



Utilisation des biogaz issus de déchets dans les moteurs dual-fuel

M. S. Lounici^{*1,2}, L. Tarabet^{*3}, K. Loubar², M. Balistrrou¹, M. Tazerout²

¹Laboratoire d'énergétique, mécanique et ingénieries UMBB,
Boumerdes, 35000, Algérie. msslounici@hotmail.com

²GEPEA, UMR 6144, DSEE, Ecole des Mines de Nantes,
44307 Nantes, France.

³Laboratoire des systèmes énergétiques, EMP,
BP17 Bordj El Bahri, Algérie.

Résumé— La valorisation énergétique des biogaz issus de déchets, présente un grand intérêt tant sur le plan écologique qu'économique. Cependant, elle est confrontée à des problèmes qui peuvent compromettre leur utilisation industrielle. Dans la présente étude, ces problèmes sont d'abord traités. Les moteurs dual-fuel ont été investigués comme une piste de valorisation de ces gaz et de recherche de solutions à ces problèmes. Ainsi, leurs performances et les émissions polluantes qu'ils engendrent, ont d'abord été évaluées. Pour cela, une investigation expérimentale a été menée. L'impact de la présence des particules de siloxanes dans ces gaz sur le moteur a été étudié.

Mots clés— Biogaz, moteur diesel, dual-fuel, siloxanes

I. INTRODUCTION

La valorisation énergétique du biogaz issus de déchets présente un intérêt à la fois écologique et économique. L'oxydation du méthane en dioxyde de carbone et l'eau permet de réduire le potentiel de réchauffement global (GWP) de ces gaz : le potentiel (GWP) pour 100 ans du méthane est 25 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone [1]. De plus, l'énergie produite à partir de biogaz est reconnue comme une forme d'énergie renouvelable [2].

Cependant, la valorisation de ces gaz est confrontée à des problèmes qui peuvent compromettre leur utilisation industrielle, ou du moins réduire leur rentabilité. D'abord, le contenu énergétique de ces gaz varie, puisque le pourcentage de méthane varie en fonction du temps et de la source du biogaz. La qualité d'un biogaz est directement influencée par les paramètres liés à sa production (nature, composition et degré de compactage des déchets, taux d'humidité, température, pH, ...). Le pouvoir calorifique peut ainsi être relativement faible et leur utilisation dans des moteurs à faible rendement thermique réduit de surcroît leur valorisation.

Le deuxième déficit de la filière consiste en la problématique dite des « Siloxanes ou COVSi » [3-8]. Il s'agit d'un phénomène pas totalement maîtrisé. La présence croissante de ces COVSi constitue un véritable frein à la valorisation énergétique du biogaz notamment dans les moteurs à combustion interne. En effet, suite à la combustion, les siloxanes se transforment en dioxyde de silicium (SiO_2), qui peut se déposer sur les différents équipements en contact avec

les gaz brûlés, sous forme de dépôt blanchâtre [3] apparenté à la céramique (Fig.1). Ces dépôts, produisent l'abrasion des pièces en mouvement, la destruction des propriétés de l'huile de lubrification, le colmatage des injecteurs et pales des turbines pour les moteurs suralimentés.



Fig. 1 Dépôts sur les éléments d'un moteur fonctionnant au biogaz (siloxanes) [3].

En outre, ces dépôts peuvent favoriser l'apparition du phénomène de cliquetis, suite à la formation de points incandescents servant de points d'allumage secondaires. La formation de ces promoteurs de cliquetis, peuvent compromettre l'avantage d'une bonne résistance au cliquetis du biogaz due au pourcentage de méthane et de CO_2 présents



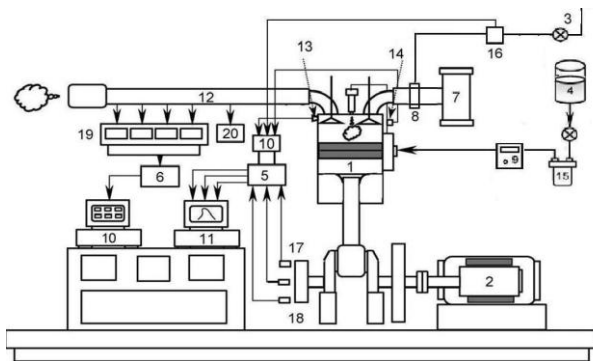
dans ces gaz. Ce phénomène connu pour être néfaste, voire destructeur, aux moteurs, doit impérativement être évité.

