

Ecole Supérieure de Navigation

HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

Influence de la pression d'ouverture de l'injecteur et de la composition des acides gras d'un biodiesel sur la composition des gaz d'échappement en mettant l'accent sur la concentration de NO

Toumgho Georges Dalhia

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de
Bachelor en Mécanique Navale

Promoteur : Raf Maes
Année académique 2020 - 2021

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon promoteur Monsieur Raf Maes qui m'a orienté, aidé et conseillé pour la réalisation de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Geert Potters pour sa patience, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche et surtout ses précieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie Monsieur Willem Maes pour m'avoir guidé vers les personnes qui pouvaient m'aider pour ce mémoire.

Je remercie aussi les professeurs de l'Ecole Supérieure de Navigation d'Anvers, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études supérieures.

Je remercie spécialement mon oncle Monsieur Tokam Mambou Alain Joseph pour m'avoir toujours soutenue sur tous les plans durant ces trois années d'études. Je remercie mon oncle Tagne Mambou Jacques d'avoir toujours été là pour moi. Je remercie ma mère Kengne Rosine ainsi que mes tantes et oncles pour leurs encouragements, conseils et prières à mon égard.

Et enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes amis et camarades qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de mon mémoire.

Table des matières

Table des matières	i
Résumé	vi
Abstract	vii
1 Introduction	1
2 Réduction des émissions de gaz	3
2.1 Pourquoi réduire les émissions de gaz	3
2.2 Comment réduire les émissions de gaz	4
3 Les grandes différences entre le biodiésel et le diesel	5
3.1 Les émissions	5
3.1.1 Les particules matières	5
3.1.2 Les oxydes d'azotes	6
3.1.3 Monoxyde de carbone	7
3.2 Compositions chimiques du biodiésel et du diesel	8
3.2.1 Biodiesel	8
3.2.2 Biodiésel et diesel	11
3.3 Les acides gras	12
4 Question de recherche	14
5 Matériaux et méthodologie	15
5.1 Les différents matériaux utilisés	15
5.1.1 Un appareil de mesure du NO et NO ₂	15
5.1.2 Appareil de mesure de particules PM	16
5.1.3 Un capteur de température placé à la sortie de l'échappement	16
5.1.4 Le moteur diesel silencieux 6 kW HR192FB.	17
5.1.5 Prise électrique	18
5.1.6 Les acides gras	18
5.2 Principe de l'expérience	20
5.2.1 Définition du Principe de l'expérience	20
5.2.2 Contrôle changement pression d'injection	21
5.2.3 Contrôle de préparations	22
5.2.4 Contrôle du démarrage du générateur	23
5.2.5 Contrôle sur les biocarburants	24
5.3 Analyse statistique	25
5.3.1 Tests de Student	25
5.3.2 Analyse de variance.....	25

6	Résultats à une pression constante de 22,50 MPa	27
6.1	Résultats à une pression constante de 22.50 MPa	27
6.1.1	Émissions en NO	27
6.1.2	Émissions en NO ₂	29
6.1.3	Émissions en PM	31
6.2	Résultats d'émissions en NO à différentes pressions	33
6.2.1	Biodiesel A	33
6.2.2	Biodiesel B	34
6.2.3	Biodiesel C	35
6.2.4	Biodiesel D	35
6.2.5	Biodiesel E	36
6.2.6	Biodiesel F	37
6.2.7	Biodiesel G	38
6.2.8	Biodiesel H	38
6.2.9	Émissions en NO des biodiesels de A à H à la pression 1	39
6.2.10	Émissions des biodiesels de A à H à la pression 3.....	40
6.2.11	Model du logiciel ANOVA	42
7	Discussion	47
8	Conclusion	51

Table des figures

Figure 1	Concentration des hydrocarbures dans les gaz d'échappement.....	6
Figure 2	Concentration des particules d'azotes	7
Figure 3	Concentration du monoxyde de carbone	8
Figure 4	Molécule de trilinoléate de glycéryle (huile de colza)	9
Figure 5	Formule semi-développée du glycérol	10
Figure 6	Formule semi-développée du biodiesel	10
Figure 7	Composition du diesel	11
Figure 8	Appareil de mesure du NO et NO ₂	15
Figure 9	Appareil de mesure de particules PM	16
Figure 10	Appareil de mesure de température d'échappement	17
Figure 11	Prise électrique	18
Figure 12	Composition d'une huile de colza typique	20
Figure 13	Émissions de NO pour les différents types de biodiesel, injectés à une pression de 22,5 MPa, selon le niveau de la charge appliquée.	28
Figure 14	Graphique des émissions en NO ₂ , injectés à une pression de 22,5 MPa, selon le niveau de la charge appliquée.	30
Figure 15	Graphique des émissions en PM, injectés à une pression de 22,5 MPa, selon le niveau de la charge appliquée.....	31
Figure 16	Émissions en NO du biodiesel A à différentes pressions	34
Figure 17	Émissions en NO du biodiesel B à différentes pressions	34
Figure 18	Émissions en NO du biodiesel C à différentes pressions	35
Figure 19	Émissions en NO du biodiesel D à différentes pressions	36
Figure 20	Émissions en NO du biodiesel E à différentes pressions	37
Figure 21	Émissions en NO du biodiesel F à différentes pressions	37
Figure 22	Émissions en NO du biodiesel G à différentes pressions	38
Figure 23	Émissions en NO du biodiesel H à différentes pressions	39
Figure 24	Émissions des biodiesel de A à H à la pression 1	40
Figure 25	Émissions des biodiesels de A à H à la pression 3	41

Table des tableaux

Tableau 2	Informations du moteur	17
Tableau 3	Composition des différents biodiesels en acide gras, utilisés dans les expériences.	19
Tableau 4	Pression d'injection du biodiesel	22
Tableau 5	Moyenne des biodiesels des émissions en NO en mg/m ³	28
Tableau 6	Liste des valeurs critiques de la statistique t à différentes valeurs d'alpha	28
Tableau 7	Moyenne des biodiesels des émissions en NO en mg/m ³	30
Tableau 9	moyenne des biodiesels des émissions en NO à la pression 1	40
Tableau 10	moyenne des biodiesels des émissions en NO à la pression 3.....	41

Liste des abréviations

A	ampère
kW	kilowatt
mg/m ³	milligramme par mètre cube
MPa	méga pascal
NO	monoxyde d'azote
NO ₂	dioxyde d'azote
NO _x	oxydes d'azote
PM	matières particulaires (Angl. particulate matter)
ppm	partie par million

Résumé

La réduction des émissions de carburant fait l'objet de plusieurs recherches. Le but étant de trouver le meilleur moyen de continuer l'utilisation des moyens de transport modernes, notamment les automobiles et les bateaux tout en diminuant les effets de la pollution. Cependant l'utilisation du diesel engendre des taux d'émission élevés de NO, NO₂ et PM, c'est pour cela qu'on se tourne vers l'utilisation du biodiesel. Il peut être fabriqué de différentes manières avec des matières premières tout aussi différentes mais nous avons utilisé dans le cadre de cette recherche de l'huile de colza. Nous avons eu à faire l'expérience de sept biodiesels avec des compositions en acides gras différentes les unes des autres, avec un biodiesel qui a une composition normale d'acide gras. C'était donc notre référence en termes d'émissions. La variation de la pression d'injection peut aussi améliorer la qualité des émissions, trois variations de pressions ont été faites dans le but de voir les effets sur les émissions de nos différents biodiesels. Les effets de la pression sur nos différents biodiesels ayant des compositions en acides toutes différentes seront évalués. Nos biodiesels sont expérimentés avec un moteur quatre temps monocylindrique à injection directe. Avec une prise électrique, des variations de charges ont été faites de 0 A à 16.65 A. Plus la charge augmente plus les émissions augmentent aussi, il devient donc important de trouver un moyen pour diminuer l'effet des émissions à haute charge. Les expériences montrent que la pression d'injection a une influence sur les émissions des différents biodiesels. Lorsqu'on a pris en compte la charge, la pression la plus haute qui est de 22.50 MPa s'est avérée avoir meilleur rapport en émissions. La composition en acide gras joue aussi un rôle important car parmi les sept biodiesels composés, il y avait trois biodiesels qui répondaient presque toujours aux attentes en émissions qui devaient être inférieures aux émissions du biodiesel de référence. En dehors des émissions en NO, nous avons aussi expérimenté les émissions en NO₂ et PM à la pression de 22.50 MPa. Les résultats en PM et NO₂ et NO des sept biodiesels composés étaient plus au moins aux alentours des émissions du biodiesel de référence. En effet, il y en avait trois qui étaient presque toujours inférieures aux émissions du biodiesel de référence. Ce qui implique que la composition en acide gras joue tout aussi un rôle important que la pression et la charge.

