and the oxygen that are reduced.

**Key words:** EGR effect, rate of recirculation, bicarburation

:

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

**2IE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

**LBEB** : Laboratoire de Biomasse Energie et Biocarburants

**HVC** : Huile Végétale de coton

**HCP** : Huile de Coton Pure

**EGR** : Exhaust Gaz Recirculation

**ID** : Injection Directe

**NO<sub>x</sub>** : oxyde d'azote

**CO** : monoxyde de carbone

**CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone

**O<sub>2</sub>** : di oxygène

**EGR** : Exhaust Gas Recirculation

## Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : REVUES BIBLIOGRAPHIQUES.....	4
A. GENERALITES.....	4
I. Les moteurs diesel.....	5
II. Les problèmes rencontrés dans les moteurs diesel utilisant les huiles végétales comme carburant.....	5
II.1 Les propriétés physiques des huiles végétales pures sources de problèmes liés dans leur utilisation comme biocarburant.....	5
II.2 Les problèmes liés à la nature chimique des huiles végétales pures :.....	6
III. Quelques solutions pour l'utilisation des biocarburants dans les moteurs diesel ...	6
IV. Formation de gaz lors d'une combustion dans un moteur diesel.....	7
B. RECIRCULATION DES GAZ D'ECHAPPEMENT.....	10
I. Principe de l'EGR (Exhaust Gas Recirculation).....	10
II. Les différents types d'EGR et leurs effets.....	11
C. SYNTHÈSE DES RESULTATS DE RECHERCHE OBTENUS AVEC LES SYSTEMES EGR.....	11
D. CONCLUSION.....	13
CHAPITRE 2 : MATERIELS ET MODE OPERATOIRE.....	15
I. Le moteur.....	15
II. Les carburants.....	16
III. Le système EGR.....	17
IV. Les Instruments.....	17
V. La formule EGR.....	18
VI. Les Protocoles d'essais.....	19

VII. Conclusion .....	20
CHAPITRE 3 : RESULTATS.....	22
I. Les principales émissions de gaz à l'échappement .....	22
II. Performances du moteur .....	25
III. Conclusion .....	28
CHAPITRE 4 : DISCUSSIONS ET ANALYSES.....	30
I. Les principales émissions de gaz à l'échappement .....	30
1.1. Oxyde d'azote Nox.....	30
1.2. Oxygène .....	31
1.3. Gaz carbonique.....	31
1.4. Monoxyde de carbone .....	31
II. Performances du moteur .....	32
III. Récapitulatif de l'effet EGR avec l'HVC et le gasoil.....	33
IV. Conclusion .....	35
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES .....	37

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau 1** : formules du taux d'EGR

**Tableau 2** : caractéristiques du groupe électrogène

**Tableau 3** : caractéristiques principales gasoil et HVC

**Tableau 4** : résumé des variations relatives de l'EGR avec l'HVC et le gasoil

**Tableau 5** : récapitulatif des données expérimentales avec l'HVC sans EGR, le gasoil sans et avec EGR

**Tableau 6** : récapitulatif des données de variations relatives liées à l'effet EGR HVC-Gasoil

## LISTE DES FIGURES

**Figure 1** : principe de la recirculation

**Figure 2** : modèle EGR à chaud

**Figure 3** : schéma de principe EGR à froid

**Figure 4** : schéma du dispositif expérimental

**Figure 4** : schéma circuit de recirculation des gaz d'échappement

**Figure 5** : principe de réalisation des essais

**Figure 5** : oxydes d'azote avec gasoil et HVC sans et avec EGR

**Figure 6** : oxygène avec gasoil et HVC sans et avec EGR

**Figure 7** : gaz carbonique avec gasoil et HVC sans et avec EGR

**Figure 8** : monoxyde de carbone avec gasoil et HVC sans et avec EGR

**Figure 9** : température d'échappement avec gasoil et HVC sans et avec EGR

**Figure 10** : température de fumée avec gasoil et HVC sans et avec EGR

**Figure 11** : consommation spécifique avec gasoil et HVC sans et avec EGR

**Figure 12** : rendement global avec gasoil et HVC sans et avec EGR

## INTRODUCTION GENERALE

### Contexte

Face à un monde de plus en plus confronté à une crise énergétique profonde et au réchauffement climatique croissant, la planète subit des conséquences plus ou moins directes sur la vie et le développement des sociétés. On assiste à une croissance constante de la demande mondiale d'énergie, la volatilité des prix et à une insécurité d'approvisionnement des produits pétroliers. La consommation d'énergie pose de graves problèmes environnementaux tels que les gaz à effet de serre responsables du changement climatique, la pollution atmosphérique, la déforestation et la dégradation maritime.

Pour atténuer cette crise énergétique et environnementale des réflexions sont menées partout dans le monde pour trouver et mieux adapter les nouvelles formes d'énergie. Beaucoup de recherches ont été menées dans le domaine des énergies renouvelables comme solutions alternatives au pétrole et à la réduction des problèmes environnementaux. Les huiles végétales et leurs dérivés (biodiesel,...) font partie de ces solutions de remplacement ou de compléments des produits pétroliers. Par ailleurs les pots catalytiques, les systèmes de recirculation de gaz d'échappement dans les moteurs à combustion ont permis de réduire fortement les émissions de gaz polluants avec l'emploi des produits pétroliers. Qu'en est-il avec les huiles végétales de coton ? C'est dans ce contexte de valorisation des huiles végétales pures et d'approfondissement de l'étude avec la recirculation des gaz d'échappement en utilisant l'huile végétale dans les moteurs que le 2<sup>ie</sup> à travers son Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (L.B.E.B) a initié ce thème de mémoire : « **optimisation de la recirculation des gaz d'échappement dans un moteur diesel utilisant l'huile végétale comme carburant** ». Ce présent mémoire s'appuiera sur le taux de recirculation optimisé de 20% obtenu avec les travaux menés au L.B.E.B [15] sur la recirculation des gaz d'échappement afin de mieux mesurer l'impact sur le comportement du moteur diesel du point de vue émissions de gaz que performances du moteur.

### Objectifs de l'étude

L'objectif général de ce mémoire est d'étudier les différents impacts la recirculation des gaz d'échappements dans les moteurs diesel avec l'huile pure de coton avec un taux d'optimisation de 20%.

Les objectifs spécifiques visés sont :

- les impacts de l'EGR sur la combustion dans le moteur diesel avec comme carburant l'HVC
- étude des émissions de gaz du moteur diesel avec l'EGR et l'HVC comme carburant,
- les effets de l'EGR sur les performances du moteur.

Dans ce présent mémoire, nous évoquerons d'abord les revues bibliographiques portant sur la technologie des moteurs, les principales réactions de combustion, la technique de recirculation des gaz d'échappement et les résultats obtenus par certains chercheurs avec l'emploi de l'EGR. Ensuite nous élaborerons les différents protocoles sur la méthodologie de manipulation des différents essais. Enfin nous terminerons par les résultats obtenus contribuant ainsi à un apport documentaire sur l'effet EGR des gaz d'échappement avec l'huile de coton comme carburant dans les moteurs diesels.

# CHAPITRE I

## CHAPITRE I : REVUES BIBLIOGRAPHIQUES

### A. GENERALITES

L'utilisation des biocarburants présentent un bon nombre d'avantages car contrairement au pétrole, les biocarburants sont totalement et rapidement biodégradables, donc ne pourraient en aucun cas provoquer une marée noire. Les huiles végétales ne contiennent pas d'azote et très peu ou pas du tout de soufre (qui retombe sous forme d'acide sulfurique et agresse les toitures et dégradent notamment les façades des monuments). Le soufre est également responsable des pluies acides. Les huiles végétales ne contiennent pas de métaux lourds et pas de benzène. Ainsi, carburer aux huiles végétales entraîne une diminution immédiate de la pollution générée par les gaz d'échappements des moteurs. D'autre part, le protocole de Kyoto impose des restrictions, concernant les émissions de CO<sub>2</sub>, qui peuvent être satisfaites, puisque le CO<sub>2</sub> rejeté par la combustion d'huiles végétales dans les moteurs a déjà été absorbé lors de la croissance de la plante, contrairement à l'utilisation des produits fossiles [1].

Ainsi, l'emploi généralisé d'huiles végétales - comme carburants – permettra de réduire la **dépendance** énergétique des pays qui pourront produire sur place leur propre carburant « vert » [1].

Il convient tout de même de souligner que l'emploi des huiles végétales comme combustibles ne date pas d'aujourd'hui. En effet, **Rudolf DIESEL**, l'inventeur du moteur qui porte son nom, avait conçu et vérifié le bon fonctionnement dudit moteur à l'huile végétale (plus précisément à l'huile d'arachide) en 1892. Ce moteur fût présenté à Paris en 1900 lors de l'exposition coloniale [1].

En 1912, Rudolf **DIESEL** déclarait : « **le moteur diesel peut être alimenté avec des huiles végétales et sera en mesure de contribuer fortement au développement de l'agriculture des pays qui l'utiliseront** ».

Notons que des moteurs diesels ont fonctionné avec des huiles végétales comme carburant pendant la deuxième guerre mondiale. De même en Côte d'Ivoire lors de la construction du port d'Abidjan on a employé de l'huile de palme filtrée comme carburant par contre au Sénégal l'huile d'arachide faisait fonctionner les autobus [1].

## **I. Les moteurs diesel**

La combustion est la décomposition d'une substance carbonée par la chaleur et l'inflammation des gaz émanant de cette décomposition pour produire la chaleur. Selon la forme de la chambre de combustion, on distingue deux types de moteur diesel :

- les moteurs à injection directe
- les moteurs à injection indirecte

### **Les moteurs à injection directe**

Le carburant est pulvérisé directement dans la chambre principale de combustion par les injecteurs. La chambre de combustion est constituée d'une cavité située dans la tête du piston. Il y a donc injection directe lorsque l'injecteur débouche dans le cylindre. Son rendement est supérieur à celui des moteurs à injection indirecte. La durée de combustion est plus courte dans un moteur à injection directe. Le taux de compression est de l'ordre de 14/1 à 17/1 et la température de la chambre de combustion avoisine 200 - 220°C or la température du point éclair des huiles végétales est nettement supérieure à celle de fuel et de la chambre de combustion (243°C pour l'huile de coton contre 93°C pour le gazole). La pression d'injection varie de 180 à 400 bars. Ils sont montés sur les tracteurs agricoles et sur certains engins routiers.

### **Les moteurs à injection indirecte**

La combustion se déroule dans deux volumes séparés : une première chambre relativement petite qui reçoit l'injection du carburant et où s'amorce la combustion, et une chambre principale dans laquelle elle s'achève. La température de la chambre de combustion atteint rapidement 500 - 600°C. Ils sont utilisés dans les véhicules automobiles, dans certains gros moteurs industriels et une très grande gamme de petits moteurs industriels. Ces moteurs sont minoritaires sur le marché car leur consommation de carburant est très élevée par rapport à celle des moteurs à injection directe.

## **II. Les problèmes rencontrés dans les moteurs diesel utilisant les huiles végétales comme carburant**

### **II.1 Les propriétés physiques des huiles végétales pures sources de problèmes liés dans leur utilisation comme biocombustible**

- Le point éclair très élevé par rapport aux fuels et au gazole;

- La viscosité nettement supérieure à celle du gazole. A une même température, la viscosité est 5 à 15 fois supérieure à celle du gazole. Elle entraîne le colmatage des filtres à carburant. Elle crée également des pertes de charges très élevées par les filtres à carburant classique qui peut provoquer une sous alimentation des organes d'injection,
- Le pouvoir calorifique relativement plus faible de 10% que celui du gazole;
- La densité relativement élevée,
- Le point trouble et le point d'écoulement : dans nos climats tropicaux, pas de conséquence néfaste mais dans les climats tempérés, les filtres chauffants et lignes d'alimentation calorifugées sont nécessaires pour toujours faire circuler l'huile dans le moteur diesel à l'état liquide.

## **II.2 Les problèmes liés à la nature chimique des huiles végétales pures :**

- Les réactions chimiques : la polymérisation et l'oxydation des huiles,
- Les dépôts aux nez des injecteurs,
- Encrassement dans les chambres de combustion.

Les principales différences entre les huiles et le gazole sont une viscosité plus importante pour l'huile surtout lorsque la température diminue. L'huile ne contient pas d'azote, pas de soufre (responsable des pluies acides), pas de métaux lourds et pas de benzène. La qualité de l'huile utilisée pour la carburation doit être filtrée efficacement.

## **III. Quelques solutions pour l'utilisation des biocarburants dans les moteurs diesel**

Des travaux antérieurs effectués ont permis de citer ci après certains remèdes permettant une utilisation facile de l'huile végétale comme carburant dans les moteurs diesel [1] :

- Emulsion de l'huile avec l'eau afin de rendre plus fines les gouttelettes d'huiles au moment de la combustion. En effet, l'eau contenue dans l'huile :
  - réduit la température dans la chambre de combustion par absorption de la chaleur lors de l'évaporation de l'eau,
  - augmente la quantité de vapeur dans le cylindre et avec la pression intérieure du cylindre tout en réduisant les pertes d'énergie dans l'échappement,

- améliore la qualité de la combustion et réduit sa durée grâce aux phénomènes de micro-explosions permettant d'obtenir des gouttelettes d'huiles beaucoup plus petites et donc des conditions plus favorables pour la combustion.
- Un retard de l'avance à injection de 5 à 8 degrés Vilebrequin par rapport au réglage du diesel permet d'augmenter la température des gaz d'échappement de 40°C. Ce qui prouve que la température de la chambre de combustion a également augmenté. La combustion est alors plus complète. Cette élévation est adaptée au moteur à injection indirecte du fait de la présence de la préchambre.
- Chauffage de la paroi de la chambre de combustion pour diminuer l'effet du gradient négatif de température dans la chambre.
- Chauffage de l'air de combustion.
- Modification de la tête du piston
- Préchauffage de l'huile à une température de 80 - 90°C. A cette température la viscosité de l'huile diminue. Il est fort déconseillé de franchir la température de 110°C par crainte de phénomène d'oxydation conduisant à la polymérisation.
- Utilisation des filtres de diamètre 27 micromètres pour les huiles au lieu de 5 micromètres pour le gazole afin de réduire les risques du colmatage. Cette dimension provient des dimensions standards américaines ou anglaises disponibles sur le marché.
- Filtrage efficace de l'huile avant son utilisation dans les moteurs.
- Doter le moteur d'un système de bicarburant. Le démarrage du moteur diesel est effectué avec du gazole pour permettre à la chambre de combustion d'atteindre les températures élevées avant le basculement en fonctionnement huile végétale. L'arrêt du moteur se fait aussi en mode gazole.