Néanmoins, la valorisation de ces gaz bénéficie d'un grand intérêt. Les politiques de promotion de biogaz se sont étendues à la plupart des pays [1]. Par conséquent, la levée de ces freins est d'une grande importance.

Dans la présente étude, ces problèmes sont investigués et des pistes de solutions sont proposées en vue d'une meilleure valorisation de ces gaz dans les moteurs à combustion interne.

II. DESCRIPTION DU DISPOSITIF ET DE LA PROCEDURE EXPERIMENTALE

La figure (1) montre le schéma du banc d'essai. Les essais réalisés pour cette étude ont été effectués sur un moteur monocylindre diesel du type Lister Petter, 4 temps, à injection directe, refroidi à l'air. L'injection se fait 20 degrés avant le PMH. Le moteur développe une puissance maximale de 4,5 KW à 1500 tr/mn.



- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. Moteur diesel monocylindre | 11. Système d'acquisition rapide |
| 2. Dynamomètre (Frein) en cc | 12. Système d'acquisition lente |
| 3. Gaz naturel réseau | 13. Capteur de pression cylindre |
| 4. Réservoir de gasoil | 14. Capteur de la pression d'injection |
| 5. Carte du capteur de pression | 15. Filtre de combustible liquide |
| 6. Carte de l'analyseur de fumée | 16. Débitmètres massiques pour biogaz |
| 7. Entrée d'air d'admission | 17. Détecteur du PMH |
| 8. Mélangeur air-gaz | 18. Capteur de vitesse de rotation |
| 9. Débitmètre de combustible | 19. Analyseur de fumée |
| 10. Amplificateurs de signal | 20. Analyseur des suies |

Fig. 2 Banc d'essai moteur dual-fuel.

Le frein moteur est constitué d'une machine électromécanique à courant continu. Lors du démarrage, ou en fonctionnement entraîné (motoring), elle est utilisée comme machine motrice. En fonctionnement normal du moteur, elle devient une génératrice transformant l'énergie mécanique en électricité envoyée sur le réseau via un convertisseur.

Le contrôle des paramètres de fonctionnement du moteur (charge et vitesse de rotation), ainsi que l'acquisition lente des données, sont réalisés à l'aide d'un logiciel en LabView. Ce système d'acquisition lente permet aussi l'acquisition d'autres paramètres tels que la température extérieure, la pression atmosphérique, la température de cylindre...

Un débitmètre d'air lié à un large réservoir permettant l'amortissement des oscillations, assure la mesure du débit d'air aspiré par le moteur. Le débit du gasoil injecté est mesuré par un débitmètre massique. Le débit de gaz naturel est contrôlé et mesuré par un débitmètre massique.

Un système d'acquisition rapide (AVL) permet d'enregistrer les valeurs de la pression de la chambre de combustion et celle d'injection du gasoil durant le cycle moteur avec un pas de 0,1 degré d'angle de vilebrequin. Les acquisitions sont moyennées sur 100 cycles consécutifs, afin d'obtenir les paramètres nécessaires à l'analyse de la combustion.

La température des gaz d'échappement est mesurée à l'aide d'un système d'acquisition muni de thermocouples du type Chromel Allumel.

Pour la mesure des émissions polluantes, une baie d'analyse placée sur la ligne des gaz d'échappement est utilisée (Fig. 2). Les émissions d'oxydes nitriques (NOx) sont mesurées par chimiluminescence via un analyseur de type TOPAZE 32M. Les émissions de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO₂) sont mesurées par absorption de rayonnement infrarouge à l'aide d'un analyseur MIR 2M.

Les émissions de particules sont mesurées à l'aide d'un analyseur de poussières en temps réel (modèle TEOM 1105), par mesure et pesée en continu de la concentration massique en particules des gaz d'échappement.