Abstract

Reducing fuel emissions is the subject of most research aiming to find the best way to continue using the modern means of transport, namely cars and boats while reducing the effects of pollution. However, the use of diesel causes high NO, NO₂ and PM, emissions and that is the reason why biodiesel is becoming a good alternative to diesel. Biodiesel can be produced in different ways with different raw materials as well, but we used rapeseed oil for this research. We experimented experiment seven biodiesels with different fatty acid compositions, with a biodiesel that has a normal fatty acid composition. The latter was our benchmark in terms of emissions. The variation of the injection pressure can also improve the quality of the emissions. Three pressure variations were made to see the effects on the emissions of our different biodiesels. We are therefore going to assess the effects of pressure on our various biodiesels, which all have different acid compositions. Our biodiesels are tested with a four-stroke single-cylinder direct-injection engine, with an electrical outlet power variations from 0 A to 16.65 A. As the load increases, the emissions also increase, so it becomes important to find a way to decrease the effect of emissions at high loads. Experiments show that the injection pressure has an influence on the emissions of different biodiesels when the load is considered, the higher pressure of 22.50 MPa has been found to have the best result in terms of emission. The fatty acid composition also plays an important role because among the seven biodiesels compounds, there were three that almost met emission expectations which were to be lower than the emissions of the benchmark biodiesel. Apart from NO emissions, we also experimented with NO₂ and PM emissions at a pressure of 22.50 MPa. The PM and NO₂ and NO results for the seven compound biodiesels were more or less around the benchmark biodiesel emissions, there were three that were almost always lower than the benchmark biodiesel emissions. This implies that the fatty acid composition also plays an important role as much as the pressure and the load.

1 Introduction

Le biodiesel est un carburant alternatif renouvelable d'origine domestique pour les transports depuis 1992. Dans le but d'avoir un système écologique moins affecté par les émissions du carburant dans la nature, certains pays d'Europe à cette époque consacraient déjà une partie de leurs terres agricoles pour la culture des graines oléagineuses (colza, tournesol, soja...). Ces graines sont utilisées pour la production d'huiles qui servent à la fabrication du biodiesel (Gohin, 2013). La production du biodiesel ne se limite pas seulement à ces graines, nous avons aussi la production par la transformation de la lignocellulose contenue dans les résidus agricoles (paille) et forestiers (bois), ou dans des plantes ainsi que la production par des microalgues (Rodriguez De Rodriguez, 2014).

En outre, au-delà de ses avantages écologiques, Le biodiesel brûle de la même manière que le diesel pétrolier en ce qui concerne les polluants réglementés, il est l'un de ces carburants pour les moteurs à allumage par compression qui présentent un grand potentiel (Demirbas, 2007).

L'un des principaux problèmes liés au biodiesel est la source de matière première. C'est pour cela que certaines études ont été faites afin de trouver une source de matière première durable pour la fabrication permanente de celui-ci dans des meilleures conditions et aussi de pouvoir déterminer plusieurs paramètres pouvant concourir à l'obtention d'un bon carburant (Rodriguez De Rodriguez, 2014).

De plus, certaines expériences sont faites pour améliorer la qualité des émissions du biodiesel. Notamment, on a la pression qui peut jouer un rôle important dans la réduction des émissions. La variation de la pression d'injection sur les mélanges de biodiesel et diesel conduit à une amélioration des émissions (Fetni, s. d.), la pression d'injection régule la pénétration du jet de carburant et améliore l'atomisation, plus elle est grande plus on a une vaporisation rapide en fine gouttelette ce qui va améliorer le mélange air carburant (Mohan, Yang, & Chou, 2013). C'est en outre le cas de ce mémoire où on se pose la question de savoir si les émissions du biodiesel sont en rapport avec sa composition en acide gras et la variation de pression d'injection. Nous allons essayer de répondre à cette question tout au long de ce mémoire. Étant donné que l'introduction constitue la première partie de ce mémoire, l'objectif de la deuxième partie consiste à démontrer la

nécessité de la réduction des émissions. La comparaison du biodiesel et du diesel sera faite dans la troisième partie. La question de recherche sera expliquée en détail dans la quatrième partie. Les matériaux utilisés pour faire les différentes expériences ainsi que les méthodes appliquées seront présentés dans la cinquième partie. Les calculs d'hypothèses suivies des différentes interprétations constitueront les principaux thèmes de la sixième partie. La septième partie sera constituée de la discussion des résultats. Et enfin la huitième partie sera pour la conclusion.

2 Réduction des émissions de gaz

L'urbanisation, la mondialisation de l'activité économique et l'intensification des échanges sont en perpétuelle croissance. Celles-ci s'accompagnent des problèmes liés au transport. Il y a de plus en plus de véhicules, avions, bateaux etc. Ce qui implique la hausse de la consommation du carburant (« Les énergies renouvelables en France en 2020—Suivi de la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables », 2020), signifie par ricochet l'augmentation du niveau de pollution. Les composés de la pollution comportent des substances nocives pour les animaux, les plantes, l'air et l'homme. Parmi ces composés, on a entre autres le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, l'ozone, le dioxyde de carbone les oxydes sulfureux les particules PM et certains composés organiques.

2.1 Pourquoi réduire les émissions de gaz

La pollution de l'air est due au refoulement des émissions de gaz et d'autres produits chimiques dans l'atmosphère. D'après une étude pas moins de 48000 Français meurent de la pollution par an ce qui correspond à 9% du taux de mortalité. Les conséquences de la pollution sont nombreuses, notamment les maladies cardiovasculaires, les maladies respiratoires aiguës et chroniques, des problèmes neurologiques, ou des accidents vasculaires cérébraux (Brun, Caillaud, Charpin, & Dalphin, 2019).

Elle affecte aussi :

- Les plantes qui purifient l'atmosphère en absorbant le gaz carbonique CO₂ rejeté dans la nature et en refoulant l'oxygène. Lorsque ces plantes sont étouffées par des polluants, cela remet en cause leur capacité de purification. En outre, lorsque celles-ci sont inondées de polluants, elles deviennent dangereuses pour les animaux et les Hommes qui les consomment (Chenot & Schwartz, 2021).
- Les personnes âgées, les enfants, les personnes ayant des maladies respiratoires comme les personnes immunodéprimées, les personnes souffrant d'affections neurologiques ou à risque cardiaque, respiratoire, ainsi que les personnes infectieuses sont les plus sensibles (Boczkowski & Lanone, 2019).

- Le climat, l'atmosphère et la couche d'ozone (Mostert, Caris, & Limbourg, 2017).

2.2 Comment réduire les émissions de gaz

Face à tous les désavantages que procure l'utilisation de ce carburant, la question était de savoir comment abolir les effets néfastes de celui-ci ou alors comment réduire ses dégâts. C'est ainsi que l'utilisation du biodiesel est survenue depuis les années 1992 pour pallier à ce problème.

Le biodiesel est un carburant fabriqué à partir de la biomasse. La biomasse désigne la masse organique vivante, animale et végétale, qui peut servir de source d'énergie.

On a par exemple (Mofijur, M., Siddiki, S. Y. A., Ahmed, M. B., Djavanroodi, F., Fattah, I. R., Ong, H. C., ... & Mahlia, T. M. I., (2020))

- Des microalgues
- Des huiles végétales (soja, noix de coco, colza, tournesol, palme, canola, caméline, lin, médicinier, mahua, etc.)
- Des graisses animales

Le biodiesel peut être utilisé seul dans les moteurs récents. Cependant, le plus souvent on utilise un mélange de diesel et de biodiesel à base d'huile de colza à des proportions variant de 2% à 20% (Appavu, Madhavan, Venu, & Jayaraman, 2020).

Étant donné que le biodiesel est plus visqueux, on utilise des solvants ou encore du diesel pour diminuer sa viscosité pour qu'il s'écoule normalement dans le moteur (« Biodiesel—Low-tech Lab », s. d.). Une écriture est mise en place pour distinguer le biodiesel pur d'un biodiesel mixte, par exemple lorsqu'on voit B20 cela signifie qu'on a fait un mélange de 20% de biodiesel avec 80% de diesel, B10 signifie 10% de biodiesel et 90% de diesel et ainsi de suite.

3 Les grandes différences entre le biodiésel et le diesel

3.1 Les émissions

L'un des sujets les plus importants lorsqu'on évoque le biodiésel et le diesel c'est la capacité à réduire les substances nocives dérivant de l'échappement du moteur. Dans l'échappement se trouvent des gaz qu'on essaye de réduire pour avoir un rendu tolérable des gaz toxiques. Ces gaz sont notamment les particules de matières (PM), les oxydes d'azote (NO_x) comme le dioxyde d'azote (NO₂), ou le monoxyde d'azote (NO), monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂) qui est un gaz toxique en espace fermé mais pas dans l'atmosphère. En effet une très grande augmentation du CO₂ accroît l'effet de serre qui a un effet sur les variations du climat, les effets du CO₂ sont plus environnementaux que sanitaires à part dans les espaces confinés (Testud, 2010). On pourra donc étudier certains de ces différents gaz et les comparer par rapport aux deux carburants. On va utiliser l'ester méthylique d'huile de friture, le comparer avec le biodiesel mélangé à 25 et 50% (B25 et B50) et le diesel normal et voir le comportement des émissions en PM, NO_x et CO.

