

Sur la conversion du moteur Deutz F4L912 en version dual-fuel

Mohamed BENBRAIKA, Arezki SMAILI, Said RECHAK, Azouaou HAMMOUDI, Yanis CHENDOUH

Laboratoire Génie Mécanique Développement Ecole Nationale Polytechnique, P.B. 182 El Harrach, 16200, Alger - Algérie.
mohamed.benbraika@g.enp.edu.dz

- **Résumé**— Le présent travail porte sur la conversion du moteur Diesel Deutz F4L912 en dual-fuel (Diesel-GNC). Ce travail de recherche rentre dans le cadre d'un contrat entre le Laboratoire de Génie Mécanique et Développement de l'Ecole Nationale Polytechnique « ENP » et l'entreprise Moteurs « EMO ». L'article comprend deux parties : la première porte sur les modifications techniques à apporter pour la conversion du moteur Diesel en moteur bi-carburant (dual-fuel); et la deuxième partie traite de la simulation numérique à l'aide du code ANSYS. Les simulations ont été effectuées pour les concentrations de GNC variant de 25 à 80%. Les résultats de la simulation montrent que le mélangeur en forme de venturi contenant plusieurs orifices permettait une meilleure homogénéité du mélange air-GNC que le mélangeur à un seul orifice. L'optimisation du nombre d'orifices a été ensuite investiguée. Un nombre minimal de quatre orifices s'avère un choix judicieux.
- Mots clés : — Dual fuel, Conversion, Moteur Deutz F4L912, Simulation numérique, GNC, Mélangeur.

I. INTRODUCTION

La conversion d'un moteur diesel en dual-fuel ne requiert pas de modifications significatives sur le moteur diesel en dual-fuel mais n'est pas pour le moins aisée. En effet, elle doit tenir compte d'un certain nombre de contraintes techniques, économiques et surtout sécuritaires.

Les travaux publiés récemment [1-7] sur la conversion en dual-fuel démontraient clairement la pertinence et le rôle du mélangeur dans un moteur dual-fuel. La recherche sur une telle thématique est d'un intérêt scientifique et d'actualité, qui ainsi fait l'objet du présent travail, dont l'objectif principal est d'optimiser un mélangeur Air/GNC devant équiper le moteur F4L912.

CARACTERISTIQUES DU MOTEUR DEUTZ F4L912

Tableau1. Caractéristiques du moteur F4L912

Nombre de cylindres/ Refroidissement	4 / Air
Puissance maximale	54 kW à 2800 tr/mn
Cylindrée (cm ³), Alésage / Course (mm)	3768, 100 / 120
Couple moteur au régime nominal (N.m)	208N.m à 1650 tr/mn
Consommation spécifique gasoil	200 g/kWh
Taux de compression	19

II. LES METHODES DE CONVERSION EN DUAL-FUEL

Dans le cadre de l'étude de conversion du moteur F4L912, nous avons réalisé une étude comparative entre les différentes méthodes de conversion. L'étude est réalisée sur la base du cahier des charges formulé par l'entreprise EMO mais aussi dans une perspective de conformité aux exigences de conversion citées précédemment.

La conversion en dual-fuel (diesel-GNC) peut se faire de deux façons distinctes :

III. INJECTION SEQUENTIELLE

Elle consiste à injecter le gaz naturel moyennant des injecteurs (un par cylindre) contrôlés électroniquement en amont des soupapes d'admission. Cette méthode permet un contrôle optimal des quantités de gaz à injecter pour chaque cylindre.

Cependant, cette solution présente les inconvénients suivants :

- Apporter une modification importante au moteur.
- Élévation du coût du kit GNC.
- Homogénéité du mélange insuffisante.
- Ne permet pas le préchauffage du mélange Air/GNC au cas de besoin.

IV. INJECTION AVEC MELANGEUR

Cette méthode consiste à réaliser un mélange air/GNC en amont du collecteur d'admission.

Cette solution présente les avantages suivants :

- Possibilité de préchauffer le mélange pour rendre la combustion plus efficace.
- Homogénéité du mélange améliorée.
- Possibilité d'installation de plusieurs capteurs pour la mesure des paramètres thermodynamiques du mélange.
- Parer contre le phénomène de cliquetis.