#### **IV. Formations de gaz et de solide lors d'une combustion dans un moteur diesel**

##### **IV.1 Formation du CO**

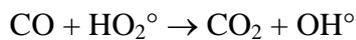
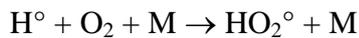
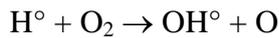
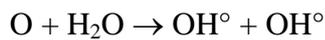
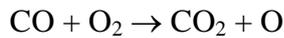
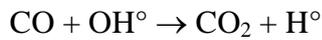
La présence de CO à l'échappement est principalement due à une combustion se déroulant globalement ou localement en mélange riche ou due à une combustion incomplète. De façon générale le CO est un produit de combustion [2]

Mécanisme :  $RH \rightarrow R^\circ \rightarrow RO_2 \rightarrow RCHO \rightarrow RCO \rightarrow CO$

Le RH représentera par la suite la molécule d'hydrocarbure,  $R^\circ$  le radical alkyle et M une molécule neutre, encore appelée partenaire de collision. Nous nous efforcerons de présenter

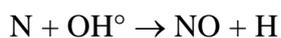
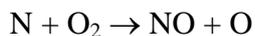
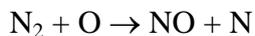
tous les radicaux avec leur symbole ° par souci de clarté et afin qu'il n'y ait pas de confusion possible avec une autre molécule associée.

Le CO pourra ensuite être oxydé en CO<sub>2</sub>, si les conditions de température sont propices et si l'oxygène en présence est en quantité suffisante.



## IV.2 Formation NO<sub>x</sub>

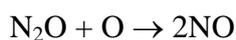
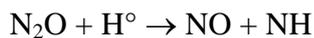
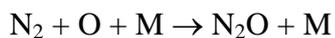
Le terme NO<sub>x</sub> regroupe le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>. A l'échappement des moteurs, le NO est en proportion majoritaire par rapport au NO<sub>2</sub> (environ 90% pour 10%), cependant ce rapport se voit souvent modifié lors de l'utilisation de systèmes de post-traitement. Lors de la combustion d'un mélange d'hydrocarbures, des oxydes d'azote peuvent être formés :



Ce processus de formation de NO fait intervenir l'azote et l'oxygène de l'air, réagissant dans la zone des gaz brûlés en aval du front de flamme [2].

### Le mécanisme de formation du NO par l'intermédiaire de N<sub>2</sub>O

Lors d'une combustion pauvre à haute pression et à basse température, ce mécanisme devient important car il contribue alors à la formation de NO. Il comporte trois réactions :



## IV.3 La formation d'hydrocarbures imbrûlés

Les émissions d'hydrocarbures imbrûlés ne proviennent pas d'une seule mais de plusieurs sources d'émission [2] :

- par piégeage des hydrocarbures dans les interstices de la chambre de combustion,
- dans les zones pauvres en oxygène,
- dans les zones d'hétérogénéité de richesse ou de basses températures,
- par extinction de la flamme à proximité de la paroi
- par le phénomène d'adsorption/désorption des hydrocarbures dans le film d'huile,
- par les ratés de combustion.

#### **IV.4 La formation des particules**

La formation des suies est due à une température élevée (>1400°C) couplée à un déficit local en oxygène. Les particules sont constituées de deux parties :

- une partie insoluble, la « suie », composée d'un matériau carboné solide issu de la pyrolyse de certains hydrocarbures constitutifs du carburant,
- et une partie soluble (Soluble Organic Fraction = SOF) d'hydrocarbures imbrûlés qui vont être adsorbés sur la suie.

Ainsi il apparaît qu'à température localement élevée, la formation de NO<sub>x</sub> et de particules est privilégiée tandis que les basses températures sont propices à la formation d'hydrocarbures imbrûlés. Les émissions de CO étant, elles surtout dues à la combustion d'un mélange localement riche. Afin de réduire les émissions de ces types de polluants, une des idées d'investigation est alors de les réduire directement à la source en réalisant une combustion avec des températures plus faibles et avec peu d'hétérogénéité de richesse.

Afin de rendre le mélange le plus homogène possible, l'idée a été d'avoir recours à des injections précoces. Cependant, lorsque le carburant est injecté trop tôt, la combustion est plus violente, ce qui entraîne un fort niveau de bruit qui peut s'accompagner de casse moteur. La recirculation de gaz brûlés et la multi-injection ont alors été utilisées pour ce mode de combustion afin de retarder l'auto-inflammation et donc de calmer l'initiation et le déroulement de la combustion. De plus, comme les gaz brûlés qui sont recyclés contiennent de fortes concentrations en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O, deux espèces ayant une capacité calorifique beaucoup plus grande que celle de l'air, cela permet, à même compression, d'obtenir une température plus faible et donc d'émettre moins de NO<sub>x</sub> à l'échappement. Avec la dilution par l'EGR, le mélange air-carburant devient plus homogène que dans le cadre d'une combustion conventionnelle Diesel, ce qui permet de maintenir de faibles taux d'émissions de particules [2].

## **B. RECIRCULATION DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT**

Les moteurs à combustion de par leur conception actuelle et leur utilisation sous diverses conditions polluent l'atmosphère causant en partie des fumées (gaz d'échappement), lesquelles contribuent de manière importante au réchauffement progressif de la planète terre, à l'acidité des sols et des cours d'eau [3].

. Ces polluants comprennent les hydrocarbures imbrûlés (HC), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>).

Face à une telle menace environnementale croissante, une législation apparue dans les années 1970 oblige les constructeurs de moteurs à limiter les émissions polluantes de gaz. La solution consiste à réintroduire des gaz brûlés dans les cylindres via un dispositif de recyclage. Il existe deux méthodes pour recycler les gaz d'échappement dans le cylindre : le recyclage externe, dans ce cas les gaz sont dérivés par un conduit spécifique et le recyclage interne réalisé en ajustant l'ouverture des soupapes (les échanges de gaz s'effectuent pendant le croisement des soupapes).

Partant de ce principe les chercheurs ont mis en place plusieurs technologies permettant de contrôler et de réduire ces gaz polluants par action sur le :

- fonctionnement du moteur avec un mélange pauvre. Cette solution entraîne la baisse de la température des gaz dans le cylindre lors de la combustion d'où réduction des oxydes d'azote.
- La technique de l'EGR qui consiste à abaisser la température par introduction d'une partie des gaz d'échappement combinés à l'air dans la chambre de combustion [1].

La plupart des chercheurs ont travaillé avec l'EGR et leurs travaux ont permis d'avoir des résultats satisfaisants dans la réduction optimale des gaz polluants d'échappement. Dans cette partie de recherche bibliographique nous allons d'abord évoquer la technologie EGR ensuite la synthèse des résultats de recherche obtenus

### **I. Principe de l'EGR (Exhaust Gas Recirculation)**

Pour diminuer les émissions d'oxydes d'azote (monoxyde d'azote représente le plus souvent 80% à 90% des émissions totales), mesurées directement à la sortie du moteur, il faut donc abaisser la température dans la chambre de combustion. Pour cela, on injecte un gaz qui ne participe pas à la combustion. On prend alors de la chaleur à la combustion pour réchauffer des gaz inertes. Cela permet d'abaisser la température des gaz selon le refroidissement

préalable des gaz recirculés. Ce procédé est donc autant plus efficace que la chaleur spécifique du gaz ( $C_v$ ) est important [3].

Le circuit de recirculation comprend une canalisation de communication entre le circuit d'échappement et le circuit d'admission. La section de passage des gaz est contrôlée par une vanne proportionnelle (voir figure 1 annexe 1). L'abaissement de la température dans la chambre de combustion est fonction de la quantité et de la température des gaz recirculés si bien que certains moteurs disposent d'un échangeur destiné à refroidir les gaz d'EGR.

## **II. Les différents types d'EGR et leurs effets**

Il existe principalement deux types d'EGR : l'EGR à chaud (Hot EGR voir figure 2 annexe 1) et l'EGR à froid (cold EGR voir figure 3 annexe 1). L'EGR à chaud moins coûteux, plus facile à mettre en œuvre, il permet d'étudier l'influence de la température des gaz sur l'engin [4].

Tandis que l'EGR avec refroidissement permet de réduire la densité des gaz recirculés avec une meilleure diminution de la formation de  $\text{NO}_x$  mais les gaz deviennent alors corrosifs. Pour ce dernier, il existe des difficultés pour la mise en place du système de refroidissement dont le fonctionnement n'est pas fameux à charge complète [4, 5].

L'étude avec l'EGR peut être menée sous trois angles principaux ou effets : l'effet thermique, l'effet chimique, l'effet de dilution.

L'effet thermique se résume à une augmentation de la chaleur entrante, causée par la forte chaleur spécifique des  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , par rapport à celle des  $\text{O}_2$  et  $\text{N}_2$  [5].

L'effet chimique est produit par la dissociation de la vapeur d'eau et du  $\text{CO}_2$  recirculés pendant la combustion [5, 6].

L'effet dilutif est causé par la diminution de la concentration en  $\text{O}_2$  à l'entrée, ce qui a pour conséquence de ralentir la vitesse de mélange entre le carburant et l'oxygène [6, 7].

## **C. SYNTHÈSE DES RESULTATS DE RECHERCHE OBTENUS AVEC LES SYSTEMES EGR**

Les résultats des chercheurs Venkateswarlu et Murth ont montré qu'il ya plus d'émission d'oxyde d'azote ( $\text{NO}_x$ ) avec un moteur diesel ID monocylindre fonctionnant avec du biodiesel (Jatropha) sans EGR qu'avec un EGR monté sur le même moteur [8]. Les émissions de  $\text{NO}_x$  ont été réduites de 5-25% avec branchement d'un EGR HOT sur le circuit d'échappement. Cette étude a pu optimiser l'EGR avec un taux de recirculation de 15% produisant une

réduction suffisante des émissions de NO, CO, HC [8]. Les émissions de fumée avec JBD (Biodiesel de Jatropha) dans la région de charge supérieure sont plus faibles que le diesel, quel que soit le niveau EGR. Cependant, celles-ci sont plus élevées dans la région de faibles charges [8].

Pascal GIANSETTI a montré que la formation des NOx dépend de la température des gaz mais également de la composition du mélange. Les émissions de NOx sont très faibles pour des mélanges pauvres. Il a aussi remarqué que les émissions de NOx diminuent avec l'augmentation du taux d'EGR. Il ajouta aussi que l'abaissement de la température dans la chambre de combustion est fonction de la quantité et de la température des gaz recirculés. Une quantité de gaz d'échappement recirculés trop importante engendre une combustion incomplète produisant de grosse quantité de polluants [9].

Sorenson et Al [10] montrent qu'un taux de recirculation de 30% permet de réduire la quantité de NO de 90%. Pour Pradeep V et Al [4], jusqu'à 10%, le taux d'EGR est insuffisant, et à partir de 20%, il réduit les performances du moteur (utilisation de biodiesel et EGR à chaud). Pour M. Zheng et Al [11], il existe un lien entre la charge et le taux d'EGR, donc ce dernier devrait varier en fonction de la charge : un taux faible d'EGR, pour de fortes charges, et un fort taux d'EGR pour de faibles charges, ce qui permet d'obtenir une baisse de la quantité de NOx et de particules [12].

D'après H Peng, Yi Cui, Lei Shi et Kangyao Deng, l'introduction d'une certaine quantité d'EGR lorsque la combustion dans le moteur est très stable permet de réduire considérablement les émissions NOx et de maintenir le rendement de combustion de ce dernier [13].

. Au regard des différentes analyses effectuées, nous pouvons dire que la plupart des scientifiques optent pour un taux de recirculation de 15%, qui d'après eux est l'optimum, quelque soit le carburant utilisé [4, 7, 14].

Les scientifiques Ming Zheng, Graham T. Reader et J. Gary Hawley ont trouvé qu'un taux très élevé de gaz recirculés crée une instabilité du moteur entraînant une augmentation des émissions de carbone et de pertes de puissance. Ils ajoutèrent qu'une réduction d'oxyde d'azote NOx entraîne une augmentation de matières particulaires (utilisation gazole et EGR à froid) [11].