Le moteur a été convenablement modifié pour fonctionner en mode dual-fuel. Afin de comparer le fonctionnement dual-fuel au diesel, le moteur fonctionne d'abord en mode diesel normal, puis en dual-fuel. En fonctionnement dual-fuel, un effort a été fait pour maintenir la quantité de carburant pilote constante pour toutes les charges de moteur étudiées. Elle est fixée de telle sorte à permettre environ 10% de la puissance nominale du moteur en diesel. La puissance du moteur est ensuite ajustée par le biais de la quantité de combustible gazeux. Les mesures ont été effectuées après stabilisation du fonctionnement du moteur pour un régime de 1500 tr/mn.



III. RESULTATS ET DISCUSSION

Les moteurs dual-fuel sont une voie intéressante pour la valorisation des biogaz. Ces moteurs utilisent à la fois un mélange de biogaz et de gazole (ou de biodiesel). Le mélange gaz-air est allumé par un combustible pilote. Celui-ci est injecté directement dans la chambre de combustion, tandis que le gaz est introduit dans le conduit d'admission.

Les avantages de l'utilisation de ces gaz dans les moteurs diesel sont très prometteurs. Plusieurs aspects ont été étudiés. Ce type de moteurs a été investigué comme une piste de valorisation de ces gaz et de recherche de solutions aux problèmes susmentionnés.

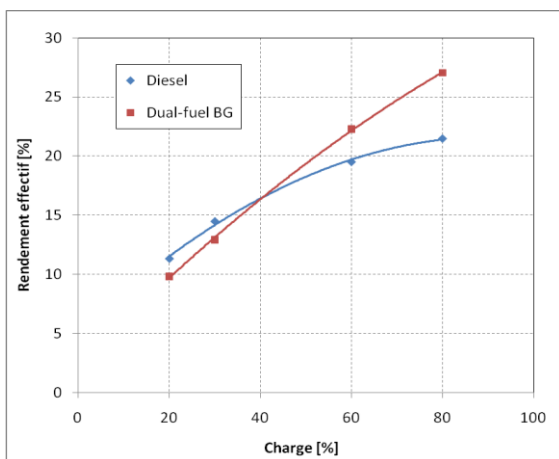
A. Performances et émissions

La figure (3) présente l'évolution du rendement effectif et de la consommation spécifique d'un moteur dual-fuel au biogaz en fonction de la charge à une vitesse de rotation de 1500 tr/mn. Une comparaison est faite avec le fonctionnement diesel conventionnel.

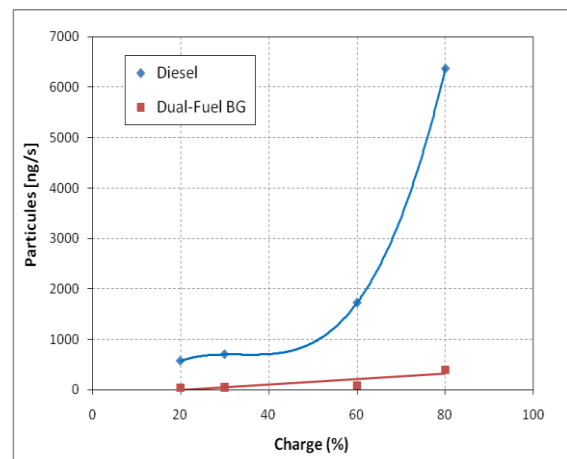
Ces gaz sont principalement composés de méthane et de dioxyde de carbone. Par conséquent, ils ont un indice d'octane élevé, et donc, ils conviennent aux moteurs avec un taux de compression relativement élevé. Leur valorisation dans les moteurs diesel est alors adéquate. De plus, nos résultats (Fig. 3) montrent qu'à partir d'une certaine charge (environ 40% de la charge nominale dans notre cas), le rendement en dual-fuel devient supérieur à celui obtenu en fonctionnement diesel conventionnel. Ceci, sachant que les moteurs diesel ont déjà des rendements plus élevés que les moteurs à allumage commandé. Pour ce qui est de la consommation spécifique, bien qu'à charge élevée, l'écart est beaucoup plus inférieur, elle est, dans tous les cas, plus importante en mode dual-fuel. Ceci est justifié par le faible pouvoir calorifique du biogaz.

Ainsi, il ressort que les biogaz peuvent être valorisés dans les moteurs dual-fuel avec des rendements très intéressants.