Outre l'intégration du circuit d'alimentation en gaz, l'aboutissement de la conversion du moteur F4L912 nécessitera le passage vers un système d'injection en gazole commandé. Ceci est justifié par la nécessité d'assurer l'injection de quantités précises de combustible pilote (gazole) selon les conditions de fonctionnement (taux de substitution, régime, charge), mais aussi de garantir la possibilité de passer sans encombre à un fonctionnement purement diesel en cas de rupture de réserve GNC ou encore disfonctionnement du circuit d'alimentation en gaz.

V. ADAPTATION DU MELANGEUR

Le choix du circuit s’est fait en respectant les critères de minimisation du coût de conversion, des modifications et de l’encombrement et la facilité d’adaptation.

Compte tenu de la technologie classique, nous avons privilégié l’utilisation du circuit avec mélangeur. L’adaptation de ce dernier sur le F4L912, permettra d’assurer une bonne homogénéisation du pré-mélange air/GNC mais aussi d’éviter certaines modifications sur le moteur.

La géométrie du mélangeur est similaire à celle d’un tube de venturi et ce pour profiter des avantages que procure ce dernier sur le processus de mélange. Un dimensionnement optimal permettra une augmentation de la vitesse d’écoulement de l’air au niveau du col, produisant ainsi une turbulence favorable à une bonne homogénéisation air/GNC après injection.

VI. MODELE DE MELANGEUR PROPOSE

Les dimensions ont été choisies afin de respecter ce qui suit :

- Minimisation de la longueur afin de réduire l’encombrement.
- Rallongement du col pour augmenter la zone de turbulence.
- Les diamètres d’entrée et de sortie sont choisis conformément au diamètre d’entrée du collecteur d’admission.
- Le diamètre du col est choisi d’une manière à avoir un angle d’inclinaison adéquat afin de minimiser les pertes de charges.

VII. ETUDE DE L’HOMOGENEITE DU MELANGE AIR/GNC

Nous avons réalisé une étude comparative de l’influence du nombre d’orifices d’injection en GNC sur la qualité du mélange. Nous présentons dans ce qui suit, deux variantes du modèle conçu, avec mono et multi-injections ainsi qu’une simulation CFD du processus de mélange sur ANSYS Fluent.

IX. PARAMETRES DE LA SIMULATION NUMERIQUE

- Consommation spécifique en gasoil à N= 2000 tr/mn : 160 g/Ch.h = 217.69 g/kWh.
- Puissance aux mêmes conditions : 60 Ch = 44.13 kW
- Hypothèse et données d’entrée :
- Pouvoir calorifique inférieur du gasoil : 42 MJ/kg
- PCI du CH4 : 50 MJ/kg
- C horaire en diesel à N=2000tr/mn: Ch = 160*60= 9.6 kg / h
- Coefficient d’excès d’air = 1.9
- Taux de substitution de gasoil : 80%

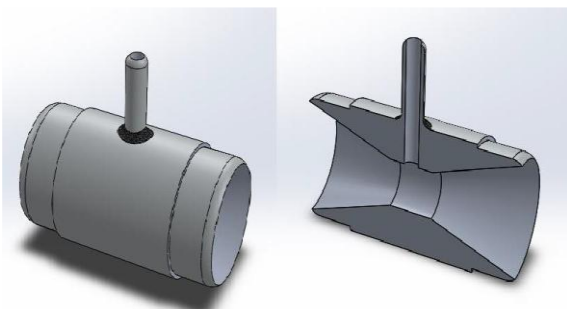


Fig.1- Mélangeur mono-injection

Les figures 2 et 3 mettent en évidence l’hétérogénéité du mélange air/GNC pour le modèle à mono-injection. Cela est mis en relief sur la figure 3 sur laquelle on peut visualiser un étagement de couleur qui reflète une variation de la fraction massique des deux fluides à la sortie du mélangeur.