A travers la recherche bibliographique nous avons pu recenser différentes formules permettant le calcul du taux de l'EGR (%EGR). Ces formules sont résumées dans le tableau 1 voir annexe 2 [15] :

#### **D. CONCLUSION**

Cette recherche bibliographique a permis de parcourir les travaux effectués avec les procédés de recirculation des gaz d'échappement. A travers cette recherche, les scientifiques ont pu mettre en œuvre la corrélation qui lie les gaz nocifs et la combustion ainsi que le processus à mettre en œuvre pour leur réduction. Les chercheurs ont obtenu des résultats significatifs avec les systèmes EGR pouvant aller jusqu'à 90% de réduction d'oxyde d'azote dont les conséquences peuvent impacter sur le fonctionnement du moteur si le taux de recirculation est élevé. Des études ont permis de trouver la valeur optimale du taux de recirculation pour une meilleure efficacité des EGR. La plupart des recherches ont été menées avec du gasoil ou du biodiesel soit pur ou mixte et pratiquement pas avec des huiles végétales pures d'où l'enjeu de notre mémoire. L'objectif visé par ce mémoire est d'étudier voir optimiser la recirculation des gaz d'échappement dans un moteur diesel ID ayant comme combustible les huiles végétales afin de contribuer à un renforcement documentaire des publications agro-carburants.

## CHAPITRE II

## CHAPITRE 2 : MATERIELS ET MODE OPERATOIRE

Dans ce chapitre, les différents appareils, leurs caractéristiques, ainsi que les différentes méthodes seront étudiés. Notons que l'ensemble des essais réalisés a un total de 11 soit plus de 1600 mesures.

### I. Le moteur

Le moteur est accouplé à un alternateur triphasé qui débite dans des charges résistives. Notons que le moteur est muni d'un compteur volumétrique permettant de suivre la consommation de la machine. Les caractéristiques techniques du groupe électrogène sont récapitulées dans le tableau 2 ci-dessous :

<b>MOTEUR DIESEL</b>	
<b>Désignation</b>	<b>Caractéristiques</b>
Type	Lombardini 9LD 561-2/L, quatre temps, refroidissement à air
Combustion	Injection directe
Nombre de cylindres	02
Alésage	90mm
Course	88mm
Cylindrée	1120 cm <sup>3</sup>
Puissance maximale	12 kW à 2200 tr/mn
Taux de compression	17,5 : 1
Vitesse de rotation	2200 tr/mn
Couple maximum	6 kgm
<b>ALTERNATEUR TRIPHASE</b>	
<b>Désignation</b>	<b>Caractéristiques</b>
Type	GENELEC
Puissance	6 kVA
Cos φ	0,8
RPM	1500

*Tableau 2 : caractéristiques du groupe électrogène*

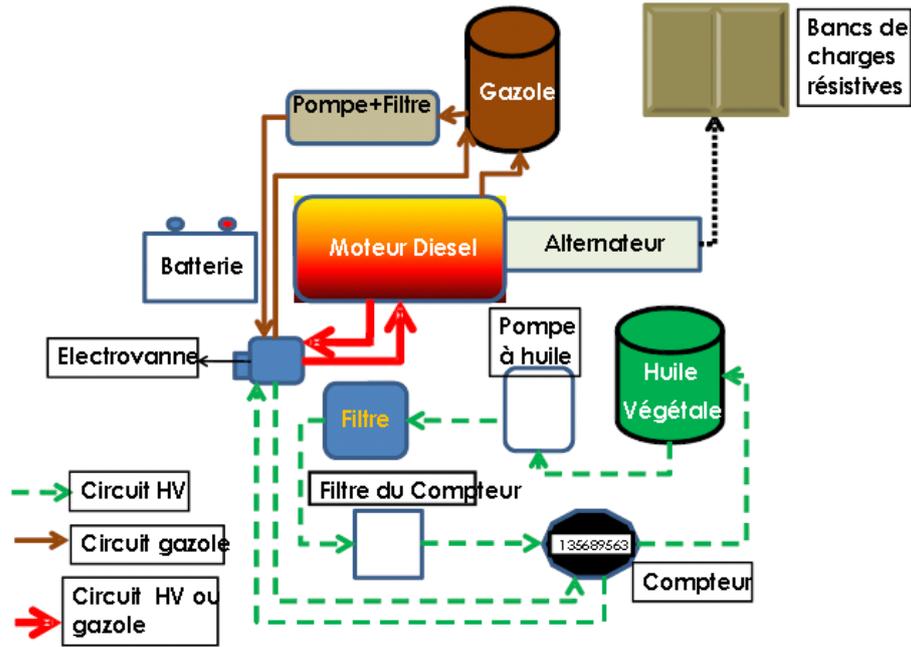


Figure 4 : schéma du dispositif expérimental [21]

## II. Les carburants

Pour un fonctionnement en bicarburant, nous utiliserons deux carburants :

- Le gasoil (pendant la phase de démarrage et d'arrêt)
- L'HVC : l'huile végétale de Coton

Quelques caractéristiques importantes des carburants ont été déterminées lors des essais réalisés au laboratoire LBEB et à la SONABHY voir tableau 3

Carburant	Gasoil	Huile de coton
Formule chimique	$CH_{1,73}$	$CH_{1,81}O_{0,10}$
Masse volumique à 20°C kg/m <sup>3</sup>	855	914,5
Viscosité à 40°C mm <sup>2</sup> /s	3,37	34,91
PCI kJ/kg	44868,16	35666
Indice de cétane en %	49,1	-
Point de trouble °C	<-5	-
Point de fusion °C	-18	0
Point éclair °C	64,2	-

Tableau 3 : caractéristiques principales gasoil et HVC

### III. Le système EGR

Nous utiliserons un EGR à chaud pour la recirculation des gaz d'échappement. Il est monté entre le tuyau d'échappement et l'entrée d'air neuf du moteur. Il est composé de conduite métallique, d'une vanne à commande manuelle et d'un filtre à air.

Le diamètre intérieur des différents tuyaux est de 50 mm, avec une épaisseur de 2 mm. Ces tuyaux sont capables de résister à des températures de 600°C. Le boîtier du filtre à air a été fabriqué avec du fer lissé et constitué de grillages de fer, pour mieux emprisonner les particules, et résister aux fortes températures.

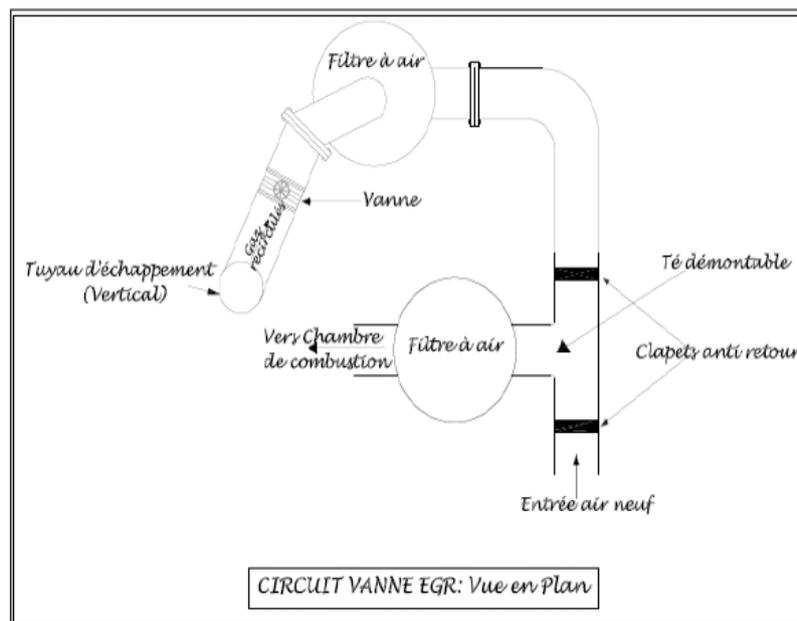


Figure 5 : schéma circuit de recirculation des gaz d'échappement [15]

### IV. Les Instruments

Pour mener nos différents essais, nous disposons du matériel (voir annexe 3) suivant :

- un central d'acquisition de températures : ALMEMO constitué de plusieurs sondes
- un analyseur de gaz : le TESTO 350XL, indispensable pour les mesures de gaz dont les valeurs sont utiles pour le calcul du taux d'EGR,
- deux bancs de charges résistives,
- un chronomètre,
- un ordinateur.

Le système EGR étant monté, nous avons placé des sondes de température au niveau de l'admission d'air neuf ; à la sortie du système EGR ; à l'entrée du filtre à air du moteur ; à la

sortie de la chambre de combustion. Des aménagements spéciaux ont été faits à l'entrée du filtre à air du moteur ; au niveau du tuyau d'échappement, et à la sortie du filtre à air du système EGR, afin qu'ils puissent accueillir les analyseurs de gaz, qui recueillent les concentrations ou pourcentages des différents gaz, ainsi que les températures en différents points.

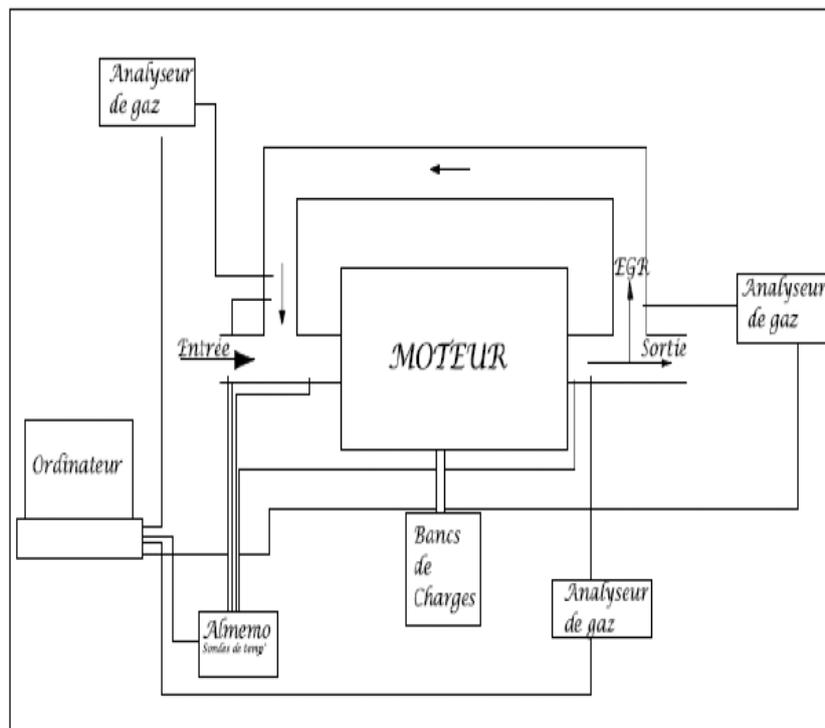


Figure 6 : principe de réalisation des essais [15]

## V. La formule EGR

La sonde de l'analyseur de gaz est placée à l'entrée du moteur pour mesurer la concentration en CO<sub>2</sub> de l'air entrant, ensuite nous la placerons au niveau du tuyau d'échappement pour lire la concentration en CO<sub>2</sub> à la sortie.

Ces deux mesures permettent de calculer à tout instant, le taux d'EGR, par la formule :

$$(1) \quad \%EGR = \frac{CO_2 \text{ entrant}}{CO_2 \text{ sortant}} \times 100$$

Pour calculer la réduction du NO<sub>x</sub> on applique la formule suivante :

$$(2) \quad \text{NOx}_{\text{réduction}} = \frac{\text{NOx}_{\text{sans EGR}} - \text{NOx}_{\text{avec EGR}}}{\text{NOx}_{\text{sans EGR}}} \times 100$$

La régulation du taux d'EGR, est possible de deux manières :

- en modifiant le débit des gaz recirculés au niveau de la vanne : réglage manuel
- en modifiant le débit de l'air neuf à l'aide d'un couvercle coulissant installé à l'entrée de l'admission de l'air neuf, afin de permettre une meilleure régulation du mélange.

## VI. Les Protocoles d'essais

La procédure menée lors de nos essais avec recirculation des gaz, consiste à :

### ➤ Démarrer le moteur :

Pour des mesures de sécurité, le moteur sera démarré et arrêté toujours avec du gazole,

### ➤ Chauffer le moteur:

Après le démarrage laisser celui-ci tourner pendant 15 minutes avec du gazole puis le charger à 100% toujours en mode gazole pendant 5 minutes avant de basculer en huile végétale de coton. Cela permet lors du basculement à l'huile végétale, d'avoir des températures assez élevées, ce qui est bénéfique pour le système.

### ➤ Décharger progressivement le moteur :

Après le basculement du moteur à l'huile végétale laisser tourner pendant 5 minutes puis procéder au réglage du taux EGR et enfin relever les valeurs des mesures chaque 2 minute. A chaque pas dégressif de 20% de charge, laisser toujours la machine tourner pour se stabiliser pendant au moins 5 minutes puis régler le taux EGR avant de procéder aux mesures à chaque 2 minute. Répéter l'opération jusqu'à terminer l'essai.

### ➤ Déterminer le taux de recirculation :

L'analyseur de gaz est placé au niveau de l'air mélangé puis à la sortie des gaz d'échappement, nous permettra d'avoir à chaque instant, la concentration du CO<sub>2</sub> à l'entrée et à la sortie du moteur. Sur la base de ces 2 paramètres, le ratio donné par la formule ci-dessus mentionné, est fait instantanément.

Pour atteindre le taux désiré, la vanne d'EGR à commande manuelle est constamment ajustée, et à l'entrée d'air neuf, l'ouverture est aussi ajustée manuellement. Lorsque le taux est atteint, les différentes ouvertures sont maintenues à leur position, et le chronomètre est lancé, pour deux minutes, temps nécessaire pour que le système se stabilise dans cette position.

Après ce temps, l'on vérifie que le taux de recirculation est toujours adéquat. Si tel est le cas, le taux est dès lors fixé.