3.1.1 Les particules matières

Ce sont des composées carboniques généralement connus sous le nom de suie, elle est constituée de plusieurs composés notamment les composés organiques volatils ou COV et les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP ainsi que de l'ammonium et les acides chlorhydriques, nitrique, sulfurique, pollens, divers microorganismes, débris bactériens et de beaucoup de métaux (Riva et al., 2011).

Sur la figure 1 ci-dessous on a une vue générale sur le comportement des particules de matières PM du diesel, du biodiésel, du B25 et B50. On remarque que les particules PM du diesel sont largement supérieures à celles du biodiesel à pleine charge et les mélanges B25 et B50 sont inférieurs aux émissions du diesel à pleine charge mais supérieures aux émissions du biodiesel pur.

On peut constater que le mélange du biodiesel à 25 et 50% donne une possibilité de réductions des PM car il se rapproche légèrement du biodiesel pur. La particularité du

biodiésel résulte du fait qu'il est possible de faire le mélange avec le diesel normal. On peut voir qu'à 50% il y a moins d'émissions de particules PM alors qu'à 20 on est légèrement supérieure (Kezrane et al., 2016).

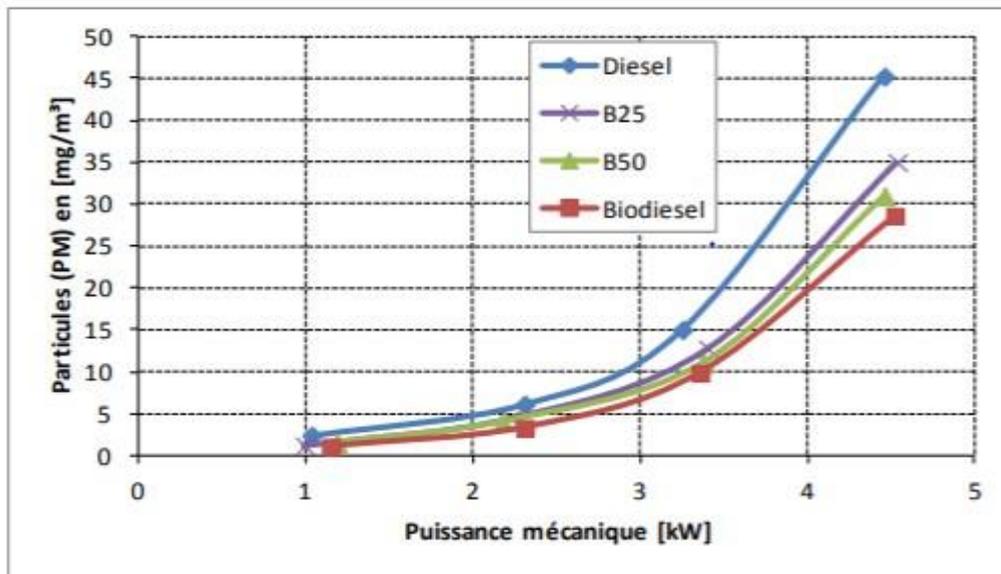


Figure 1 Concentration des hydrocarbures dans les gaz d'échappement

3.1.2 Les oxydes d'azotes

Ils peuvent être responsables de la détérioration des conditions respiratoires chez l'homme et une forte exposition peut aussi entraîner une irritation des yeux. Ces oxydes ont aussi des effets néfastes sur l'environnement notamment la formation des pluies acides, ce qui impacte les bâtiments, la végétation et l'écosystème (Caouette, 2010). Le taux d'émissions d'oxyde d'azote du diesel est inférieur à celui du biodiesel, il n'y a pas une si grande différence comme pour les particules PM (Figure 1). À petite charge la différence entre le biodiesel et le diesel se voit, on peut situer le diesel à presque 500 ppm et le biodiesel à 600 ppm (voir figure 2) ce qui fait déjà une différence de 100 ppm. Plus on augmente la charge plus la différence entre les deux carburants devient moins significative. Les biodiesels B25 et B50 se rapprochent de la courbe du diesel à faible charge comme à haute charge (Kezrane et al., 2016).

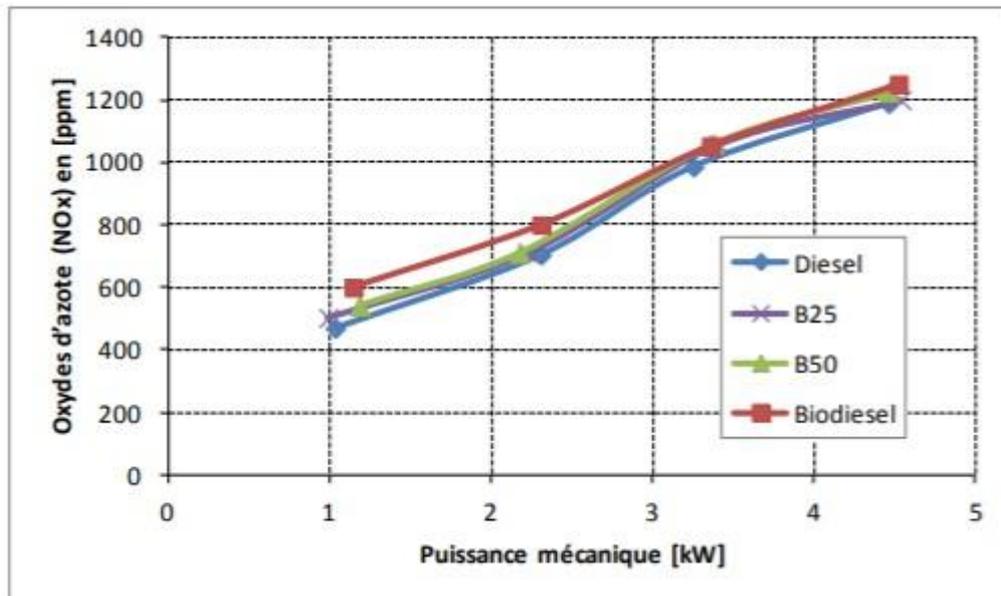


Figure 2 Concentration des particules d'azotes
Source : (Kezrane et al., 2016)

3.1.3 Monoxyde de carbone

De sa formule brute CO, il est un composé de carbone et d'oxygène. Dans les conditions normales de température et de pression, il est sous forme gazeuse. En effet c'est un gaz toxique provenant d'une combustion incomplète des carburants, bois, charbon, etc. (« Le monoxyde de carbone, ce tueur silencieux ! », s. d.). Le taux d'émission de CO du biodiesel et du diesel ainsi que des mixtes B25 et B50 sont sur la même trajectoire de 1 A à 2,3 A. À partir de 2,4 A la trajectoire des courbes change. À pleine charge, les courbes des émissions se distinguent des unes des autres. Le biodiesel donne des taux de CO visiblement inférieurs par rapport au diesel et aux mixtes. Cela peut être dû au contenu en oxygène à température plus élevée. Les émissions de CO du diesel à pleine charge du moteur sont de 1660 ppm, pour le biodiesel elles sont réduites de moitié (790) ppm. Une fois de plus on voit que les émissions du biodiesel sont mieux que celles du diesel normal car il émet largement moins à des charges élevées (Kezrane et al., 2016).

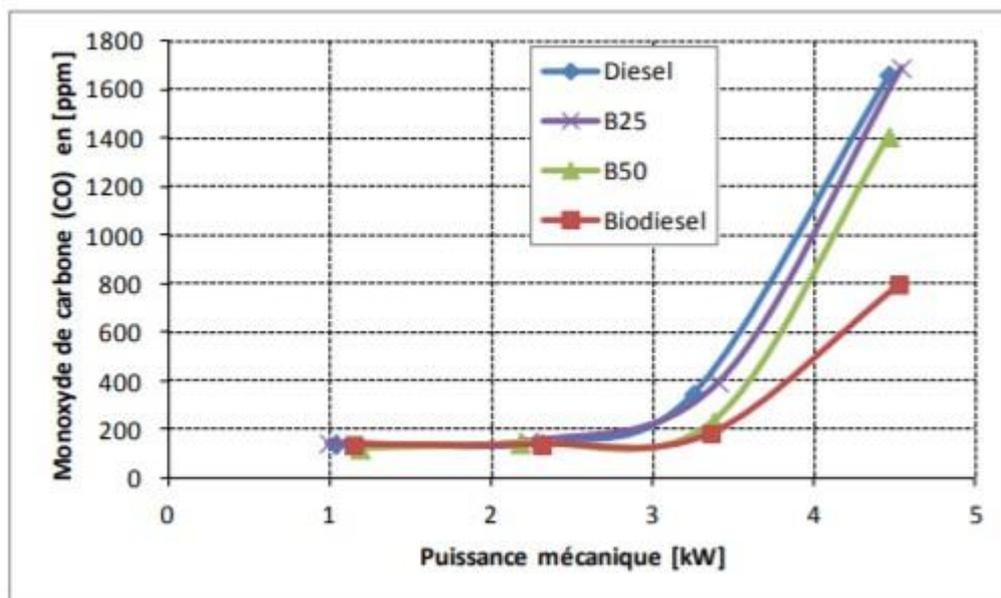


Figure 3 Concentration du monoxyde de carbone
 Source : (Kezrane et al., 2016)

3.2 Compositions chimiques du biodiésel et du diesel

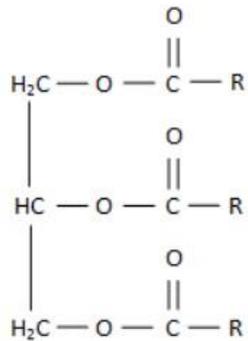
3.2.1 Biodiesel

Certains biodiésels sont faits à base d'huiles végétales, ils sont encore appelés esters méthyliques d'acides gras qui sont des dérivés triglycérides. Plusieurs procédés de production de carburant biodiesel ont été développés, parmi lesquels la transestérification. Ce procédé utilise la catalyse alcaline et donne des niveaux élevés de conversion des triglycérides en leurs esters méthyliques correspondants en des temps de réaction courts. Il a donc été largement utilisé pour la production de biodiesel dans un certain nombre de pays (Fukuda, Kondo, & Noda, 2001). En d'autres termes la transformation du biodiesel se fait aussi par le mélange d'huile et d'éthanol ou de méthanol avec un catalyseur. La fin de ce mélange nous donne du biodiesel et du glycérol (« Il. 1) La transformation chimique », s. d.).