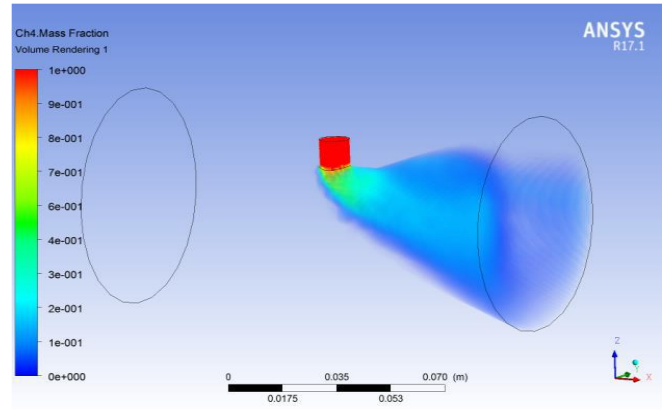


Fig.2 Fraction massique de CH4 (mono-injection)

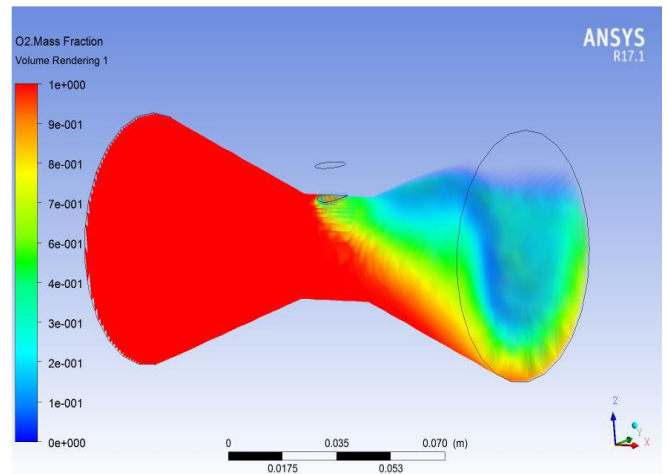


Fig.3 Fraction massique de l’Air (mono-injection)

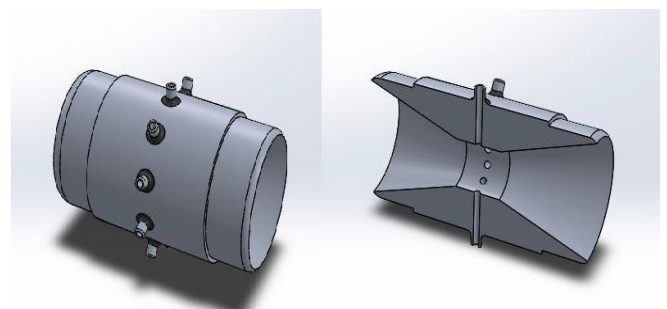


Fig. 4 Mélangeur multi-injection (10 orifices)

Par ailleurs, le modèle à multi-injection représenté sur les figures 5 et 6 démontre clairement une répartition uniforme des fractions massiques de l’air et de CH4 après injection. Ceci est dû à la répartition uniforme de la masse injectée sur la circonférence du col.

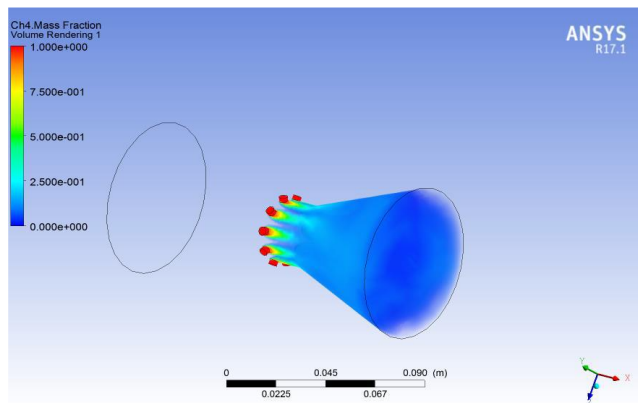


Fig. 5 Fraction massique CH4 (multi-injection)

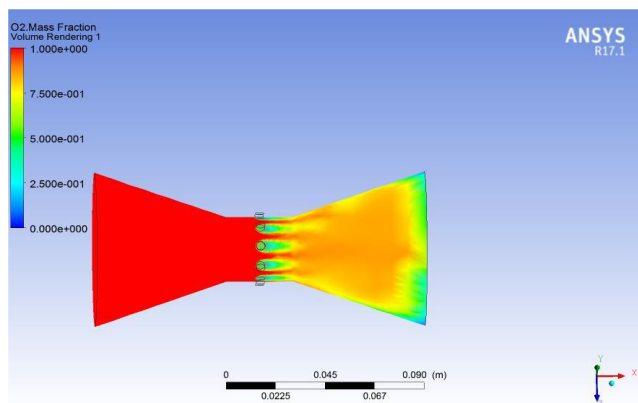


Fig. 6 Fraction massique Air (multi-injection)