➤ **Enregistrer les valeurs :**

Le taux de recirculation ayant été calculé, nous pouvons à présent noter les concentrations des différents gaz, les températures aux différents points indiqués, les consommations...Par la suite, Il est possible de faire varier la charge et/ou le taux de recirculation, en suivant le même principe.

S'agissant des essais sans recirculation des gaz, ils sont menés de la même manière, à la seule différence que dans ce cas, le calcul du taux de recirculation n'est pas nécessaire, vu que le système EGR n'intervient pas. Ici, un analyseur de gaz, placé au niveau de l'échappement du moteur, permet d'avoir les différents gaz d'échappement, et leur concentration. La consommation est calculée de la même manière, et une sonde de températures est placée à la sortie de la chambre de combustion donnant la température des gaz à l'échappement.

## **VII. Conclusion**

En définitive ce chapitre nous a permis de recenser tout le matériel nécessaire pour réaliser l'ensemble des essais. Ainsi nous avons inventorié des appareils de mesure de température, un analyseur de fumée, un chronomètre, les caractéristiques de l'huile de coton et du gasoil, un ordinateur et des bancs de charge résistive. Nous avons aussi élaboré le protocole nécessaire pour mettre en œuvre toutes ces opérations. Nous terminerons en disant que pour obtenir des résultats de haute précision il aurait fallu utiliser deux analyseurs de fumée et de façon simultanée. A défaut, nous nous sommes contentés d'un seul analyseur de fumée.

## CHAPITRE III

## CHAPITRE 3 : RESULTATS

### I. Les principales émissions de gaz à l'échappement

#### I.1. Oxyde d'azote Nox

Il est obtenu par l'oxydation azotée de l'air et du combustible c'est-à-dire une réaction sous haute température de l'azote atmosphérique avec l'oxygène présent pendant la combustion. Ces gaz, très présents dans l'échappement des moteurs diesels, constituent un grand danger pour la santé et l'environnement. Ils contribuent à la formation de l'ozone troposphérique et aux dépôts acides du point de vue environnement et à l'irritation des bronches, crises d'asthme, accroissement de la sensibilité aux infections microbiennes. A travers les différents essais avec et sans EGR nous allons mettre en évidence l'effet EGR sur ce gaz. Les données sont centralisées à l'annexe 4-5 et les courbes obtenues sont ci-dessous voir figure 7.

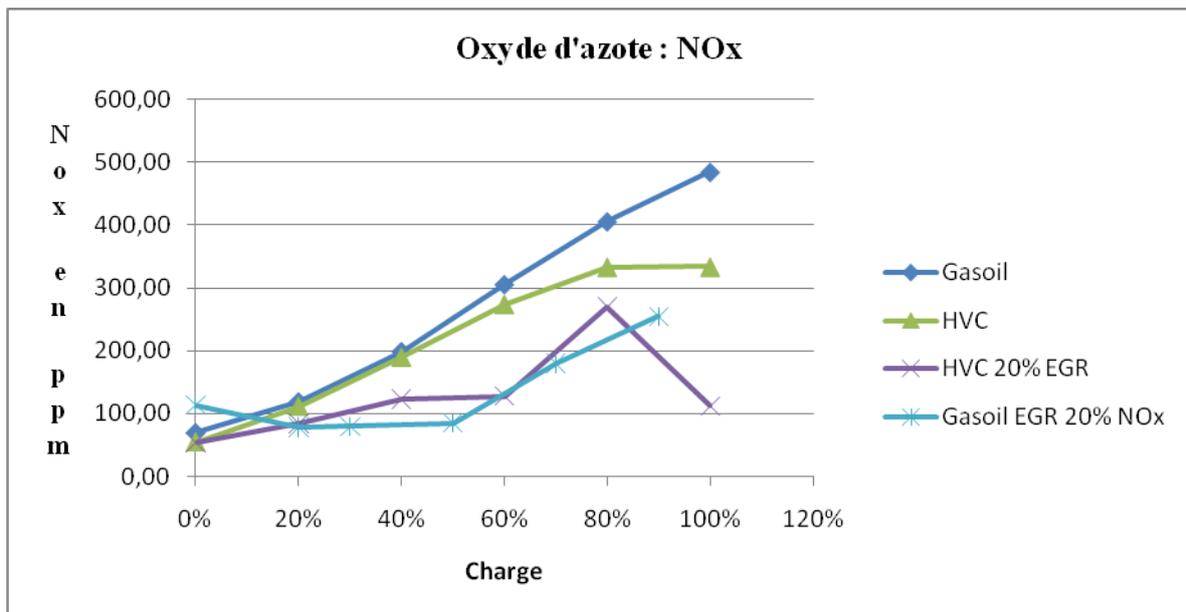


Figure 7 : oxydes d'azote avec gasoil et HVC sans et avec EGR

#### I.2. Oxygène

C'est un gaz nécessaire pour la combustion du combustible. Sa présence à l'échappement donne un aperçu sur la qualité de la combustion. Il est pas nocif du point de vue environnemental et santé humaine. Les différents tests menés sur le moteur ont permis de tracer les courbes suivantes (voir figure 8) dont les données sont à l'annexe 4-5.

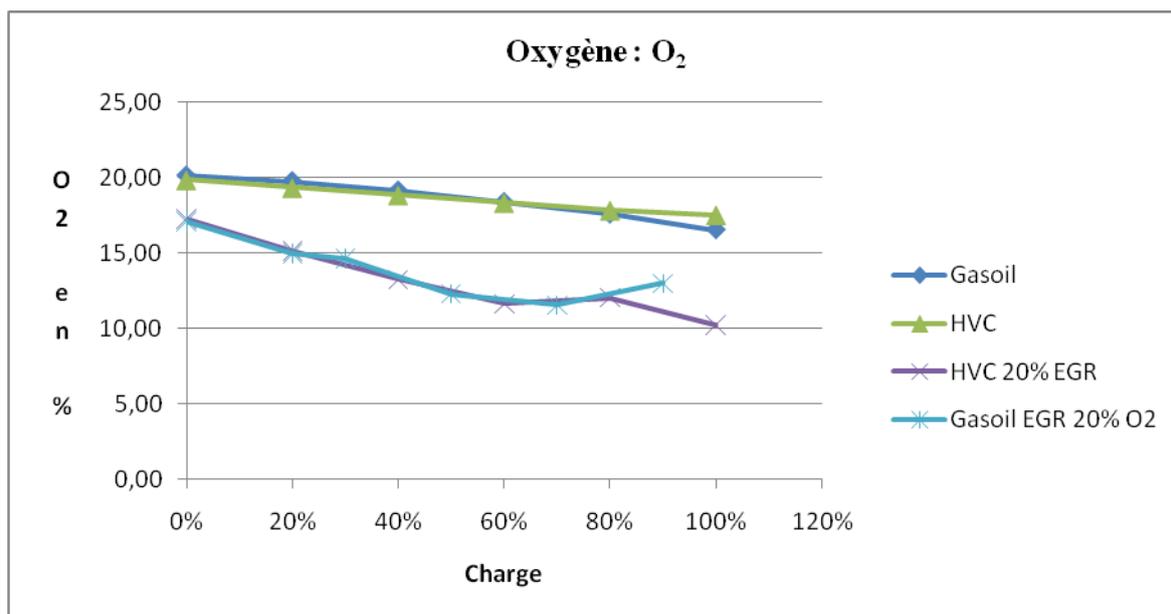


Figure 8 : oxygène avec gasoil et HVC sans et avec EGR

### I.3. Gaz carbonique

C'est un gaz à effet de serre issu de la combustion du carburant. Il n'a pas d'effet direct sur la santé. Il est rejeté dans l'atmosphère après la combustion du combustible dans le moteur. Sa teneur ne doit pas être importante à cause de son impact environnemental. Nous avons pu recueillir des données (voir annexe 4 et 5) à travers nos tests et voir son comportement avec les différents combustibles (gasoil ou HVC) avec ou sans EGR (voir figure 9)

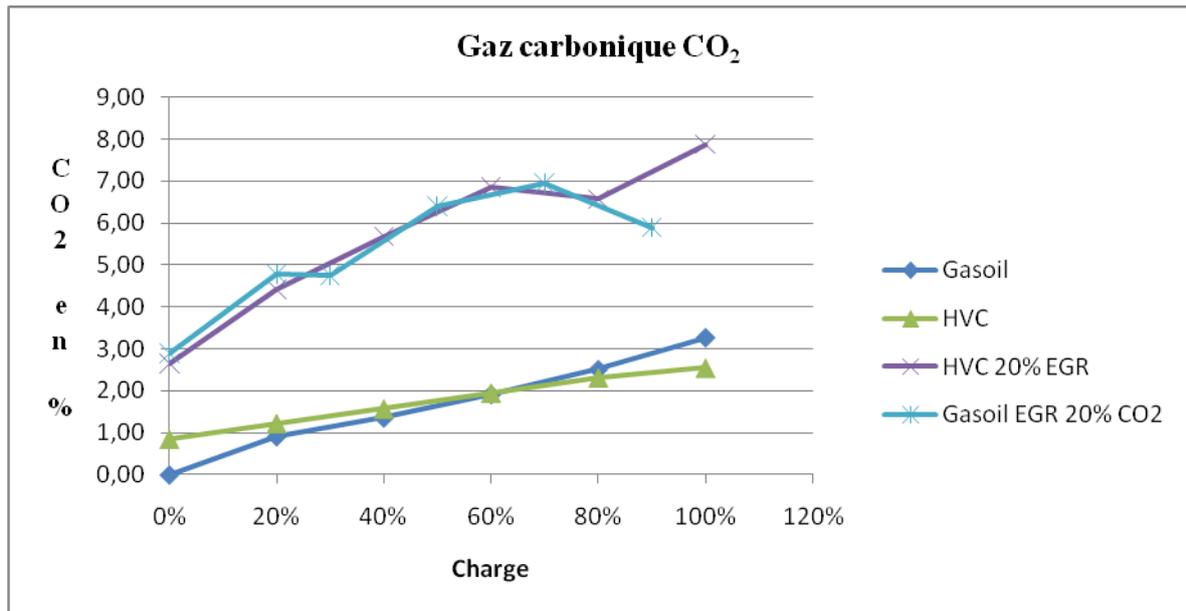


Figure 9 : gaz carbonique avec gasoil et HVC sans et avec EGR

#### I.4. Monoxyde de carbone

Il provient de la combustion incomplète du carburant avec une contribution à la formation de l'ozone troposphérique (résulte de la transformation photochimique de certains polluants, dont le CO, les NO<sub>x</sub> et les HC). Ce gaz étant très dangereux il faut alors le réduire, nous verrons si l'EGR apportera une solution. Les CO émit avec le combustible gasoil ou HVC sans et avec EGR sont représentés sur la figure 10. Pour les valeurs voir annexe 4-5

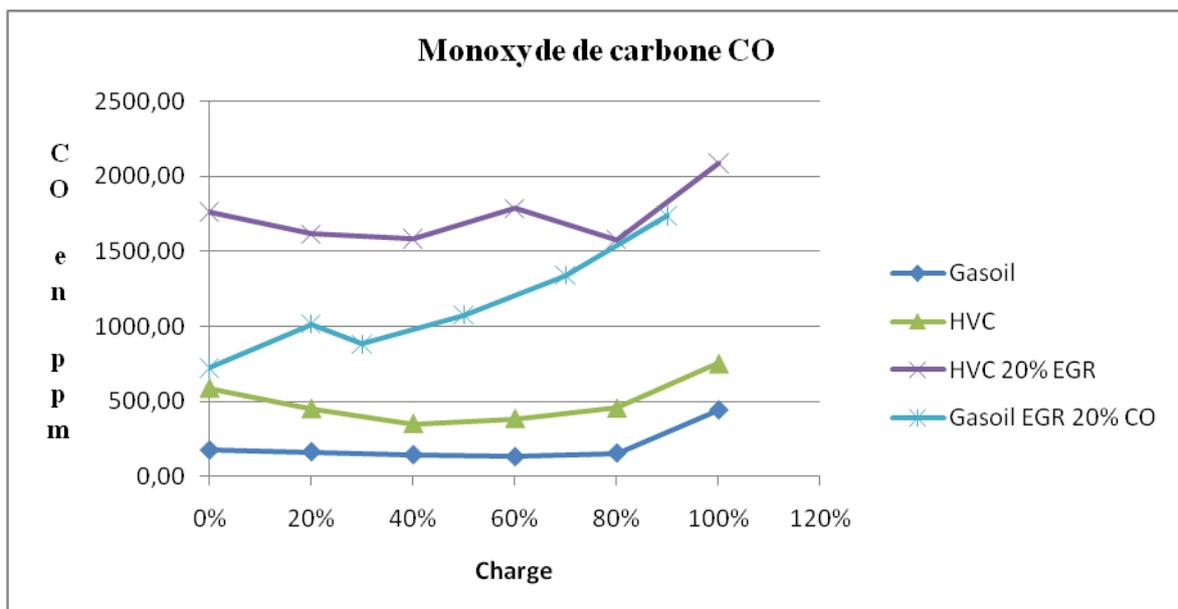


Figure 10 : monoxyde de carbone avec gasoil et HVC sans et avec EGR

## II. Performances du moteur

### II.1. Température d'échappement

Les gaz issus de la chambre de combustion arrivent au pot d'échappement avec une température à celle de la chambre. Nous verrons si cette température sera influencée par l'effet EGR. Elle pourra être exploitée comme échangeur thermique pour d'autres applications. Les différents essais ont donné les courbes suivantes (voir figure 11) dont les valeurs sont à l'annexe 4-5.