Il faut aussi noter que le biodiesel de colza peut directement être utilisé dans les moteurs plus récents. Généralement, on le combine avec le diesel (« Les biocarburants à base de colza et de maïs | Agriculture du Maghreb », s. d.). Bien que n'ayant pas produit nous-mêmes le biodiesel dans le cadre de ce mémoire, nous jugeons tout de même opportun d'écrire l'équation qui a conduit à la production de

celui-ci. Étant donné qu'on a utilisé l'huile de colza pour notre biodiesel. La formule brute du trilinoléate de glycéryle de l'huile de colza est : $C_{57}H_{104}O_6$

La formule semi-développée est :



Avec :
R =

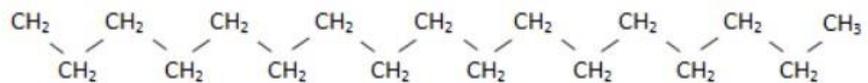


Figure 4 Molécule de trilinoléate de glycéryle (huile de colza)
Source : (« II. 1) La transformation chimique », s. d.)

L'éthanol a été utilisé dans cette formule pour servir d'exemple mais dans la plupart des cas on utilise le méthanol. Molécule d'éthanol Formule brute :



semi-développée :



Concernant la molécule de glycérol :

Formule brute :



Formule semi-développée

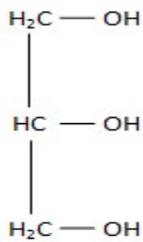


Figure 5 Formule semi-développée du glycérol

Source : (« II. 1) La transformation chimique », s. d.)

Pour la molécule de biodiesel :

Formule brute :



Formule semi-développée :

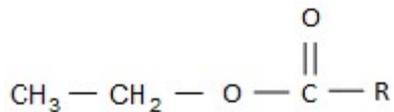
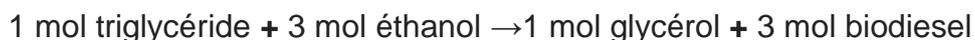


Figure 6 Formule semi-développée du biodiesel

Source : (« II. 1) La transformation chimique », s. d.)

Pour qu'une réaction comme celle-ci se produise, on a besoin d'un catalyseur. Un catalyseur est une espèce chimique qui permet d'augmenter la vitesse d'une réaction mais qui n'apparaît pas dans l'équation de cette réaction. Dans ce cas on a spécialement utilisé l'acide sulfurique car il empêche la formation des savons lors de la réaction. Les résidus huileux usagés et les graisses contiennent de grandes quantités d'acides gras libres. Celles-ci ne peuvent pas être converties en biodiesel à l'aide d'un catalyseur basique d'où l'utilisation des acides tels que l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique (« II. 1) La transformation chimique », s. d.)

D'après la figure 4 ci-dessous, on a une représentation claire de la formation du diesel et du glycérol. On obtient à la fin



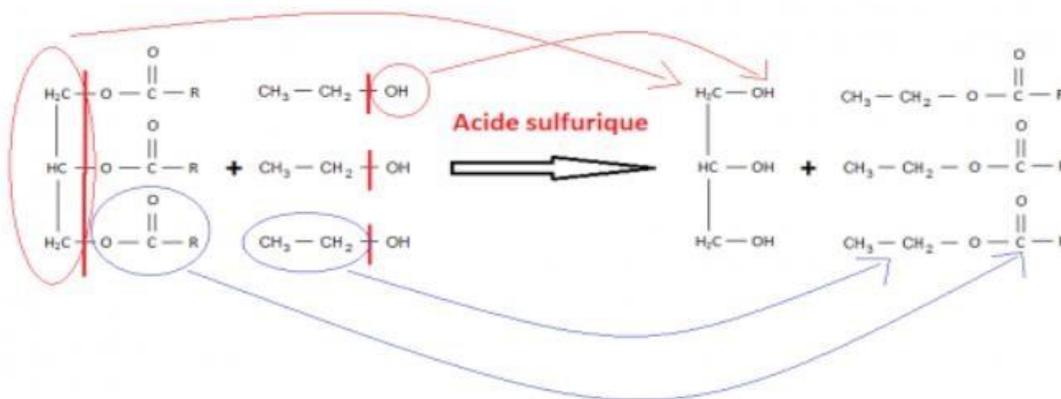


Figure 7 Composition du diesel
 Source : (« II. 1) La transformation chimique », s. d.)

3.2.2 Biodiésel et diesel

Le tableau 1 ci-dessous nous indique les différentes caractéristiques du biodiesel en comparaison avec le diesel et le pétrole renouvelable. Le biodiesel a des teneurs en carbone et en hydrogène inférieures à celles du diesel, la différence s'élève jusqu'à 10% pour le carbone. La densité du biodiesel étant plus élevée que celle du diesel, elle se situe entre 4 et 5 mm²/s comparé au diesel qui est de 2 à 3%. L'indice de cétane du biodiesel est relativement bon comparé à celui du diesel. Le poids moléculaire du biodiesel est un peu plus élevé que celui du diesel. L'indice de cétane est une caractéristique majeure pour le moteur diesel (Cuvelier, Cabaraux, Dufrasne, Hornick, & Istasse, 2004) où le diesel doit s'auto-enflammer avec le plus court délai après son injection dans un cylindre. L'indice de cétane du biodiesel est donc supérieur à celui du diesel pétrolier.

Tableau 1 Propriétés typiques du biodiesel par rapport au diesel pétrolier et au diesel renouvelable
 Source: (Hoekman, Broch, Robbins, Cenicerros, & Natarajan, 2012)

Propriétés	No.2 diesel pétrolier	Biodiesel	Diesel renouvelable
Carbone, wt. %	86.8	76.2	84.9
Hydrogène, wt. %	13.2	12.6	15.1
Oxygène, wt. %	0.0	11.2	0.0
Gravité spécifique,	0.85	0.88	0.78
Cétane no.	40-45	45-55	70-90
T ₉₀ , °C	300-330	330-360	290-300
Viscosité, mm ² /s. @ 40°C	2-3	4-5	3-4

3.3 Les acides gras

Un acide gras est une molécule formée d'une chaîne carbonique qui se termine par un groupe carboxylique (COOH). Il fait partie de la famille des lipides, il en est le constituant majeur (Cuvelier et al., 2004). Il existe deux types d'acides gras

- Les acides gras saturés : ce sont des acides en général mauvais pour la santé car il favorise la production du cholestérol qui est l'un des facteurs des maladies cardiovasculaires. On les retrouve généralement dans les matières grasses animales (fromage, beurre, crème fraîche) sauf le poisson et végétales (huiles de palme) et aussi dans les produits laitiers, produits laitiers gras, pâtisseries etc. (Legrand, 2010). La formule chimique générale des acides gras saturés est la suivante $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{COOH}$. Les acides gras saturés s'écrivent toujours de la manière suivante $\text{C}_x : 0$; le C désigne le carbone, le x désigne le nombre de carbones et le zéro désigne le nombre de double liaison carbone=carbone. Dans le cas d'un acide gras saturé il n'y a pas de doubles liaisons c'est pourquoi on aura toujours le zéro. La particularité de cet acide est qu'il est résistant à la température, plus la chaîne carbonique est longue plus la résistance à la température est grande. Mais les cinq premiers acides gras saturés ne se comportent pas comme des lipides car ils sont solubles dans l'eau ce n'est qu'à partir du 6^{ème} qu'on peut parler réellement d'acide gras saturé (Cuvelier et al., 2004).
- Les acides gras insaturés ce sont des acides pouvant avoir entre une et six doubles liaisons. Ils sont généralement classés comme bon pour la santé. La nomenclature de celle-ci est tout aussi simple que pour l'acide gras saturé mais à la seule différence que lorsqu'on a par exemple C16 2, cela veut dire qu'on a 16 atomes de carbone avec 2 doubles liaisons. On peut aller plus loin en précisant lequel des carbones a la double liaison par exemple pour le C18 2 (9,12), il possède ainsi 2 doubles liaisons, la première entre les carbones 9 et 10 et la deuxième entre les carbones 12 et 13. On distingue donc 2 types d'acides gras, les mono-insaturés et les poly-insaturé. Les acides gras mono-insaturés sont ceux qui possèdent leur double liaison en position 9 ils ont