X. OPTIMISATION DU MELANGEUR

Cette partie sera focalisée sur la qualité du mélange sortant du mélangeur, elle portera principalement sur l'optimisation de la géométrie du mélangeur (section d'entrée du carburant, section du col) ainsi que sur le nombre de trous d'injection donnant la meilleure homogénéité en utilisant l'outil de simulation numérique ANSYS-Fluent.

Nous avons choisi trois taux de substitution de GNC ; 25% , 50% et 75% pour une fréquence de rotation du moteur à 1500 tr/mn.

Tableau 2. Paramètres calculés du mélangeur

Rendement volumétrique η_v	88.02%
Cylindrée totale du moteur C_y	$3.7699 \times 10^{-3} m^3$
Régime max du moteur N	1500tr/min
Débit volumique d'air stœchiométrique Q_a	0.0415m ³ /s
Vitesse d'entrée d'air U_1	8.2519m/s
Vitesse de sortie du col U_2	34.029m/s
Diamètre du col D_2	39.41mm
Débit massique d'air \dot{m}_{air}	0.05084kg/s
Débit massique de GNC \dot{m}_{GNC}	0.001554kg/s
Rapport théorique air/carburant $r_{air/GNC}^{th}$	17.235kg _{air} /kg _{CH₄}
Rapport réel air/carburant $r_{air/GNC}^r$	32.716kg _{air} /kg _{CH₄}
Coefficient d'excès d'air α	189.82 %
Diamètre d'entrée GNC D_f	7.16mm

Sur la base des résultats obtenus, le mélangeur a été conçu en utilisant le logiciel Solidworks. Nous utilisons le logiciel ANSYS comme outil de modélisation et de simulation numérique pour valider le modèle de mélangeur choisi.

Conditions aux limites :

Trois conditions aux limites ont été prises :

- Entrée d'air : le moteur est à aspiration naturelle
- Entrée GNC : Le GNC est admis au mélangeur à température ambiante et avec une pression de 2bars.
- Sortie mélange : L'équation de conservation de débit massique nous permet de connaître le débit du mélange ainsi que la fraction massique de chaque composant.

Nous calculons les paramètres des conditions aux limites pour l'entrée d'air, l'entrée du GNC et la sortie du mélange ainsi que les paramètres de simulation.

Nous avons conçu 6 modèles de mélangeur à différents nombres de trous d'injection (2 jusqu'à 12).

Puisque le raffinement du maillage affecte significativement la précision des résultats et le temps requis pour la simulation, une étude d'indépendance de maillage a été faite afin de trouver le maillage satisfaisant les deux critères : de précision et de temps. La maille triangulaire et le 'Body Sizing' ont été utilisés pour générer un maillage dans lequel la taille des éléments varie de 1mm à 7mm (tableau 3).

Les paramètres observés lors de cette étude sont l'indice d'uniformité UI et la fraction massique du GNC.

Tableau 3. Variation de UI et de f_{CH_4} pour les différents modes de maillage à la sortie de mélangeur (taille des mailles de 1 à 7 mm)

Cas (mm)	1	2	3	4	5	6	7
f^{CH_4}	0.03	0.031	0.04	0.04	0.036	0.04	0.041
UI	0.87	0.873	0.85	0.88	0.85	0.78	0.856

Calcul de l'indice d'uniformité : L'homogénéité s'évalue à travers l'uniformité de la distribution de la concentration du carburant dans la section de sortie du mélangeur. L'indice quantitatif d'uniformité du débit (UI) est largement utilisé dans l'industrie automobile pour évaluer la distribution du mélange à l'intérieur du mélangeur. Ce coefficient peut être exprimé comme suit [8] :

$$UI = 1 - \frac{1}{2} * \frac{\sum_{i=1}^n |f_i^{CH_4} - f_{moy}^{CH_4}| A_i}{A * f_{moy}^{CH_4}}$$

$$f_{moy}^{CH_4} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n f_i^{CH_4} * A_i$$

Avec:

- UI : Indice d'uniformité.
- $f_i^{CH_4}$: Fraction massique locale de CH_4 .
- $f_{moy}^{CH_4}$: Fraction massique moyenne de CH_4 .
- A : La section où UI est calculé.
- A_i : la section locale.
- i : La $i^{ème}$ maille.
- n : Nombre de maille dans la section A .