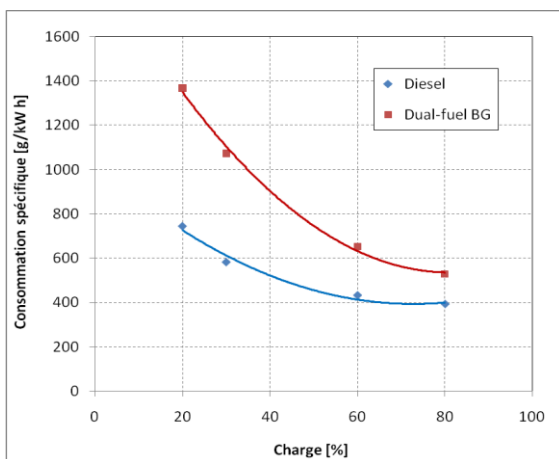
Concernant les émissions polluantes, la figure (4) montre l'évolution des différentes émissions en mode dual-fuel au biogaz en fonction de la charge. Celles-ci sont comparées à celles du fonctionnement diesel conventionnel.



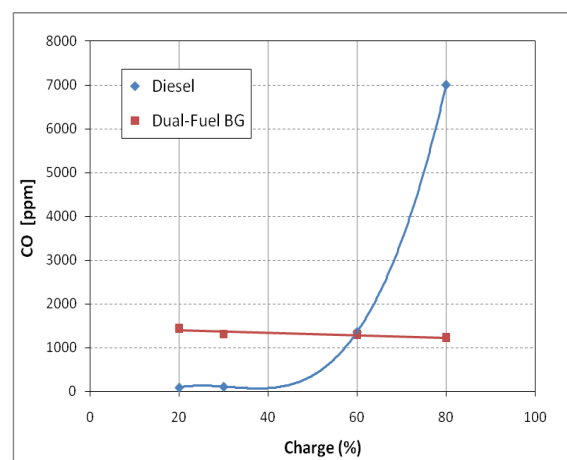
(a)



(a)

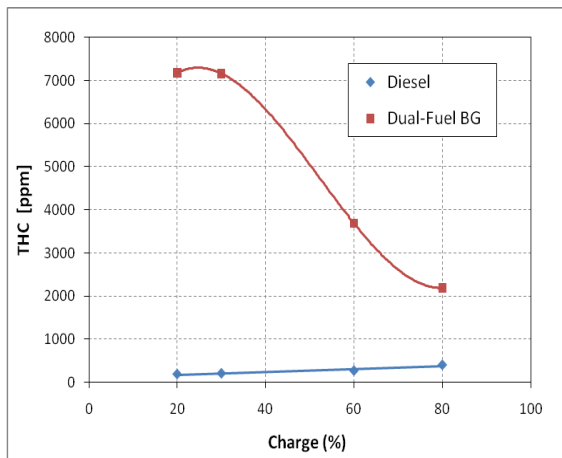


(b)

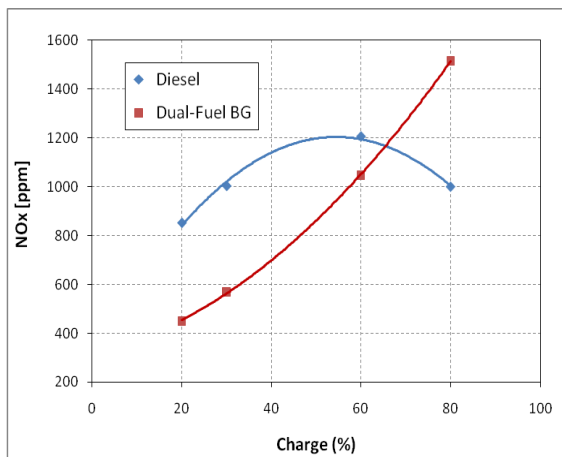


(b)

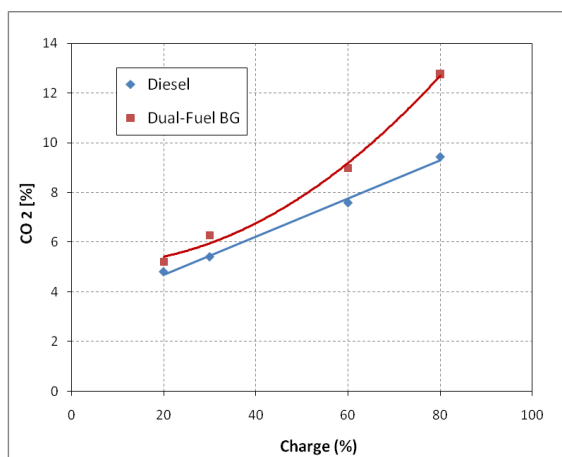
Fig. 3 Variation du rendement effectif et de la consommation spécifique en fonction de la charge.