aussi appelé l'oméga-9. De plus, la majorité des acides gras mono-insaturés qui ne possèdent pas leur double liaison en position 9 sont des constituants mineurs de la plupart des graisses dans lesquelles ils sont présents. On a par exemple le C16 :1 (9) appelé palmitoléique et aussi l'acide oléique C18 :1 (9) (Cuvelier et al., 2004). Le groupe d'acides gras oméga-6, notés également $\omega 6$ (ou encore n-6) sont des acides gras poly-insaturés que l'on trouve dans la plupart des huiles végétales, graines et les céréales. On les retrouve dans les œufs ou certaines viandes en quantités variables selon l'alimentation des animaux. Ils sont également présents dans le lait humain. Ils sont généralement appelés l'oméga-3 et l'oméga-6 car ils peuvent avoir jusqu'à six doubles liaisons. L'acide linoléique (C18 : 2 (9,12)) et l'acide α -linoléique (C18 :3 (9, 12,15)) sont les plus répandus et les plus importants. L'acide linoléique est très présent dans les graisses avec une teneur qui varie entre 40 et 58 % d'une huile à l'autre alors que L'acide α -linoléique est plus présent dans les huiles végétales fortement insaturées. Lorsque sa teneur atteint 35%, l'huile n'est plus considérée comme une huile comestible mais comme une huile accélérant le séchage des vernis et des peintures (Cuvelier et al., 2004).

4 Question de recherche

Depuis plusieurs années, la production du biodiesel a connu une énorme croissance parce qu'il est prouvé que ses critères environnementaux correspondent aux attentes sur l'environnement. Il est évident que de nombreuses méthodes de fabrication du biodiesel avec différents ingrédients existent de nos jours et aussi que la fabrication de celui-ci est non toxique et renouvelable. La réduction des émissions ne se fait pas seulement grâce au changement du diesel en biodiesel mais aussi grâce au changement qu'on peut effectuer sur le moteur afin d'avoir les résultats souhaités. On peut donc essayer de faire une variation de pression afin d'améliorer le mélange air carburant qui se trouve dans le moteur.

Dans le cas de notre expérience nous avons utilisé un biodiesel dérivé de l'huile de colza pour la réalisation de différents types de biodiesel avec des compositions en acide gras différentes les unes des autres. On a donc obtenu sept biodiesels de compositions en acides gras différentes et un biodiesel supplémentaire de référence avec une composition normale. Ces huit biodiesels seront testés à des pressions différentes ainsi qu'à des charges croissantes. Le test de ces différents biodiesels nous permettra d'avoir une idée sur la composition en acide gras la plus recommandée ainsi que sur la pression d'injection la plus appropriée pour le cadre de nos expériences. Il sera donc question pour nous de relever les valeurs des émissions en particules PM, NO et NO₂ au fur et à mesure qu'on changera de charge et ceci à une pression précise (22.50 MPa dans ce cas). Puis on devra changer la pression et voir le comportement des émissions en NO à différentes pressions. Pour le cadre de ce mémoire on s'est attardé sur la pression 2 avec les différentes émissions en PM, NO et NO₂ ainsi que sur l'étude des émissions en monoxyde d'azote NO à différentes pressions : $p_1 = 19,83 \text{ MPa}$; $p_2 = 22.50 \text{ MPa}$; $p_3 = 21.33 \text{ MPa}$.

Avec le matériel adéquat et pour la suite de ce mémoire, la question de base de nos expérimentations est la suivante : La pression d'injection a-t-elle une influence sur la composition en acides gras du biodiesel en fonction des concentrations en PM, NO et NO₂?

5 Matériaux et méthodologie

5.1 Les différents matériaux utilisés

5.1.1 Un appareil de mesure du NO et NO₂

Le taux des oxydes d'azote a été mesuré avec le détecteur de gaz pro Crowcon. C'est un appareil utile pour détecter différentes sortes de gaz comme l'O₂, le dioxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène, le dioxyde de chlore et le dioxyde de soufre. De sa petite taille, il peut être placé n'importe où. Cet appareil a été placé dans un tube, qui reflète la sortie d'une partie des gaz d'échappement, permettant de mesurer le NO et le NO₂.



Figure 8 Appareil de mesure du NO et NO₂

5.1.2 Appareil de mesure de particules PM

Le prélèvement des données des particules PM, a été fait avec Dust Trak DRX 8533. C'est un instrument portatif qui a plusieurs fonctions. Nous nous sommes limités à la fonction Contrôle des émissions dans le cadre de nos expérimentations.



Figure 9 Appareil de mesure de particules PM

5.1.3 Un capteur de température placé à la sortie de l'échappement

Il était important lors de notre expérimentation de connaître la température des gaz d'échappement. Car pour faire certains prélèvements il fallait atteindre une température stable. Dans notre cas on a utilisé comme appareil un VOLT CRAFT K101 Thermometer -200 up to +1370 °C Sensor type K de la marque Conrad.



Figure 10 Appareil de mesure de température d'échappement
 La fibre verte que l'on peut observer sur la figure 7 permet de la relier à la sortie des gaz d'échappement.

5.1.4 Le moteur diesel silencieux 6 kW HR192FB.

Pour faire notre expérience nous avons utilisé un moteur quatre temps avec les caractéristiques du tableau 2 ci-dessous. C'est la combinaison d'un moteur diesel avec un générateur électrique (souvent un alternateur) pour générer de l'énergie électrique.

Tableau 2 Informations du moteur
 Source : (« [Hot Item] 6kw Red Color Silent Diesel Generator Set (DG8500SE) », s. d.)

N ° de modèle	HR192FB
Méthode d'installation	Portable
Coup	Quatre temps
Type de moteur	Moteur diesel monocylindre, vertical, 4 temps refroidi par air
Alésage x course (mm)	92 x 75
Volume d'huile de lubrification (l)	1.65
Système de combustion	Injection directe

5.1.5 Prise électrique

On y a collecté la charge à diviser pour notre consommateur électrique. Pour chaque carburant nous avons fait un cycle de consommation, nous avons fait une augmentation en six étapes. Par étape, nous avons pris trois mesures pour PM, NO et NO₂. Nous avons attendu que la température d'échappement soit stable avant de commencer à prendre des mesures. La mesure des particules de matières a pris 60 secondes à partir de zéro, nous avons trouvé trois mesures dans ces 60 secondes. Nous avons attendu que la température soit stable avant d'effectuer d'autres mesures. Ensuite, nous avons commencé la prise de la prochaine mesure.



Figure 11 Prise électrique

5.1.6 Les acides gras

Dans notre expérience, on a utilisé un mélange des esters méthyliques provenant de l'huile de colza (rapeseed methyl esters ou RME), néanmoins la transformation de cette huile en biodiésel n'a pas été faite par nous-mêmes. Les différentes sortes de biodiesel étaient déjà disponibles et numérotés de A (RME, biodiesel de référence) et de B à H auxquels différents pourcentages d'acides gras ont été ajoutés (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'acide gras C18 :1 qui est un acide insaturé a le plus grand pourcentage dans la composition des biodiesels.

La figure 10 présente la composition du biodiesel à base de l'huile de colza. Ces caractéristiques correspondent à une composition normale à base d'acide gras, ce qui correspond presque à la composition de notre biodiesel A sans l'acide gras C20:1.

Tableau 3 Composition des différents biodiesels en acide gras, utilisés dans les expériences.

	Acides gras				
	Palmitique	Stéarique	Oléique	Linoléique	Linoléique
biodiesel	C160	C180	C181	C182	C183
A	4,12	0,87	65,98	19,89	9,14
B	4,10	0,93	65,79	19,95	9,23
C	4,09	0,91	66,11	19,76	9,13
D	4,14	0,80	66,82	19,42	8,82
E	4,07	0,84	66,48	19,60	9,01
F	4,06	1,00	66,89	19,28	8,78
G	4,24	0,85	65,95	19,84	9,11
H	4,05	0,92	66,04	19,87	9,13