Lorsque $UI = 1$, le mélange est homogène et quand $UI = 0$, le carburant ne s'est pas mélangé avec l'air.

Le facteur UI est utilisé pour estimer l'homogénéité du mélange AIR/GNC à la sortie du mélangeur. Le mélange le

plus hétérogène obtenu est celui du 6^{ème} cas avec un indice d'uniformité $UI = 0.78$, le 2^{ème} cas donne le mélange le plus homogène avec un indice d'uniformité $UI = 0.87$. La distribution de la fraction massique du GNC est utilisée pour évaluer l'homogénéité du mélange GNC-Air. La concentration du CH_4 à la sortie du mélangeur doit être uniformément répartie pour obtenir un mélange homogène. Nous avons aussi calculé les fractions massiques du CH_4 f^{CH_4} à la section de sortie pour les 6 modèles de mélangeur en mentionnant l'erreur relative entre $f_{th}^{CH_4}$ et $f_{simulation}^{CH_4}$. L'erreur la plus petite 5% (tableau 4) est celle du mélangeur à 4 trous. Le calcul de l'erreur s'est fait comme suit :

$$e_{rr} = 100 \times \frac{|f_{th}^{CH_4} - f_{simulation}^{CH_4}|}{f_{th}^{CH_4}}$$

Tableau4. UI et f_{CH_4} pour les 6 modèles de mélangeur

Modèle	1	2	3	4	5	6
UI	0.83	0.87	0.84	0.80	0.78	0.78
f^{CH_4}	0.025	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04
Err (%)	15	5	43	65	50	47

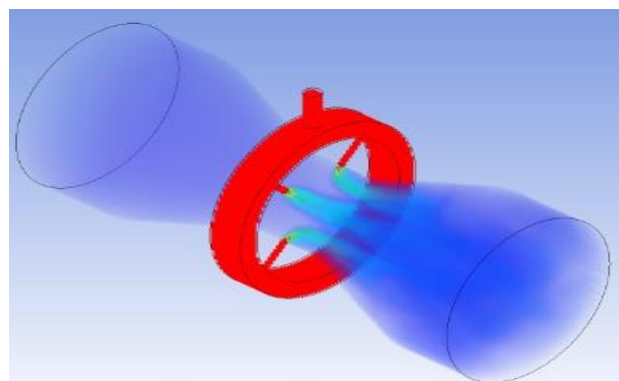


Fig 8. Fraction massique du CH_4 pour 4 orifices à l'intérieur des mélangeurs

Dans la partie de dimensionnement nous avons déterminé la section du col et d'admission du carburant donnant les meilleures conditions de fonctionnement du mélangeur en mode Dual-Fuel avec un taux de substitution de 75%. Dans la partie d'optimisation plusieurs modèles de mélangeur à différents nombres de trous d'injection ont été proposés, le modèle 2 à 4 trous est choisi.

XI. CONCLUSION

Un modèle de mélangeur air/GNC de type venturi à multi-injection (i.e. orifices) s'avère un choix prometteur pour la conversion du moteur Deutz FL4912 en dual-fuel. La simulation CFD à l'aide du logiciel ANSYS Fluent du processus de mélange nous a permis d'étudier proprement l'écoulement des fluides résultant air/GNC et déterminer la configuration minimale du mélangeur. Il a été ainsi trouvé qu'un nombre optimal de 4 orifices semblait produire un meilleur brassage et homogénéisation du mélange air/GNC.