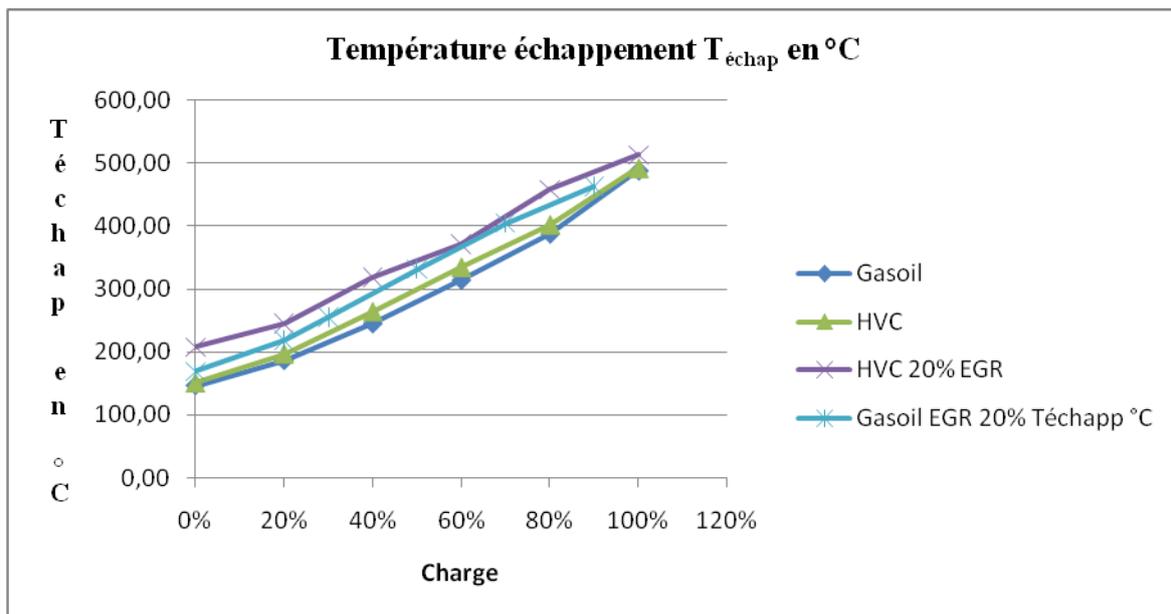


Figure 11 : température d'échappement avec gazoil et HVC sans et avec EGR

### II.2. Température de fumée

Les gaz d'échappement sont rejetés dans l'atmosphère sous une température supérieure à la température ambiante. Les données issues de nos différentes mesures (voir annexe 4-5) ont permis de tracer les courbes voir figure 12.

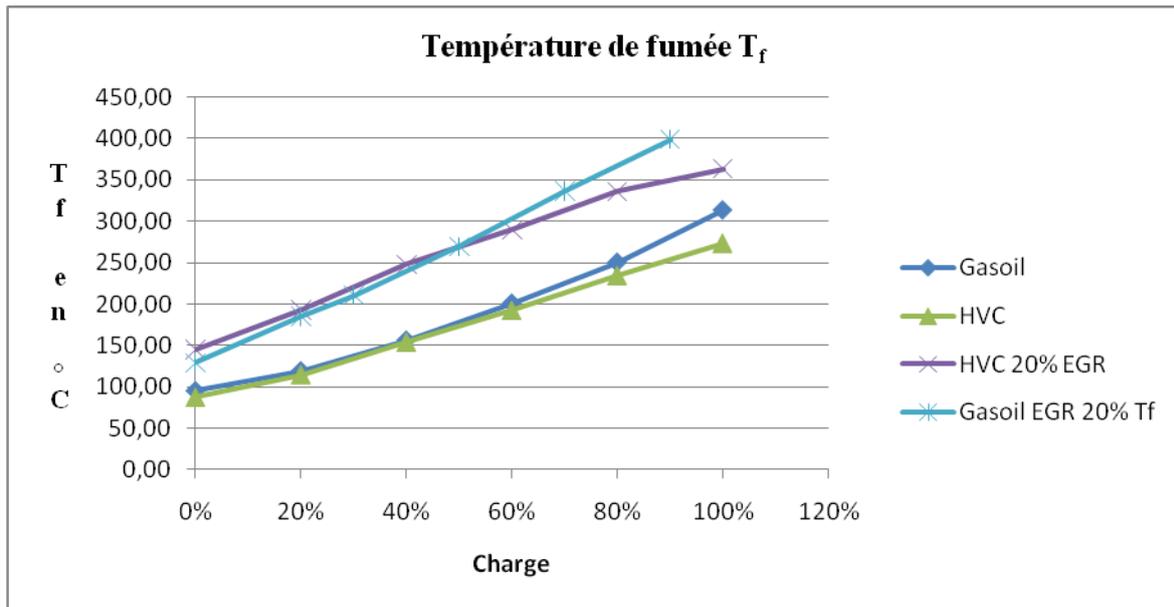


Figure 12 : température de fumée avec gasoil et HVC sans et avec EGR

### II.3. Consommation spécifique

Pour tourner le moteur a besoin de combustible alors il est nécessaire de suivre sa consommation. Nous avons pu suivre les consommations issues de nos différents essais avec le gasoil ou l'HVC avec ou sans EGR. Ces différents essais nous ont permis de calculer la consommation spécifique de chaque carburant en fonction de la charge (voir annexe 4-5) et de dresser leur représentation graphique (voir figure 13). La formule utilisée pour le calcul de la consommation spécifique est :

$$(3) \quad \text{consom}_{\text{spéci}} = \frac{D \times \rho}{\text{charge}}$$

Avec :

Consom<sub>spéci</sub> : consommation spécifique en gramme par kilowattheure

D : débit volumique en litre par heure

P : masse volumique du combustible en gramme par litre

Charge : en kW

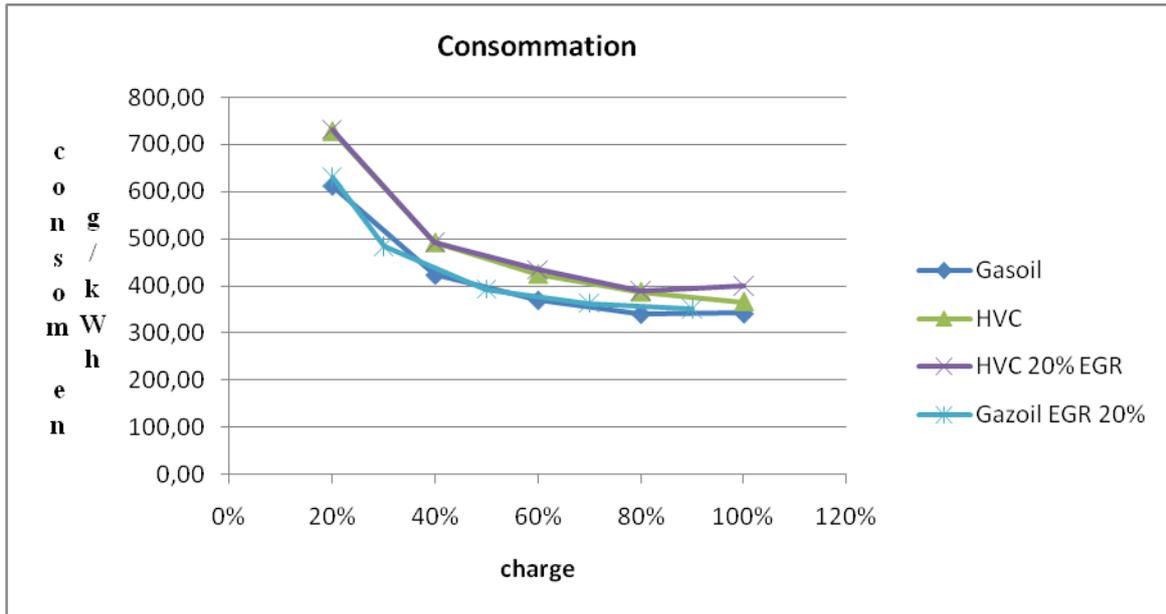


Figure 13 : consommation spécifique avec gasoil et HVC sans et avec EGR

#### II.4. Rendement global

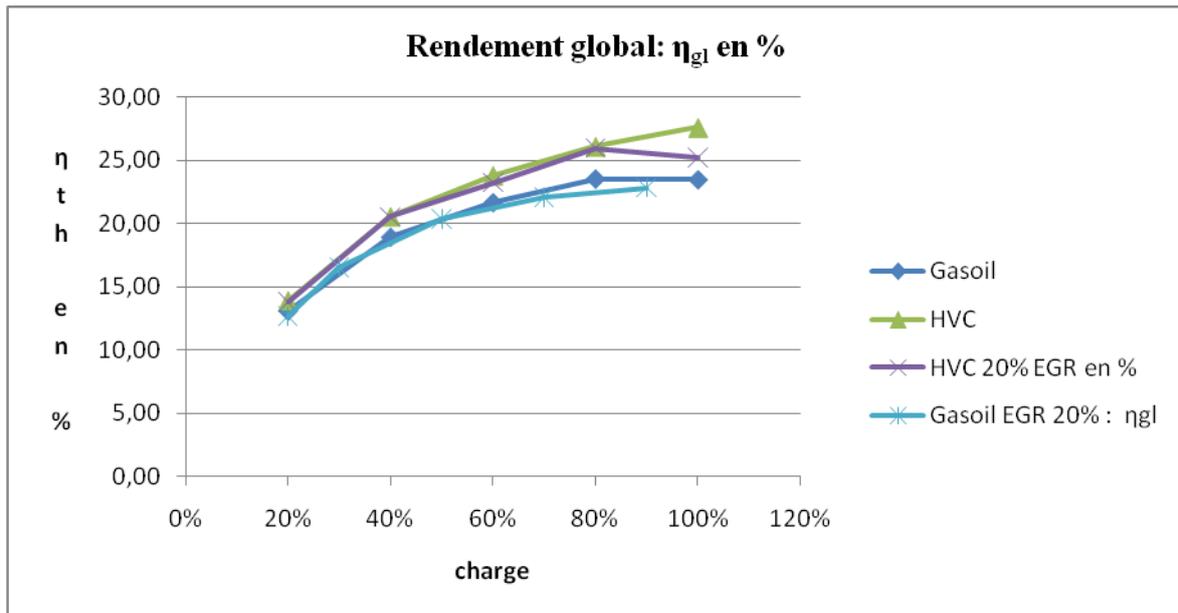
Le rendement global du moteur, permet de déterminer les performances du groupe électrogène, c'est-à-dire sa capacité à transformer l'énergie fournie par le carburant en travail électrique. Nous avons obtenu les courbes suivantes avec le combustible gasoil ou HVC sans ou avec EGR (voir figure 14 et pour les valeurs voir annexe 4-5). La formule utilisée pour son calcul est le suivant :

$$(4) \quad \eta_{gl} = \left( \frac{3,6 \times 10^6}{PCI \times \text{consom}_{spéc}} \right) \times 100$$

$\eta_{gl}$  : rendement global en %

$\text{cons}_{spéc}$  : consommation spécifique en gramme par kilowattheure

PCI : pouvoir calorifique inférieur du combustible en kilojoule par kilogramme



*Figure 14 : rendement global avec gasoil et HVC sans et avec EGR*

### III. Conclusion

L'ensemble de ces essais nous ont permis de dresser des tableaux de données expérimentales et d'ériger les représentations graphiques des différentes émissions gazeuses et des caractéristiques de performance du moteur. Ainsi les résultats obtenus ont été effectués en utilisant comme combustible l'huile végétale de coton et le gasoil sans et avec recirculation de gaz d'échappement (EGR). Nous avons pu mesurer l'influence de l'effet EGR sur le comportement du moteur à travers les différents tests effectués.

## CHAPITRE IV

## CHAPITRE 4 : DISCUSSIONS ET ANALYSES

L'ensemble de nos essais ont été réalisé en utilisant comme le gasoil ou l'huile végétale pure de coton comme combustible avec montage ou non d'un système de recirculation des gaz d'échappement. La technique de bicarburation a été utilisée lorsqu'il s'agissait de l'HVC conformément au protocole de mise en œuvre. Il était de même pour le gasoil. Les relevés ont été effectués en respectant les mêmes conditions de variation des charges et du temps. Ceci nous permettra de nous pouvoir faire des comparaisons et des interprétations objectives.

### I. Les principales émissions de gaz à l'échappement

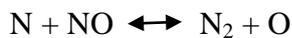
#### 1.1. Oxyde d'azote Nox

Pour réduire ces émissions de Nox on a recours à l'huile végétale pure et à la recirculation des gaz d'échappement.

Les courbes (voir figure 7) obtenues relatent que les émissions d'oxyde d'azote sont plus élevées avec le gasoil sans EGR comparées à l'huile végétale de coton sans EGR. Par contre l'huile de coton sans EGR émet encore moins que le gasoil. Nous constatons que la réduction est très importante avec le gasoil à 20% EGR et l'huile de coton à 20% EGR. Cette réduction est estimée :

- Pour l'HVC à 25% pour la charge faible et 66,5% pour la charge maximale ;
- Pour le gasoil à 34,5% pour la charge faible et 47,5% pour la charge maximale.