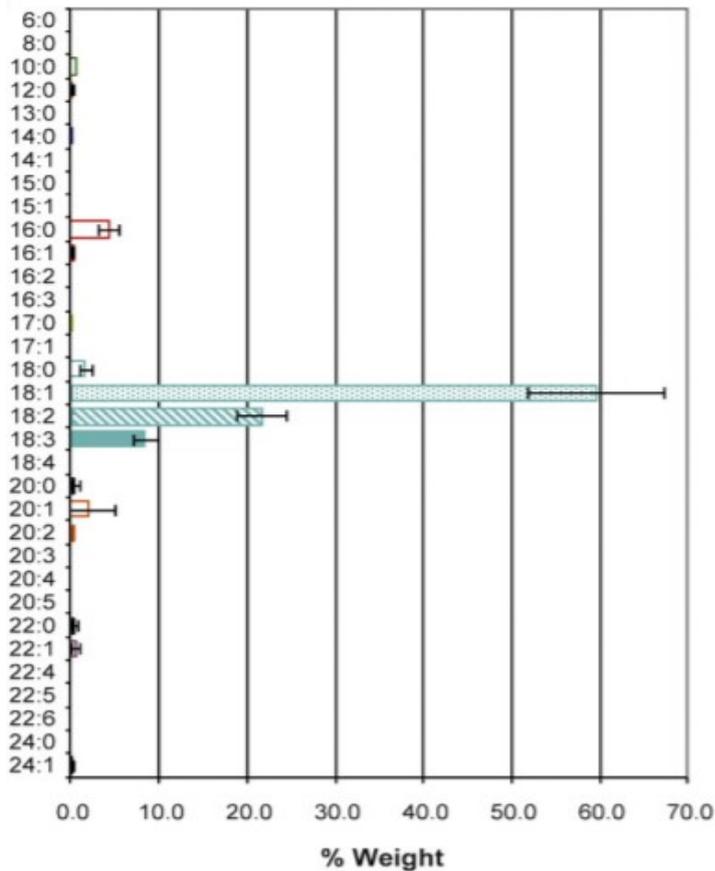


Figure 12 Composition d'une huile de colza typique
 Source : (Hoekman et al., 2012)

5.2 Principe de l'expérience

5.2.1 Définition du Principe de l'expérience

L'expérience se concentre principalement sur la pression d'injection du biodiesel en fonction de la composition des acides gras de celui-ci. Nous avons eu recours à huit biodiesels ayant des compositions en acides gras toutes différentes, mesurées en pourcentage. Les acides gras utilisés dans cette expérience sont le palmitique (C160), le stéarique (C180), l'oléique (C181), linoléique (C182), linoléinique (C183). Nos biodiesels énumérés de A à H seront consommés par notre moteur et pendant le temps de consommation, des mesures de NO, PM et NO₂ seront prises. Nous avons fait nos essais sur la base des trois pressions présentées dans le Tableau 4, nous avons évalué les émissions de NO des trois pressions. Nous avons testé la pression trois fois à l'aide d'un appareil pour chaque injecteur. Cela nous a permis de calculer nos trois pressions plus exactement. Ce calcul nous permettra de voir le

comportement du biodiesel sous différentes pressions. Nous nous concentrerons aussi plus précisément sur la pression 2 et nous essayerons de déterminer les émissions de NO, PM et NO₂ qui en découle en prenant pour référence le biodiesel A qui est sans acide gras ajouté.

Pour notre cycle, nous avons utilisé une augmentation de la consommation de courant (I en ampère (A)) ce qui a résulté à une augmentation de la consommation d'énergie en kilowatt (kW). Nous avons augmenté la consommation d'énergie en allumant des radiateurs électriques. Notre première étape est 0 A et donc 0 Watt ce qui signifie qu'on n'a pas de consommateurs à ce moment puis on augmentera la consommation au fur et à mesure, nous ferons cela en six étapes jusqu'à ce que nous atteignons notre maximum (consommation de courant / puissance consommée) pour chaque carburant.

Par étape individuelle, nous prenons trois types de mesures, une mesure PM, une mesure NO et une mesure NO₂. Il faut noter que pour chaque mesure de PM, NO et NO₂, trois prélèvements de valeurs sont faits et ensuite la moyenne de ces trois prélèvements est calculée. Le résultat de cette moyenne sera donc notre valeur pour cette étape. Ensuite, des tests d'hypothèses pour la pression 2 seront effectués en regardant les émissions en PM, NO et NO₂ qui s'y produisent pour les deux meilleurs carburants qu'on obtiendra. Par après, Il faudra vérifier avec des hypothèses s'il y a une différence significative dans les émissions de NO lorsqu'on augmente la pression d'injection, et dans quelle mesure les acides gras jouent un rôle.

5.2.2 Contrôle changement pression d'injection

Pour commencer, nous avons laissé le générateur refroidir, ensuite nous avons démonté l'injecteur tout en se rassurant qu'on a utilisé les bonnes clés (clés 10 & 17). Nous avons serré doucement l'injecteur dans un étau et nous avons tourné la partie supérieure de celui-ci avec une clé à douille (S15), tout en veillant à ce que les deux parties ne s'écartent pas l'une de l'autre à cause du ressort interne. La pièce qui a encore été serrée dans l'étau contient le shim qui doit être remplacé pour une autre pression d'injection. Nous avons remis l'injecteur en place comme auparavant et nous l'avons resserré à l'aide d'une clé à douille. Nous avons remis l'injecteur dans le moteur et avons serré l'injecteur pour connecter la conduite de carburant, mais nous

ne l'avons pas encore serré complètement. Par la suite, Nous avons purgé la conduite de carburant en tournant vers l'extrême droite l'interrupteur à came situé à l'avant du générateur et en poussant le levier rouge, Jusqu'à ce que le carburant se disperse par la connexion entre la conduite de carburant et l'injecteur. Ce levier garantit qu'aucune compression n'a lieu. Nous nous assurons de serrer la conduite de carburant. Nous avons par la suite démarré la porte du moteur en tournant l'interrupteur de la came vers l'extrême droite. Lorsque nous ne pouvions pas démarrer le moteur, nous avons appuyé tout simplement sur le levier rouge en tournant vers la droite. Nous avons maintenu pour un certain temps l'interrupteur enfoncé et relâché le levier. Dans le Tableau 4 ci-dessous, les différentes pressions d'injection sont représentées en couleur jaune. On a fait trois tests pour chaque pression et on a fait la moyenne pour obtenir la valeur en jaune puis l'écart type.

Tableau 4 *Pression d'injection du biodiesel*

	p1	p2	p3
	19,5	22,5	21,5
	20	22	21
	20	23	21,5
	19,83	22,50	21,33
	0,24	0,41	0,24

5.2.3 Contrôle de préparations

Nous nous sommes assurés que tous les consommateurs soient éteints (en position haute) et l'avons connecté à la boîte de jonction (elle doit être branchée au générateur). Nous nous sommes ensuite rassurés que le collecteur de biocarburant soit propre avant de le remplir de biodiesel, de plus nous nous sommes aussi rassurés que la conduite de carburant soit connectée. Il a été aussi important de vérifier que le refroidisseur d'échantillons et le compresseur soient sous tension et fonctionnent. Puis nous avons calibré les deux appareils de mesure comme suit

- a. Nous avons placé le compteur de NO_x à l'extérieur et nous avons appuyé sur le bouton de démarrage
- b. Nous avons calibré les particules en suivant les étapes suivantes

i. Nous avons effectué une configuration de la sous-mappe ii.
Nous avons connecté le tube de calibrage iii. En haut à gauche,
nous avons sélectionné zéro cal et avons confirmé iv. L'appareil de
mesure est donc calibré pour un processus d'une minute

Nous avons branché les appareils de mesure comme suit

- Mesureur de NOX de la marque Crowcon dans la balance à la fin de l'unité d'échantillonnage.
- Compteur PM de la marque dusttrak drx 8533 par tube sur l'unité d'échantillonnage
- Thermomètre dans le trou du collecteur d'échappement et prélèvement d'échantillons de la marque Conrad
- Nous avons raccordé l'unité d'échantillonnage complète au collecteur d'échappement

Pour éviter tout risque de suffocation, nous nous sommes assurés que le collecteur d'échappement se déverse sur un environnement extérieur.

5.2.4 Contrôle du démarrage du générateur

Le carburant est fourni au générateur par une vanne à trois voies, un choix a été fait entre le biocarburant et le MDO. Le démarrage s'est toujours fait avec le diesel marin MDO, une fois que le moteur s'est mis en marche, nous sommes passés au biocarburant. Avant de passer au biocarburant, nous nous sommes assurés que toutes les valves soient alignées et que le collecteur de biocarburant soit rempli. Au total, nous avons eu à faire sept parcours avec un biocarburant particulier, allant de l'absence de consommateurs à la consommation maximale. Notre processus après le passage aux biocarburants a été le suivant : nous avons attendu que la température soit constante question de s'assurer que l'injecteur n'atomise que le biocarburant, il a été préférable d'attendre au moins dix minutes lors du premier passage d'un nouveau carburant. Une fois que la température a été constante, nous avons commencé à mesurer comme suit nous avons enregistré la température ensuite nous avons commencé par la mesure des particules de matières (PM) ; cela nous a pris une minute. Pendant cette minute, nous avons mesuré trois fois la valeur de NOx à la fois

pour le NO et le NO₂, puis nous avons noté la valeur PM. Ensuite, nous avons allumé les consommateurs, il était toujours important d'attendre que la température soit constante (10 minutes en moyenne) avant de commencer la prise de mesure. Par ailleurs, nous avons surveillé de près le niveau du collecteur de biocarburant tout au long du processus pour éviter que l'air ne pénètre dans les canalisations.