REFERENCES

- [1] Danardon, D.; Kim, K.-S.; Lee, S.-Y.; Lee, J.-H. Optimization the design of venturi gas mixer for syngas engine using three-dimensional CFD modeling. *J. Mech. Sci. Technol.* **2011**, *25*, 2285–2296
- [2] Bora, B.J.; Debnath, B.K.; Gupta, N.; Sahoo, N.; Saha, U. Investigation on the flow behaviour of a venturi type gas mixer designed for dual fuel diesel engines. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* **2013**, *3*, 202–209.
- [3] T. Yusaf I , P. Baker , I. Hamawand and M.M. Noor. effect of compressed natural gas mixing on the engine performance and emissions. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)* ISSN: 2229-8649 (Print); ISSN: 2180-1606 (Online); Volume 8, pp. 1416-1429, July-December 2013
- [4] Supee, A.; Shafeez, M.; Mohsin, R.; Majid, Z. Performance of Diesel-Compressed Natural Gas (CNG) Dual Fuel (DDF) Engine via CNG-Air Venturi Mixjector Application. *Arab. J. Sci. Eng.* **2014**, *39*, 7335–7344.
- [5] Abo-Serie, E.; Özgür, M.; Altinsik, K. Computational analysis of methane-air venturi mixer for optimum design. In *Proceedings of the 13th International Combustion Symposium, Bursa, Turkey*, 9–11 September 2015.
- [6] Arat, H.T.; Baltacioglu, M.K.; Özcanli, M.; Aydin, K. Effect of using Hydroxy-CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, *41*, 8354–8363.
- [7] Hussein A. Mahmood , Nor Mariah. Adam, B. B. Sahari and S. U. Masuri. New Design of a CNG-H2-AIR Mixer for Internal Combustion Engines: An Experimental and Numerical Study. *Energies*, 2017
- [8] Kim, J.; Kim, H.; Yoon, S.; Sa, S. Effect of intake valve swirl on fuel-gas mixing and subsequent combustion in a CAI engine. *Int. J. Automot. Technol.* **2008**, *9*, 649–657.

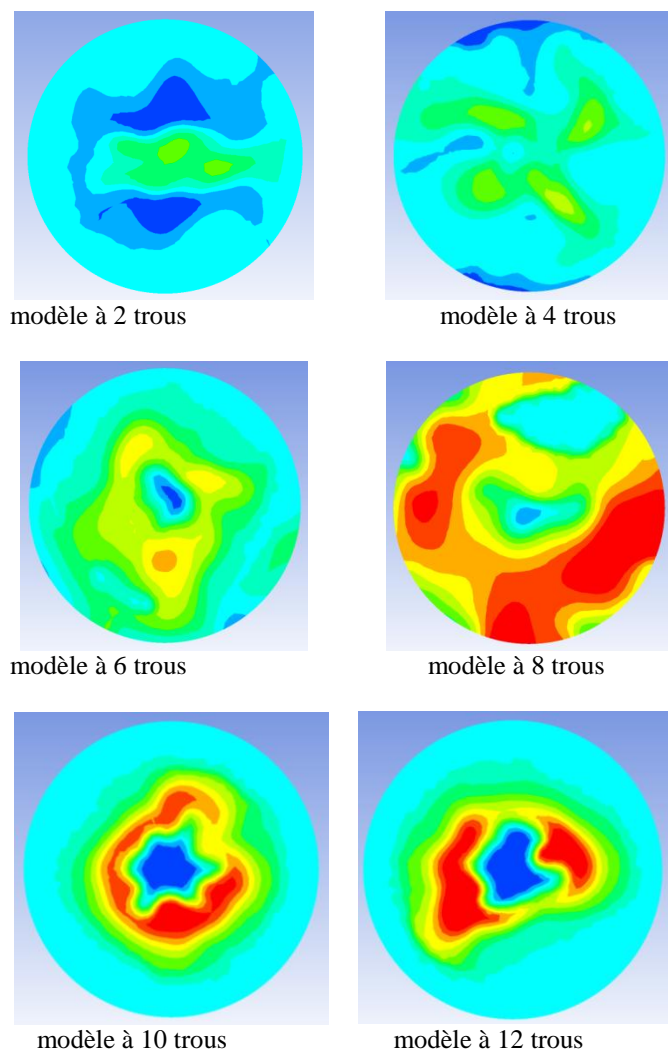


Fig. 7 Fraction massique du CH_4 à la section de sortie des mélangeurs.