Ceci permet d'attester que le système à EGR permet une diminution conséquente des oxydes d'azote. Nous aboutissons au même résultat obtenu par Venkateswarlu et Murth [8] c'est-à-dire la réduction du NOx Cette réduction de l'oxyde d'azote est causée par la diminution de la température dans la chambre de combustion et la combinaison de l'O<sub>2</sub> avec les gaz d'échappement à l'admission comme stipulé ci-dessous :



Par ailleurs nous remarquons que les émissions de NOx augmentent lorsque la charge évolue de façon croissante. Nous avons aussi constaté que le NOx diminue considérablement lorsque le taux EGR augmente confirmé aussi par les travaux de Sorenson et Al [10] et à partir de 30% de recirculation le moteur s'arrête lorsque la charge est à 100%. A 10% de recirculation aucun effet sur le moteur lorsqu'il est à vide par contre au delà son effet se fait sentir surtout

lorsque la charge augmente. D'où la relation entre taux de recirculation et charge ; ceci est attesté par M. Zheng et Al [11] à travers leurs travaux de recherche.

### **1.2. Oxygène**

D'après la figure 8 le taux d'oxygène rejeté dans les gaz d'échappement est plus élevé pour le gasoil et l'huile pure de coton sans EGR par contre il est plus réduit avec le système à EGR utilisant l'huile de coton et le gasoil comme carburant. La teneur en oxygène diminue lorsque la charge augmente car la demande en  $O_2$  est importante pendant la combustion avec les charges élevées d'où sa teneur faible dans les gaz d'échappement. A moins de 20% de charge, le taux d'oxygène rejeté avec l'huile de coton à EGR dépasse celui du gasoil à EGR et cette tendance s'inverse lorsque la charge est supérieure à 20%. Au delà de 60% de charge, le taux d'oxygène émis à l'échappement avec l'huile de coton est supérieur au gasoil. En d'autre terme nous rejetons moins d'oxygène lorsque nous employons la technique de recirculation. Nous pouvons expliquer cette diminution du taux d' $O_2$  par sa contribution à la combustion et aux réactions avec les gaz d'échappement.

### **1.3. Gaz carbonique**

En analysant la figure 9 nous nous rendons compte que le gaz carbonique contenu dans les gaz d'échappement a une teneur très importante lorsqu'il s'agit du combustible huile végétale pure de coton avec EGR et le gasoil avec EGR. Il devient faible lorsque la carburation se fait avec du gasoil sans EGR ou de l'huile pure de coton sans EGR. Pour des charges inférieures à 60%, l'huile végétale sans EGR dégage plus de  $CO_2$  que le gasoil sans EGR. Cette tendance s'inversera lorsque la charge dépassera 60%. En résumé nous remarquons que l'effet EGR entraîne une augmentation du  $CO_2$  émis dans les gaz d'échappement. L'augmentation du  $CO_2$  avec le système EGR s'explique par l'apport supplémentaire de gaz carbonique contenu dans les gaz d'échappement réinjectés dans la chambre de combustion. Aussi il est important de noter que le gaz carbonique augmente lorsque la charge croit.

### **1.4. Monoxyde de carbone**

D'après la figure 10 nous avons les résultats suivants :

- Le CO émis est très faible avec le gasoil sans EGR, il augmente avec l'huile végétale pure sans EGR. Il devient important avec le gasoil à EGR et encore plus important lorsqu'il s'agit de l'huile de coton avec EGR.
- Les émissions de CO décroissent de façon parabolique avec la charge. Ces courbes nous permettent de déduire que l'effet EGR conduit à une élévation du monoxyde de

carbone. Ceci est dû à la mauvaise combustion des huiles végétales causée par la viscosité élevée, la volatilité faible des huiles et la participation du CO issu de la recirculation et réinjecté dans la chambre de combustion.

## **II. Performances du moteur**

### **II.1 Température d'échappement**

La figure 11 montre que la température d'échappement croît lorsque la charge augmente. Les courbes issues de la température d'échappement avec les différents cas de combustibles évoluent du bas en haut respectivement avec le gasoil sans EGR, ensuite l'huile végétale de coton sans EGR, puis le gasoil avec EGR et enfin l'huile végétale pure de coton avec EGR. Les températures d'échappement sont plus faibles avec le gasoil sans EGR puis légèrement faible avec l'HVC sans EGR mais élevées avec le gasoil à EGR et l'HVC à EGR. Cette température est plus importante dans le cas de l'HVC avec EGR. Elle atteint la valeur maximale de 513°C à 100% de charge et nous pouvons dire que l'effet EGR entraîne une élévation de la température d'échappement donc le moteur chauffé plus. Elle aura pour conséquence une diminution du rendement liée à l'élévation de température par effet EGR. Cette augmentation de température s'explique par la chaleur supplémentaire dégagée par l'augmentation du carburant huile de coton et de la température ambiante.

### **II.2 Température des fumées : $T_f$**

Les températures des fumées évoluent de façon croissante lorsque la charge augmente. Ces températures sont plus importantes avec le gasoil à EGR et l'HVC à EGR qu'avec le gasoil sans EGR et l'HVC sans EGR (voir figure 12). La température maximale est obtenue avec l'HVC associé à un système EGR et cette dernière est de 363,5°C (voir annexe 4-5) lorsque la machine est chargée à 100%. Pour des charges inférieures à 50% les températures des fumées sont plus élevées avec l'HVC à EGR qu'avec le gasoil à EGR mais cette tendance s'inverse lorsque la charge est supérieure à 50%. Nous déduisons alors que l'effet EGR crée une élévation de température de fumées.

### **II.3 Consommation**

A travers les courbes figure 13 nous remarquons que la consommation spécifique décroît lorsque la charge augmente qu'il s'agisse du gasoil ou de l'huile de coton avec ou sans EGR. Les consommations sont basses avec le gasoil puis une légère augmentation avec le gazole à

EGR. Ensuite vient l'huile pure de coton avec une augmentation significative et enfin l'huile pure de coton à EGR dont la consommation est relativement supérieure à celle de l'huile de coton pure sans EGR. De 20 à 40% de charge et comme carburant huile végétale de coton nous avons pratiquement la même consommation avec et sans EGR. Pour des charges supérieures à 40%, la consommation spécifique avec l'huile végétale à EGR est relativement plus élevée que celle de l'huile pure de coton sans recirculation. Ceci nous permet d'affirmer que la consommation augmente lorsqu'on utilise la recirculation des gaz d'échappement. L'augmentation de la consommation spécifique est la conséquence de l'effet EGR créé par l'élévation de la densité liée à la température donc à la masse volumique.

#### **II.4 Rendement global : $\eta_{gl}$**

D'après la figure 14 le rendement thermique croît lorsque la charge augmente. Il est plus important avec l'huile végétale de coton avec et sans EGR par contre il est un peu faible pour le gasoil avec et sans EGR. Il est identique lorsque la machine est chargée entre 20 et 40% avec de l'HVC à EGR ou sans EGR. Le meilleur rendement est obtenu avec l'huile végétale de coton sans EGR. Nous remarquons que l'effet EGR contribue à réduire le rendement global donc l'EGR entraîne des pertes d'énergie.

#### **II.5 La formation de dépôts**

Nous avons pu mettre en évidence les dépôts solides formés dans la chambre lors de l'entretien du moteur. Ces dépôts sont repartis sur le nez de l'injecteur, la paroi de la chambre de combustion, la culasse et sur la tête du piston. Nous avons aussi constaté un encrassement au niveau du pot d'échappement et du système EGR. Ces dépôts sont liés aux propriétés du combustible, de l'air et à la qualité de la combustion. Pour des impératifs de temps nous n'avons pas pu réaliser l'entretien technique immédiatement après la fin de nos travaux.

### **III. Récapitulatif de l'effet EGR avec l'HVC et le gasoil**

A partir des différents essais réalisés nous avons élaboré un récapitulatif de la variation relative de l'effet EGR avec l'HVC et le gasoil (voir tableau 4 ci-dessous et annexe 6 pour les données) afin de pouvoir faire une comparaison des impacts de l'EGR sur le moteur avec ces deux types de combustibles. Après analyse des différentes courbes de variation relative (annexe 7,8 et 9), nous nous sommes rendu compte que l'effet EGR est réel sur ces deux combustibles mais l'étude n'est pas suffisante pour dire que l'EGR est plus efficace avec l'HVC ou le gasoil.

$$(5) \quad \Delta_r = \frac{\Delta X}{X} \times 100$$

Avec  $\Delta_r$  variation relative de X et  $\Delta X$  variation de X

	Variation relative EGR-HVC en %	Variation relative EGR-gasoil en %	Observations
<b>  Consommation  </b>	0 à 9,38	2,78 à 14,29	Aux charges < 100% l'effet EGR crée une $\Delta_r$ consommation plus importante avec l'HVC que le gasoil (voir fig 15)
<b>  <math>\Delta_r T_{échapp}</math>  </b>	4,14 à 37,96	4,28 à 17,64	L'EGR entraîne une $\Delta_r T_{échapp}$ plus élevée avec l'HVC que le gasoil
<b><math>\Delta_r O_2</math></b>	13,01 à 41,47	15,12 à 34,26	$\Delta_r O_2$ est alternée pour les 2 types de combustibles avec EGR
<b>  <math>\Delta_r CO</math>  </b>	177,19 à 363,64	291,1 à 762,66	L'EGR cause une $\Delta CO$ plus réduite avec l'HVC que le gasoil
<b><math>\Delta_r NO_x</math></b>	1,22 à 66,47	34,45 à 72,19	L'EGR crée une réduction plus élevée avec le gasoil que l'HVC
<b>  <math>\Delta_r T_f</math>  </b>	32,68 à 67,99	27,31 à 55,07	L'EGR entraîne une $\Delta T_f$ plus élevée avec l'HVC que le gasoil
<b>  <math>\Delta_r CO_2</math>  </b>	183,6 à 262,3	79,94 à 423,36	Entre 40 et 100% de charge le gasoil émet plus de $CO_2$ que l'HVC $\Delta_r CO_2$ HVC < $\Delta_r CO_2$ gasoil
<b><math>\Delta_r \eta_{gl}</math></b>	0 à 8,57	2,70 à 12,5	L'EGR crée $\Delta_r \eta_{gl}$ plus faible avec l'HVC que le gasoil sauf à 100% de charge c.à.d. moins de pertes avec HVC que gasoil

**Tableau 4 : résumé des variations relatives de l'EGR avec l'HVC et le gasoil**

#### **IV. Conclusion**

Les différents essais avec et sans EGR utilisant le gasoil ou l'HVC ont permis de mettre en évidence l'effet EGR sur le comportement du moteur du point de vue émissions et performance de la machine. Nous avons abouti aux mêmes résultats que certains chercheurs par contre d'autres sont divergents. Nous avons pu remarquer qu'à 10% de taux EGR aucune réaction significative sur le moteur mais aux environs de 30% et au-delà le régime d moteur change complètement. Il s'étouffe voir s'éteint lorsque la charge est à 100%. En définitive l'EGR entraîne une augmentation de la consommation spécifique, des températures d'échappement et de fumée, du monoxyde de carbone et du gaz carbonique d'une part et d'autre part nous avons une réduction du rendement global et de certains gaz à l'échappement comme les oxydes d'azote, l'oxygène. Nous terminerons en disant que l'EGR n'a pas pu être optimisé pour des raisons de non disponibilité du deuxième analyseur de gaz envoyé en France pour paramétrage. Nous nous contenterons du taux de recirculation optimisé de 20% obtenu à travers une étude menée l'année dernière sur la recirculation (mémoire fin d'études master spécialisé option énergie LBEB 2009).

## **CONCLUSION**

## **CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES**

Cette étude nous a permis de mesurer certains impacts des gaz recirculés sur le comportement du moteur avec un taux d'optimisation de 20%. A travers ce mémoire nous avons pu vérifier certains résultats obtenus par des chercheurs même si nous n'avons pas utilisé les mêmes combustibles en témoigne la réduction du NO<sub>x</sub> de 66,47%. Nous avons pu évaluer certains impacts de l'EGR sur le fonctionnement du moteur. En effet du point de vue impact sur la combustion l'EGR apporte une augmentation supplémentaire des températures d'échappement (pouvant atteindre 37,96% de celle sans EGR) et de fumées (hausse maximale 67,99%) causant par endroit la formation de particules solides. D'où l'influence de l'effet EGR sur la qualité de la combustion. En outre l'analyse des émissions de gaz a révélé une élévation supplémentaire du gaz carbonique variant entre 183,6 à 262,3%, du monoxyde de carbone (entre 177,19 à 363,4%) par contre certains gaz émis à l'échappement comme les oxydes d'azote et l'oxygène sont réduits. Afin du point de vue performance du moteur nos analyses ont montré un accroissement supplémentaire de la consommation spécifique et une baisse du rendement global. Notre étude a aussi montré le lien qu'il ya entre le taux de recirculation et la charge causant même l'arrêt du moteur pour une charge de 100% avec un taux de recirculation de 30%. De façon générale l'EGR a des effets plus ou moins positifs sur la combustion comme le révèlent les gaz émis par contre les performances du moteur sont affectées et nous pouvons conclure que notre système EGR n'est pas adapté au moteur diesel avec usage de l'huile végétale comme carburant. En perspective nous recommandons que cette étude soit approfondie avec l'acquisition de systèmes EGR standard à chaud et à froid autorégulés et la présence de deux analyseurs de gaz ceci permettra d'atteindre des résultats encore plus précis et de mieux rentabiliser les performances du moteur et des gaz émis.