5.2.5 Contrôle sur les biocarburants

Le contrôle du biocarburant a été essentiel pour le bon déroulement de notre expérience. Premièrement, nous avons tourné la vanne à trois voies sur diesel marin (MDO) et avons réduit la puissance à aucun consommateur. Puis nous avons ouvert la vanne au bas du collecteur de biocarburant et avons débranché la conduite. Nous nous sommes rassurés que ce tuyau reste plus haut que la vanne à trois voies pour éviter toute fuite. Nous avons par la suite pris un réservoir contenant des résidus et avons retiré l'excédent de biocarburant du collecteur. Nous avons ensuite bien nettoyé le collecteur avec du sopalin pour éliminer tous les résidus du carburant précédent. Après cela nous avons rempli le collecteur avec le biocarburant suivant et avons raccordé la ligne. Enfin nous avons ouvert la vanne au fond du collecteur et avons changé la vanne à trois voies vers le biocarburant.

5.3 Analyse statistique

5.3.1 Tests de Student

Il faut tout d'abord savoir que les tests par hypothèses sont des moyens de prises de décision en utilisant des données mesurées. En outre, on fait des hypothèses entre deux valeurs et en fonction des calculs d'hypothèses qu'on fera, on décidera si on accepte ou si on rejette notre hypothèse. Pour commencer, on a notre hypothèse nulle qui est H_0 , c'est une hypothèse que nous considérons vraie et nous avons une hypothèse alternative H_1 qu'on prendra en compte si l'hypothèse H_0 est rejetée. Ensuite nous devons établir des critères pour pouvoir affirmer que notre hypothèse nulle est vraie ou fausse. Par après, il suffira de détenir un échantillon. Pour faire nos

calculs d'hypothèses on utilisera l'écart type de l'échantillon, les moyennes et le nombre de fois qu'on a fait des tests d'échantillons. La formule de ce calcul est :

$$t_{crit} = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

avec t_{crit} = la valeur critique qui aide à décider, $x_{1,2}$ = moyennes des séries de données 1 ou 2, $s_{1,2}$ = les écarts des séries de données 1 ou 2, $n_{1,2}$ = le nombre de mesuréments de données 1 ou 2.

Après ceci il nous suffira d'utiliser la fonction

« LOI.STUDENT.INVERSE.BILATEALE » qui est une fonction Excel qui est utilisée comme statistiques pour des hypothèses avec pour région de rejet $]-\alpha ; +\alpha[$. On peut donc faire d'autres tests sur cette base pour vérifier la validité des hypothèses, pour cela on va utiliser la valeur $\alpha = 0.05$ qui désigne la valeur de risque pour laquelle l'hypothèse nulle est vraie ou fausse.

5.3.2 Analyse de variance

Une analyse de variance (Angl. analysis of variance, ANOVA) est une analyse statistique qui sert à évaluer les effets similaires ou différentiels sur des contextes précis pour une population donnée. « Les ANOVA sont généralement effectuées à l'aide de statistiques fréquentielles, où les valeurs p décident de la signification statistique de manière tout ou rien si $p < 0,05$, le résultat est jugé statistiquement significatif et l'hypothèse nulle est rejetée ; si $p > 0,05$, le résultat est jugé statistiquement non significatif, et l'hypothèse nulle est retenue. » (Bergh et al., 2020). Ce programme va donc nous aider à mieux interpréter les résultats que nous allons obtenir.

Les analyses de variance ont été faites avec le script ci-dessous écrit en R, un langage de programmation et un logiciel libre destiné aux statistiques. La version utilisée est R 3.6.3., implémentée dans RStudio "Orange Blossom".

Ce script contient l'ensemble des modèles que nous allons mettre en place afin de faire nos différents calculs.

```

library(devtools)
library(dplyr) library(readxl)
library(tidyverse)
library(rgl)
biopres <- read_excel("biodieselpressionNO.xlsx",
sheet = "R") attach(biopres) View(biopres)
set.seed(1234)
dplyrsample_n(biopres, 10)

res <- model.matrix(~biodiesel, data = biopres) head(res[,
-1])

modell1 <- lm(NO ~ pression, data = biopres) model2 <-
lm(NO ~ pression + biodiesel, data = biopres) model3 <-
lm(NO ~ pression + load, data = biopres)
modell4 <- lm(NO ~ pression + biodiesel + load, data = biopres)

summary(modell1)
summary(modell2)
summary(modell3)
summary(modell4)

anova(modell2, modell1)
anova(modell3, modell1)
anova(modell4, modell1)
anova(modell4, modell3)

```

6 Résultats à une pression constante de 22,50 MPa

6.1 Résultats à une pression constante de 22.50 MPa

6.1.1 Émissions en NO

Si on compare l'effet de la composition des biodiésels, il devient clair que les émissions pour les mélanges C, E, F et H sont en dessous de la courbe du biodiesel A qui est notre biodiesel de référence au fur et à mesure qu'on augmente la charge. À 16,65 A, on a le classement A C E F H qui va du plus émetteur en NO au moins émetteur. Mais à l'inverse au départ on a le biodiesel A et C qui sont les moins émetteurs jusqu'à la charge de 4,75 A à peu près pour le biodiesel C et de 7 A pour le biodiesel A. De 7 A jusqu'à 16,65 A, les émissions en NO du biodiesel A augmentent considérablement. Le biodiesel C suit presque le même parcours que le A de 4,75 A jusqu'à 16,65 A. On peut remarquer pour les autres biodiesels qu'ils commencent presque au même point lorsqu'on est à zéro sauf le biodiesel H qui est à 2 mg/m³ comparé aux autres qui sont à 3 mg/m³. Le biodiesel H vient donc 3^{ème} en termes d'émissions à petite charge après le C et A. On peut aussi constater qu'en termes d'émissions les biodiésels D et B sont les pires.

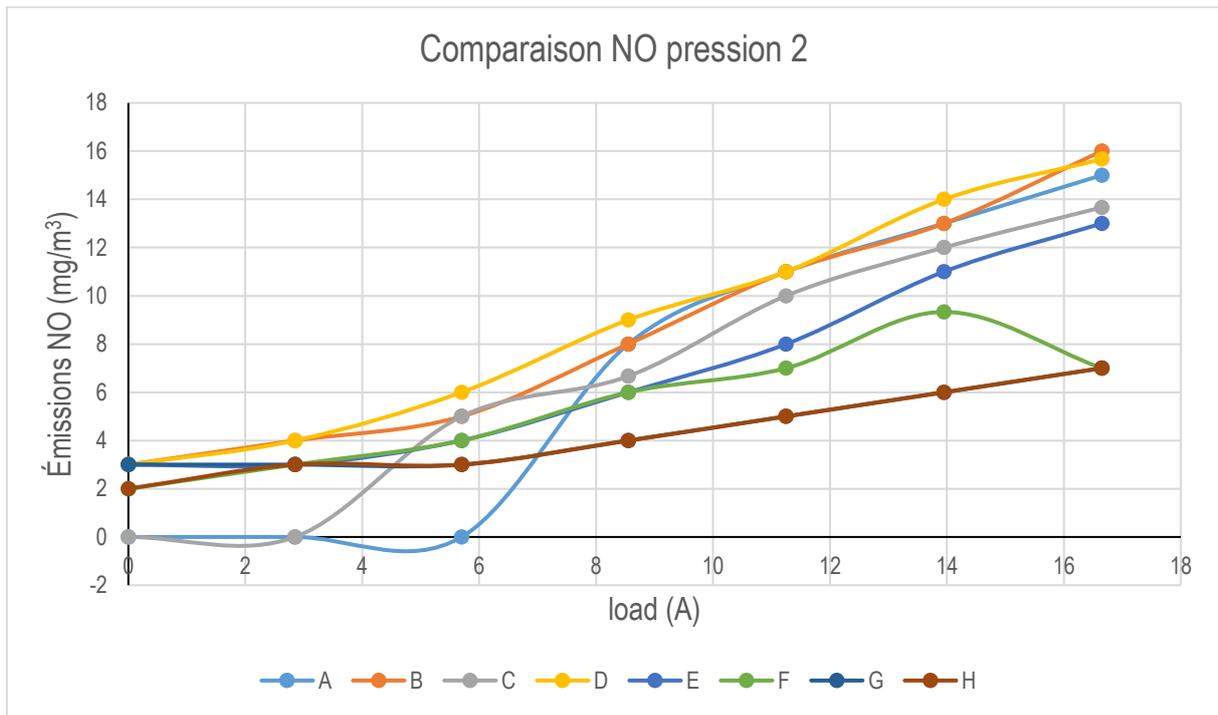


Figure 13 Émissions de NO pour les différents types de biodiesel, injectés à une pression de 22,5 MPa, selon le niveau de la charge appliquée

Tableau 5 Moyenne des biodiesels des émissions en NO en mg/m³
Valeurs données comme moyenne de trois mesures (n = 3) ± déviation (SD).