(c)



(d)



(e)

Fig. 4 Variation des émissions polluantes en fonction de la charge.

Le biogaz, étant principalement constitué de méthane et de dioxyde de carbone, a l'avantage de ne pas présenter de problèmes d'émissions de particules. Ainsi, il apparaît clairement (Fig. 4-a), surtout à charge élevée, le mérite de ces gaz concernant ce type d'émissions.

Avec l'augmentation de la charge, la qualité de la combustion de ces gaz devient meilleure. Ainsi, les émissions des hydrocarbures imbrulés, et de monoxyde de carbone deviennent plus faibles (Fig. 4-b, c). Par contre, les émissions d'oxydes d'azote sont plus importantes dans ces plages de fonctionnement.

Concernant le dioxyde de carbone, étant donné que ces gaz contiennent déjà un pourcentage de ce gaz à effet de serre, son émission est relativement importante et dépend du pourcentage initialement présent dans ces gaz. Néanmoins, en termes de potentiel de réchauffement global, le bénéfice est incontestable.

Ainsi, la valorisation des biogaz dans les moteurs dual-fuel est aussi intéressante du point de vue émissions polluantes surtout aux charges élevées. De plus, les moteurs au biogaz sont en général utilisés dans cette plage de fonctionnement.

Par ailleurs, comme déjà mentionné, le pourcentage de méthane dans ces gaz varie en fonction du temps et de la source du biogaz. Cependant, comme les moteurs dual-fuel utilisent deux carburants, un mélange approprié peut éventuellement compenser cette variation de composition. Toutefois, en France par exemple, l'arrêté du 2 octobre 2001 fixe la limite de la fraction d'énergie non renouvelable (gazole) qui peut être utilisée sur les installations dual-fuel à 20% de la quantité d'énergie électrique qu'elle produit (en moyenne annuelle). Cependant, le recours aux biocarburants permet de palier cette limitation.

B. Investigation de la formation de dépôts dans les moteurs dual-fuel

La problématique dite des siloxanes est mise en évidence dans les moteurs au biogaz à allumage commandé. Des dépôts de siloxane se forment dans les organes en contact avec le biogaz brûlé.

La formation et l'impact de ces dépôts dans les moteurs dual-fuel est sujet à investigation. Ainsi, notre travail vise d'abord à investiguer la formation de ces dépôts dans ce type de moteur. L'étude de l'influence de la présence des siloxanes dans le biogaz sur l'apparition du cliquetis est un autre objectif. La recherche de solution à ce problème est bien évidemment une de nos préoccupations majeures. Dans cette optique, la démarche suivante a été adoptée :

1. Faire fonctionner le moteur en dual-fuel au biogaz sans siloxanes et voir son comportement vis à-vis du cliquetis, notamment par la mesure du couple limite de cliquetis.



2. Refaire la procédure précédente avec trois concentrations différentes de siloxanes.
3. Faire fonctionner le moteur à une charge relativement élevée (environ 70%) et à une concentration élevée de siloxanes pendant une durée (5 heures), puis vérifier le comportement vis-à-vis du cliquetis.
4. Refaire la procédure précédente à différents intervalles de temps.
5. Après avoir consommé tout le siloxane disponible (environ 30 h de marche du moteur avec une concentration de 150 mg/m³), le moteur a été ouvert pour vérification visuelle.
6. Des dépôts de siloxanes ont été constatés. Deux techniques de nettoyage ont été proposées et examinées [9].

La combustion dans les moteurs dual-fuel est différente de celle des moteurs à allumage commandé. Par conséquent, la formation de dépôts de siloxanes dans ces moteurs n'est pas incontestable. Cependant, et après fonctionnement au biogaz, conformément à la démarche susmentionnée, la formation de ces dépôts a été mise en évidence dans les moteurs dual-fuel au biogaz (Fig. 5).