### Références bibliographiques

- [1] : Djivénou Yaovi **TOMETRY**, *étude de l'émission de gaz et des performances d'un moteur diesel fonctionnant aux huiles végétales conditionnées à l'additif ADERCO*, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'équipement rural, Burkina Faso, Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'Environnement, 2008, 80 pages
- [2] : Aurélie **PIPEREL**, *Impacts des propriétés de gaz d'échappement recyclés sur l'initiation et le déroulement de la combustion : caractérisation paramétrique de la réactivité de l'EGR* Thèse énergétique, transferts thermiques et combustion, Université d'Orléans, 2008, 304 pages
- [3] : Olivier **GRONDIN**, *Modélisation du moteur à allumage par compression dans la perspective du contrôle et du diagnostic*. Thèse, spécialité énergétique, Université École Doctorale Sciences Physiques et Mathématiques pour l'Ingénieur, France (Rouen), 2004, 214 pages
- [4] : **Pradeep, V. and R.P. Sharma**, *Use of HOT EGR for NOx control in a compression ignition engine fuelled with bio-diesel from Jatropha oil*. *Renewable Energy*, 2007.**32**: p. 1136–1154
- [5] : **Maiboom, A., X. Tautzia, and J.F. Hetet**, *Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive*.*Energy*, 2008. **33**(1): p. 22-34
- [6] : **Ladommatos, N.**, *The dilution, chemical, and thermal effects of exhaust gas recirculation on diesel engine emissions. Part 2: Effects*. *Fuel and Energy Abstracts*, 1997. **38**(3): p. 186-186
- [7] : **Agarwal, D., S. Sinha, and A.K. Agarwal**, *Experimental investigation of control of NOx emissions in biodiesel-fueled compression ignition engine*. *Renewable Energy*, 2006. **31**(14): p. 2356-2369.
- [8] : **Venkateswarlu and Murth**, *Emission characteristics of diesel engines with alternative alternative Vol.2, Issue 2(2010)69-78*
- [9] : Pascal **GIANSETTI**, *thèse: Contrôle moteur à allumage commandé Estimation / prédiction de la masse et de la composition du mélange enfermé dans le cylindre*. 2005

- [10] : **S.C. Sorenson, S.-E.M.**, *Performance and emissions of a 0.273 liter direct injection diesel engine fuelled with neat dimethyl ether*. 1995. 950064
- [11] : **Ming Zheng, Graham T. Reader, and J.Gary Hawley**, *Diesel engine exhaust gas recirculation--a review on advanced and novel concepts*. Energy Conversion and Management, 2004. **45**(6): p. 883-900
- [12] : **Nwafor, O.M.I. and G. Rice**, *Performance of Rapeseed Oil Blends in a Diesel Engine*. Applied Energy, 1996. **54**(4): p. 345-354
- [13] : **Haiyong Peng et al.**, *Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions during cold start of direct injection (DI) diesel*. Energy, 2008. **33**(3): p. 471-479.
- [14] : **Saleh, H.E.**, *Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine*. Fuel, 2008. 87(13): p. 3031-3039.
- [15] : Michel Marot Clément **KOH**, *étude de la recirculation des gaz d'échappement dans un moteur diesel utilisant les huiles végétales comme carburant*, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master spécialisé en énergie et génie des procédés industriels, Burkina Faso, Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'Environnement, 2008, 57 pages
- [16] : **Zheng, M., et al.**, *Biodiesel engine performance and emissions in low temperature combustion*. Fuel, 2008. **87**(6): p. 714-722
- [17] : **Ying, W. and Z. Longbao**, *Experimental study on exhaust emissions from a multicylinder DME engine operating with EGR and oxidation catalyst*. Applied Thermal Engineering, 2008. 28(13): p. 1589-1595
- [18] : **Swartling, F.**, *Gaz flow observer for diesel engines with EGR*. 2005
- [19] : **Saleh, H.E.**, *Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine*. Fuel, 2008. 87(13): p. 3031-3039
- [20] : **Tsolakis, A., A. Megaritis, and D. Yap**, *Application of exhaust gas fuel reforming in diesel and homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines fuelled*. Energy, 2008. 33(3): p. 462-470.
- [21] : Martin Francis **SOBGUI MIAFO**, *automatisation et optimisation du fonctionnement d'un groupe électrogène fonctionnant aux huiles végétales*, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'équipement rural, Burkina Faso, Institut International d'Ingénierie de l'Environnement et de l'Eau 2008, 56 pages.

### Annexe 1

- 1 Pipe d'admission
- 2 Collecteur d'échappement
- 3 Electrovanne EGR + Vanne EGR
- 4 Recirculation des gaz brûlés

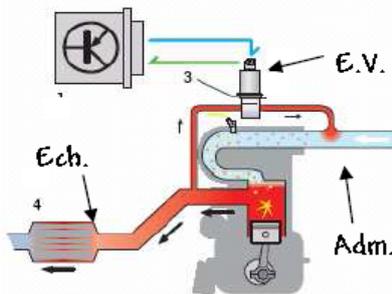


Figure 1 : principe de la recirculation

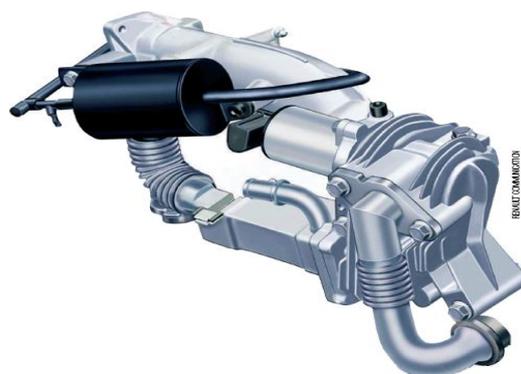


Figure 2 : modèle EGR à chaud

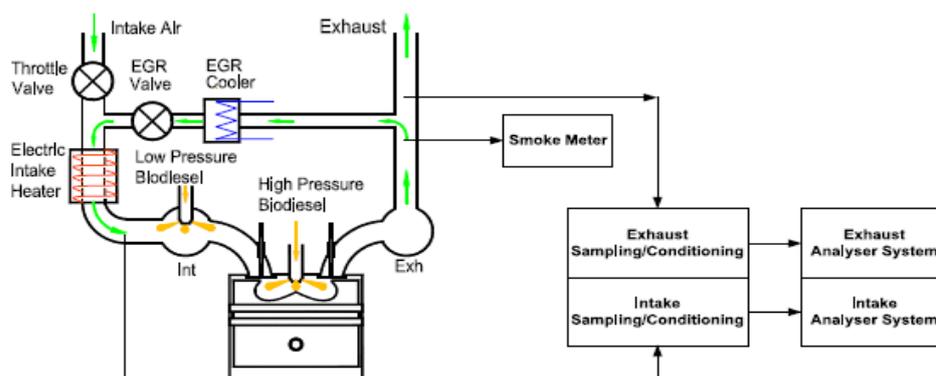


Figure 3 : schéma de principe EGR à froid

## Annexe 2

Formule	Abréviations	Auteurs
$\%EGR = \frac{m_e}{m_{air} + m_e + m_f} \times 100$	m <sub>e</sub> : débit massique EGR m <sub>a</sub> : débit massique air m <sub>f</sub> : débit massique fuel	MING Zheng et Al [16]
$\%EGR = \frac{m_{egr}}{m_{air} + m_{fuel}} \times 100$	m : débit massique	H.E.SALEH [17]
$\%EGR = \frac{m_{egr}}{m_{entr.tot.}} \times 100$	m : débit massique	Frédéric SWARTLING [18]
$\%EGR = \frac{X_{CO_2\ inlet}}{X_{CO_2\ exhaust}} \times 100$	X <sub>CO<sub>2</sub> inlet</sub> : concentration CO <sub>2</sub> entrant X <sub>CO<sub>2</sub> exhaust</sub> : concentration CO <sub>2</sub> sortant	Alain MA IBOON [6]
$\%EGR = \frac{Intake_{CO_2}}{Exhaust_{CO_2}} \times 100$	CO <sub>2</sub> : concentration CO <sub>2</sub>	M. ZHENG et AL [19]
$\%EGR = \frac{m_{egr}}{m_i} \times 100$	M <sub>i</sub> : masse totale du mélange à l'entrée	ARGAWALD [7]
$\%EGR = \frac{CO_{2\ ent} - CO_{2\ air}}{CO_{2\ ent}} \times 100$	CO <sub>2</sub> air : concentration de CO <sub>2</sub> dans l'air	W. YING [20]
$\%EGR = \frac{M_{air\ sans} - M_{air\ avec}}{M_{air\ sans}} \times 100$	M <sub>air sans</sub> : masse d'air sans EGR	I. PRADEEP [5]
$\%EGR = \frac{CO_{2\ int} - CO_{2\ atm}}{CO_{2\ ext} - CO_{2\ atm}} \times 100$	CO <sub>2</sub> atm : concentration CO <sub>2</sub> de l'atmosphère	A. ARMAS [10]

**Tableau 1 : formules de calcul du taux EGR**

### Annexe 3



*Photo 1 : groupe électrogène couplé aux bancs*



*Photo 2 : bancs de charge*



*Photo 3 : analyseur de gaz*



*Photo 4 : thermomètre numérique*

## Annexe 4

CHARGE	Temps en h	Consommation g/kWh			T <sub>échapp</sub> °C		
		Gasoil sans EGR	HVC sans EGR	HVC 20% EGR	Gasoil sans EGR	HVC sans EGR	HVC 20% EGR
100%	0,033	342,00	365,80	400,09	488,73	492,60	513,00
80%	0,033	341,11	386,76	388,66	387,90	402,60	457,90
60%	0,033	370,50	424,23	434,39	314,17	334,83	371,35
40%	0,033	423,94	491,54	491,54	244,73	264,13	318,90
20%	0,033	612,75	727,79	731,60	186,17	197,03	245,30
0%	0,033				146,07	150,70	207,90

Tableau 5 : récapitulatif des données expérimentales avec l'HVC sans EGR, le gasoil sans et avec EGR

CHARGE	Temps en h	Oxygène : O <sub>2</sub>			Monoxyde de carbone : CO			Oxyde d'azote Nox		
		Gasoil sans EGR	HVC sans EGR	HVC 20% EGR	Gasoil sans EGR	HVC sans EGR	HVC 20% EGR	Gasoil sans EGR	HVC sans EGR	HVC 20% EGR
100%	0,033	16,53	17,53	10,26	444,00	754,00	2090,00	484,33	334,00	112,00
80%	0,033	17,57	17,84	12,04	155,33	455,67	1580,00	405,67	333,67	270,00
60%	0,033	18,38	18,34	11,65	130,67	385,00	1785,00	305,67	274,33	128,00
40%	0,033	19,14	18,86	13,26	144,00	352,00	1584,00	199,00	190,00	123,00
20%	0,033	19,76	19,34	15,13	163,67	453,00	1615,00	119,00	111,67	84,00
0%	0,033	20,12	19,85	17,27	175,33	590,67	1766,00	70,00	54,67	54,00

Suite tableau5 : récapitulatif des données expérimentales avec l'HVC sans EGR, le gasoil sans et avec EGR

Annexe 5

Température de fumée $T_f$			Gaz carbonique $CO_2$			Rendement global $\eta_{gl}$		
Gasoil sans EGR	HVC sans EGR	HVC 20% EGR	Gasoil sans EGR	HVC sans EGR	HVC 20% EGR	Gasoil sans EGR	HVC sans EGR	HVC 20% EGR en %
313,40	273,97	363,50	3,27	2,55	7,87	23,46	27,59	25,23
250,37	234,80	335,90	2,51	2,32	6,57	23,52	26,10	25,97
200,93	192,77	289,50	1,92	1,95	6,86	21,66	23,79	23,24
156,40	154,23	247,90	1,36	1,57	5,68	18,93	20,53	20,53
119,30	114,77	192,80	0,91	1,22	4,42	13,09	13,87	13,80
95,33	87,47	145,20	0,00	0,84	2,65			

Suite tableau 5 : récapitulatif des données expérimentales avec l'HVC sans EGR, le gasoil sans et avec EGR

CHA RGE	Temp s en h	Gasoil EGR 20% Consommation en g/kWh	Gasoil EGR 20% $T_{échapp}$ °C	Gasoil EGR 20% $O_2$ en %	Gasoil EGR 20% CO en ppm	Gasoil EGR 20% NOx en ppm	Gasoil EGR 20% $T_f$ en °C	Gasoil EGR 20% $CO_2$ en ppm	Gasoil EGR 20% $\eta_{gl}$ en %
90%	0,017	351,50	462,50	13,00	1736,50	254,50	399,00	5,89	22,83
70%	0,017	363,38	404,50	11,55	1340,00	179,50	336,75	6,94	22,08
50%	0,017	393,30	331,50	12,30	1077,11	85,00	269,65	6,41	20,40
30%	0,017	484,50	255,50	14,62	882,50	79,50	210,50	4,75	16,56
20%	0,017	630,56	219,00	14,98	1016,50	78,00	185,00	4,78	12,72
0%	0,017		168,95	17,08	724,00	113,50	128,85	2,90	

Suite tableau 5 : récapitulatif des données expérimentales avec l'HVC avec EGR

**Annexe 6**

Charge	$\Delta$ consommation HVC	$\Delta$ consommation Gasoil	$\Delta T_{\text{échap}}$ HVC	$\Delta T_{\text{échap}}$ Gasoil	$\Delta$ HVC O <sub>2</sub>	$\Delta$ O <sub>2</sub> Gasoil	$\Delta$ CO HVC	$\Delta$ CO Gasoil
100%	9,38	2,78	4,14	-5,37	41,47	21,40	177,19	291,10
80%	0,49	6,53	13,74	4,28	32,52	34,26	246,74	762,66
60%	2,40	6,15	10,91	5,52	36,48	33,07	363,64	724,32
40%	0,00	14,29	20,73	4,40	29,68	23,63	350,00	512,85
20%	0,52	2,91	24,50	17,64	21,78	24,19	256,51	521,08
0%			37,96	15,67	13,01	15,12	198,98	312,93

**Tableau 6 : récapitulatif des données de variations relatives liées à l'effet EGR HVC-Gasoil**

Charge	$\Delta$ NOx HVC	$\Delta$ NOx Gasoil	$\Delta T_f$ HVC	$\Delta T_f$ Gasoil	$\Delta$ CO <sub>2</sub> HVC	$\Delta$ CO <sub>2</sub> Gasoil	$\Delta \eta_{gl}$ HVC	$\Delta \eta_{gl}$ Gasoil
100%	66,47	47,45	32,68	27,31	209,03	79,94	8,57	2,70
80%	19,08	55,75	43,06	34,50	183,60	176,13	0,49	6,13
60%	53,34	72,19	50,18	34,20	251,79	234,17	2,34	5,80
40%	35,26	60,05	60,73	34,59	261,78	248,90	0,00	12,50
20%	24,78	34,45	67,99	55,07	262,30	423,36	0,52	2,82
0%	1,22	-62,14	66,01	35,16	214,23			

**Suite tableau 6 : récapitulatif des variations relatives liées à l'effet EGR HVC-Gasoil**

Annexe 7

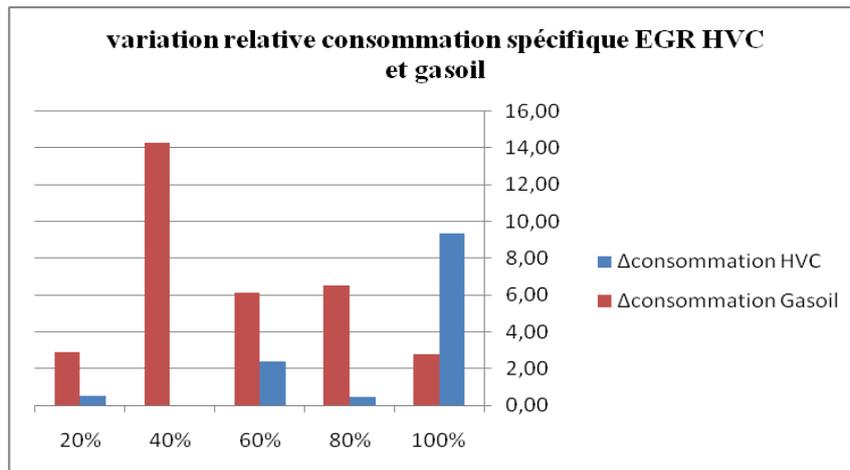


Figure 13 : variation relative consommation spécifique EGR HVC-gasoil

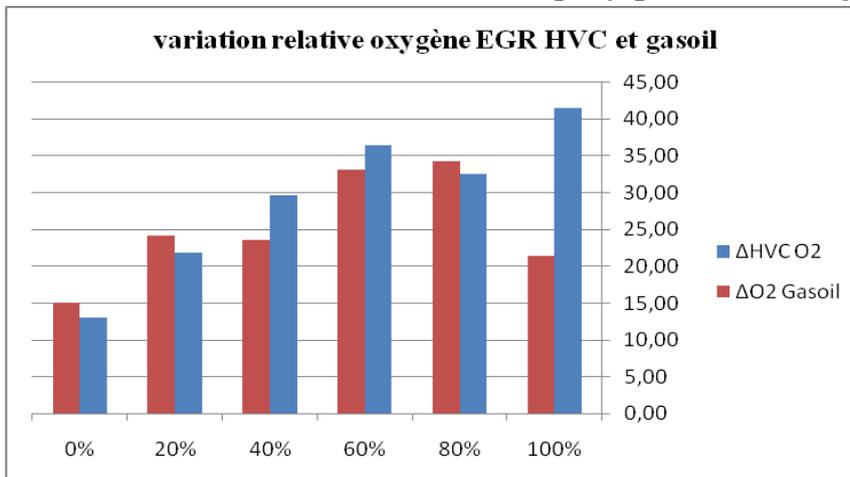


Figure 14 : variation relative oxygène EGR HVC-gasoil

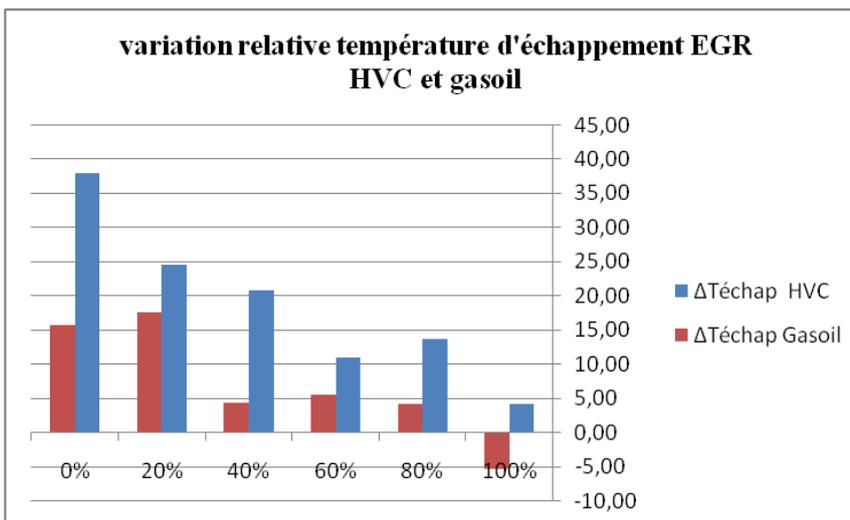
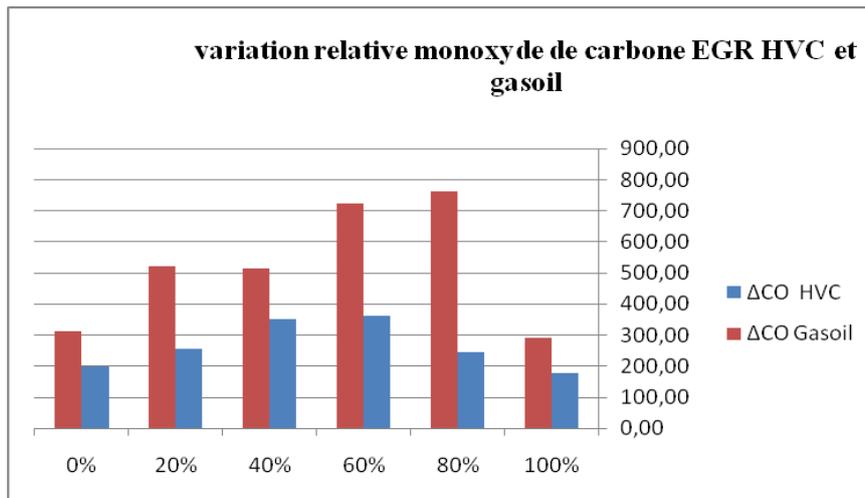
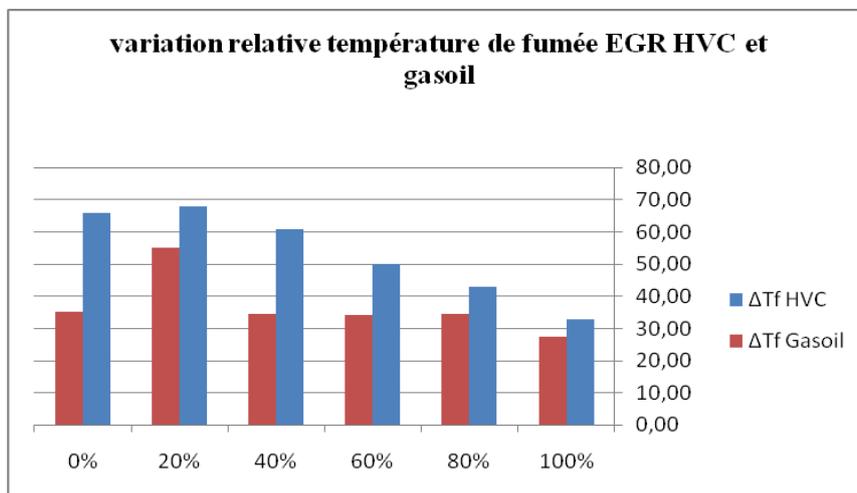


Figure 15 : variation relative température d'échappement EGR HVC-gasoil

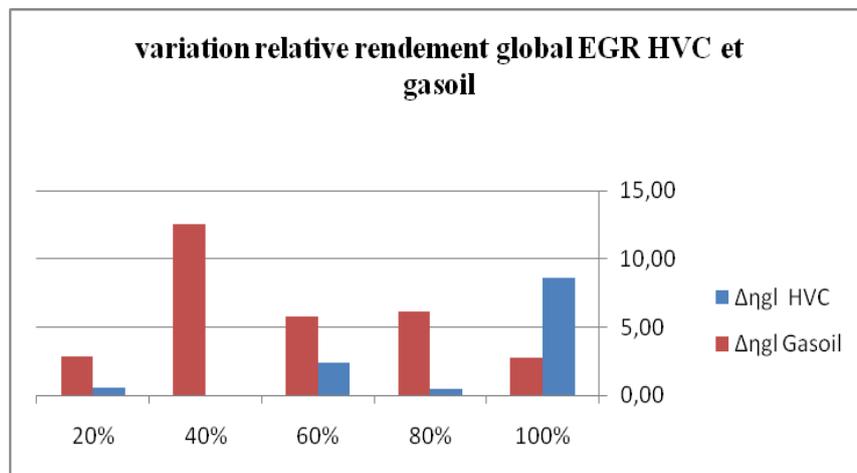
### Annexe 8



*Figure 16 : variation relative monoxyde de carbone EGR HVC-gasoil*

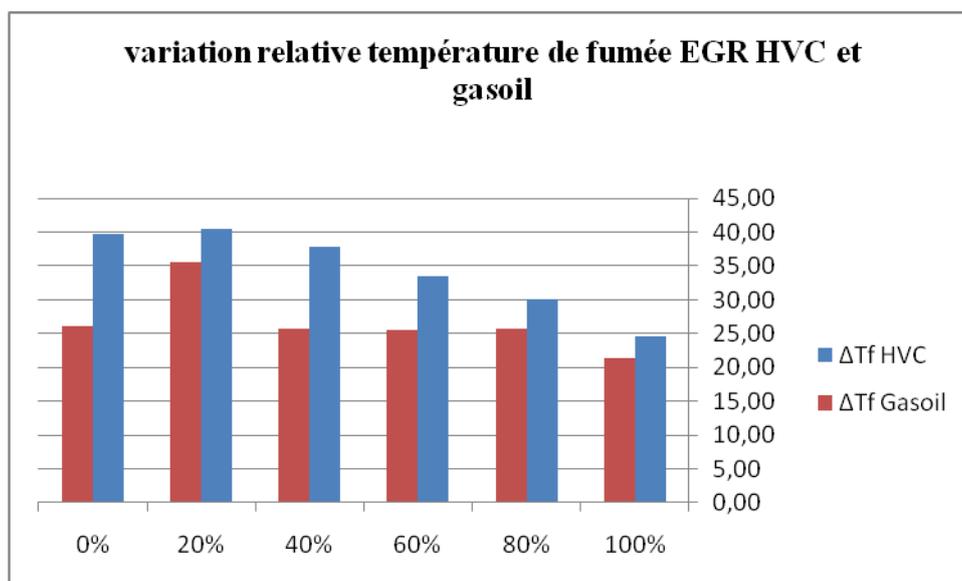


*Figure 17 : variation relative oxyde d'azote EGR HVC-gasoil*

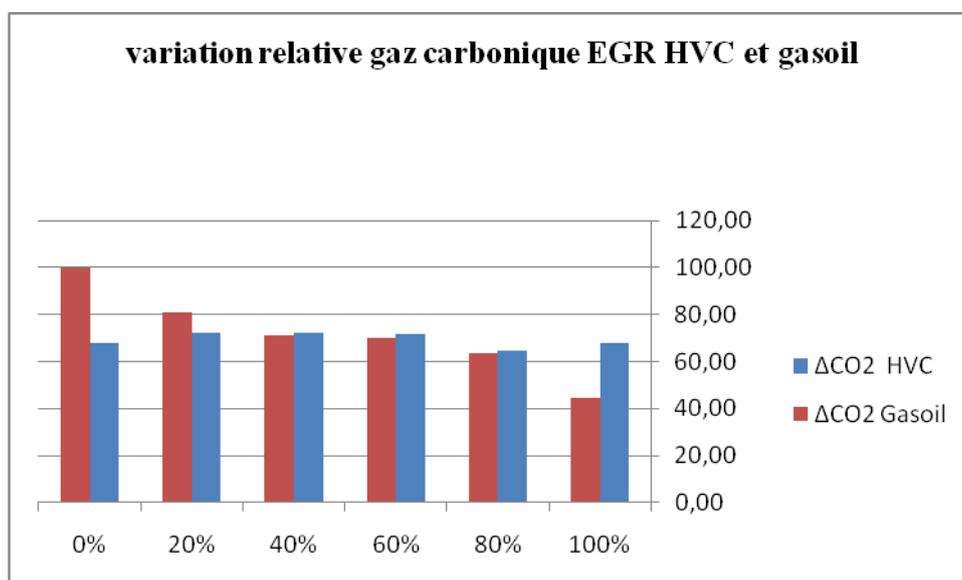


*Figure 18 : variation rendement global EGR HVC-gasoil*

### Annexe 9



*Figure 19 : variation relative température de fumée EGR HVC-gasoil*



*Figure 20 : variation relative gaz carbonique EGR HVC-gasoil*