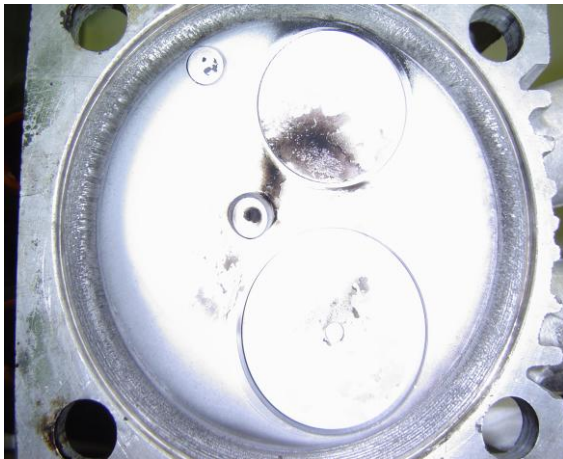


Fig. 5 Dépôts de siloxanes dans le moteur en mode dual-fuel.

Ces dépôts sont formés d'une substance en forme d'une poudre blanche (Fig. 6), fortement adhérente aux surfaces en contact avec les gaz brûlés.



Fig. 6 Echantillons des dépôts formés.

L'analyse par fluorescence X de l'échantillon prélevé de ces dépôts a permis de quantifier d'une façon approximative la composition de ces dépôts (tableau I). Il a été donc confirmé la présence prédominante du silicium (Si).

TABLE I
ANALYSE DES DEPOTS

Elément	Pourcentage [%]
Si	67,467
P	17,752
S	9,474
Ca	2,897
Zn	0,991
K	0,902
Fe	0,433
Cu+Ti	0,084



**Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 2nd International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Gharđaia – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012**



IV. CONCLUSIONS

La valorisation énergétique du biogaz issu de déchets présente un intérêt à la fois écologique et économique. Cependant, elle est confrontée à des problèmes qui peuvent compromettre leur utilisation industrielle. Dans la présente étude, ces problèmes sont d'abord traités. Les moteurs dual-fuel ont été investigués comme une piste de valorisation de ces gaz et de recherche de solutions à ces problèmes. Les résultats de cette étude ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les biogaz peuvent être valorisés dans les moteurs dual-fuel avec des rendements très attractifs.
- la valorisation des biogaz dans les moteurs dual-fuel est aussi intéressante du point de vue émissions polluantes surtout aux charges élevées.
- La formation de dépôts de siloxanes a été mise en évidence dans le cas des moteurs dual-fuel fonctionnant au biogaz. Le traitement de cette problématique mérite un intérêt particulier.

REFERENCES

- [1] M. Ajhar, M. Travesset, S. Yüce, T. Melin. Siloxane removal from landfill and digester gas – A technology overview. *Bioresource Technology*, Vol. 101, Issue 9, p. 2913-2923, May 2010.
- [2] R. Dewil, L. Appels, J. Baeyens, A. Buczynska, L.V. Vaeck. The analysis of volatile siloxanes in waste activated sludge. *Talanta*, Volume 74, Issue 1, p. 14-19, 2007.
- [3] Ch. Couturier, Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse, Rapport-Solagro n°07-0226/1A, 253 p, 2009.
- [4] Ed. Wheless, J. Pierce. Siloxanes in Landfill and Digester Gas Update. Los Angeles County Sanitation Districts Whittier, California, 2004.
- [5] D.R. Ortega. Étude du traitement des siloxanes par adsorption sur matériaux poreux : Application au traitement des biogaz Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Nantes, décembre 2009.
- [6] UK Environment Agency, Guidance on Gas Treatment Technologies for Landfill Gas Engines, Bristol, UK, 2002.
- [7] R. Dewil, L. Appels, J. Baeyens. Analysis of siloxanes in biogas. *Energy Conv. Manag.* 47, p. 1711-1722, 2006.
- [8] M. Schweigkofler, R. Niessner. Removal of siloxanes in biogases, *Journal of Hazardous Materials B83*, p. 183-196, 2001.
- [9] M. S. Lounici, Contribution à la réduction de la pollution urbaine en Algérie par recours à l'utilisation de carburants alternatifs, Thèse de Doctorat, UMBB Boumerdès, 2011.