Charge (A)	0	2,85	5,7	8,55	11,25	13,95	16,65	T-TEST	
A	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	8 ± 0	11 ± 0	13 ± 0 ± 0	15 ± 1		
B	3 ± 0	4 ± 0	5 ± 0	8 ± 0	11 ± 0	13 ± 0	16 ± 0	1,73	
C	0 ± 0	0 ± 0	5 ± 0	6,7 ± 0	10 ± 0	12 ± 0	13,7 ± 0,6	-2	
D	3 ± 0	4 ± 0	6 ± 0	9 ± 0	11 ± 0	14 ± 0	15,7±0.6	1,15	
E	3 ± 0	3 ± 0	4 ± 0	6 ± 0	8 ± 0	11 ± 0	13 ± 0	-3,46	
F	2 ± 0	3 ± 0	4 ± 0	6 ± 0	7 ± 0	9,3 ± 0	7 ± 0	-13,86	*
G	3 ± 0	3 ± 0	3 ± 0	4 ± 0	5 ± 0	6 ± 0	7 ± 0	-13,86	***
H	2 ± 0	3 ± 0	3 ± 0	4 ± 0	5 ± 0	6 ± 0	7 ± 0	-13,86	***

Tableau 6 Liste des valeurs critiques de la statistique t à différentes valeurs d'alpha

*	0,05	2,776445
**	0,01	4,604095
***	0,005	5,597568
****	0,0001	15,5441

Dans le Tableau 5, on a la représentation des moyennes de chaque biodiesel. En effet c'est un tableau qui regroupe plusieurs autres tableaux. Sur la verticale, on peut voir nos biodiesels de A à H et sur l'horizontale on peut voir notre augmentation en charge. Pour chaque augmentation de charge lors des tests nous avons pris les mesures trois fois. Ce qui veut dire qu'à zéro la mesure de NO a été prise trois fois, lorsqu'on est passé à 2.85 A la mesure des émissions en NO a également été prise trois fois et ainsi de suite. La moyenne de ces trois mesures est ensuite calculée pour déterminer la moyenne en NO pour chaque augmentation de charge. Cependant, à la fin du tableau à droite, on remarque qu'il y a une colonne surnommée T-TEST, en effet il s'agit à ce niveau des calculs concernant nos tests d'hypothèses. Pour chaque biodiesel on a fait le T-TEST avec pour référence notre biodiesel A qui contient la composition en acide gras de référence.

Dans le Tableau 6, on a notre référence ou encore une interprétation des résultats du T-TEST. Nous avons fondé deux hypothèses, l'hypothèse nulle H_0 qui dit qu'il n'y a pas de différence en émission entre le biodiesel A et le biodiesel B (ceci est valable pour les biodiesels B à H) et l'hypothèse alternative H_1 il y a une différence d'émission entre les deux. Les étoiles mises sont en fonction de l'intervalle dans lequel on se trouve. Ici le signe positif ou négatif n'a pas d'importance, les chiffres seuls sont considérés. Par conséquent, l'étoile du Tableau 5 signifie tout simplement que l'hypothèse H_0 est rejetée et qu'on accepte l'hypothèse H_1 . Le tableau 6 sert toujours de référence

6.1.2 Émissions en NO₂

La Figure 14 nous montre la courbe d'émission en NO₂ des différents biodiesels que nous avons eu à expérimenter. Les courbes descendent lorsque les charges montent (à partir de 6-8 A) au lieu de monter comme avec le NO. On peut voir que les émissions en NO₂ des biodiesels G ($p < 0.01$), F et H ($p < 0.005$) sont les plus intéressantes car elles sont en dessous de la courbe des émissions du biodiesel A. Notamment, à charge basse de 0 A à 3,25 A à peu près. Il y a donc lieu de constater que les biodiesels H et F sont les plus adaptés et commencent sur le même point. Toutefois, à plus de 3,25 A, le biodiesel G devient moins émetteur que le F. À charge plus haute, les biodiesels H, G et F restent aussi bons en termes d'émissions. En

regardant le biodiesel F on remarque qu'il y a beaucoup de changements mais au moins il reste en dessous de la courbe A. Les biodiesels B ($p < 0.005$) et D ($p < 0.01$) sont moins recommandables en termes d'émissions.

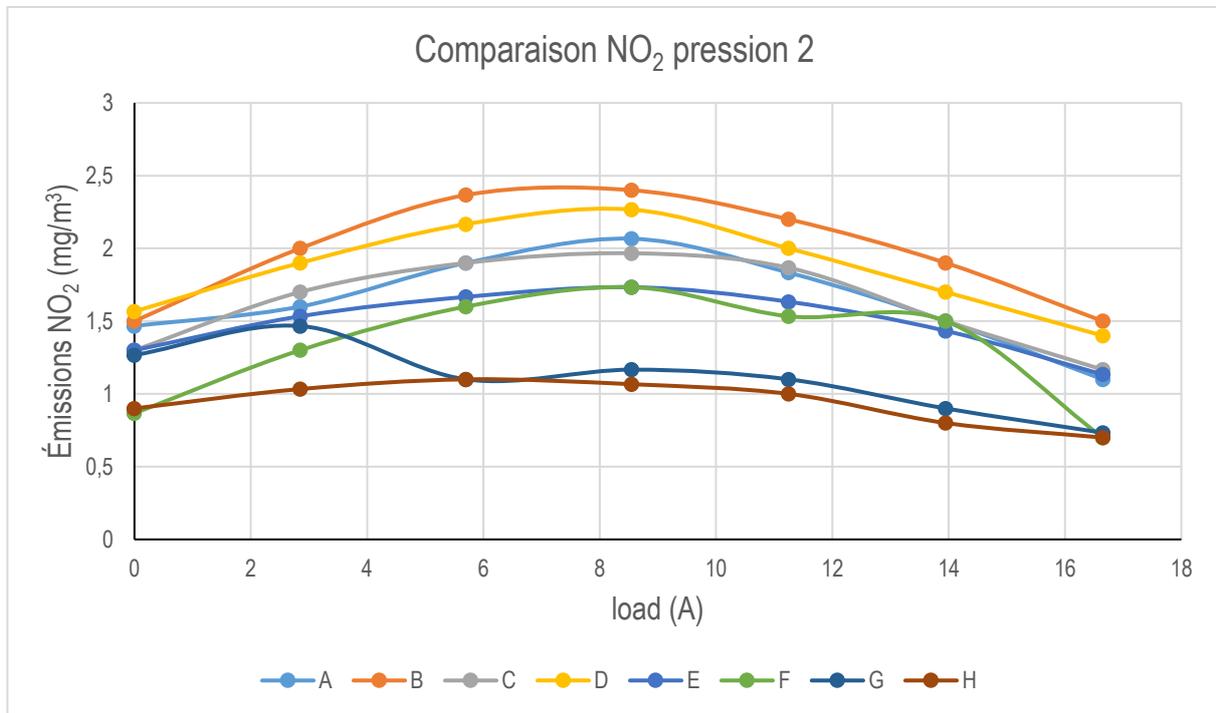


Figure 14 Graphique des émissions en NO₂, injectés à une pression de 22,5 MPa,

Tableau 7 Moyenne des biodiesels des émissions en NO en mg/m³
Valeurs données comme moyenne de trois mesurmen st ($n = 3$) \pm déviation (SD).

	MOYENNES							T-TEST	
	0	2,85	5,7	8,55	11,25	13,95	16,65	16.65	
A	1,5 \pm 0	1,6 \pm 0	1,9 \pm 0	2,1 \pm 0.6	1,8 \pm 0	1,5 \pm 0	1,1 \pm 0		
B	1,5 \pm 0	2 \pm 0	2,4 \pm 0.3	2,4 \pm 0	2,2 \pm 0	1,9 \pm 0	1,5 \pm 0	6.93	***
C	1,3 \pm 0	1,7 \pm 0	1,9 \pm 0	1,97 \pm 0	1,9 \pm 0.8	1,5 \pm 0	1,2 \pm 0.1	1	
D	1,6 \pm 0.5	1,9 \pm 0	2,2 \pm 0.1	2,3 \pm 0.2	2 \pm 0	1,7 \pm 0	1,4 \pm 0	5.2	**
E	1,3 \pm 0	1,5 \pm 0	1,7 \pm 0.6	1,7 \pm 0	1,6 \pm 0	1,4 \pm 0	1,1 \pm 0	0.5	
F	0,9 \pm 0.9	1,3 \pm 0	1,6 \pm 0	1,7 \pm 0	1,5 \pm 0	1,5 \pm 0	0,7 \pm 0	-6.93	***
G	1,3 \pm 0.2	1,5 \pm 0.4	1,1 \pm 0	1,2 \pm 0.1	1,1 \pm 0	0,9 \pm 0	0,7 \pm 0	-5.5	**
H	0,9 \pm 0	1 \pm 0.03	1,1 \pm 0	1,1 \pm 0.1	1 \pm 0	0,8 \pm 0	0,7 \pm 0	-6.93	***

Dans le Tableau 7 on a la moyenne des émissions en NO₂. Le principe du tableau reste le même que celui du NO avec les calculs mais ici on l'a fait pour le NO₂. Également pour le T-TEST on a exactement le même principe et le même type de

calcul. On utilise la même méthode de calcul pour tous les tests. De ce fait, l'interprétation avec le Tableau 6 est aussi pareille.

6.1.3 Émissions en PM

Dans la Figure 15, on a la représentation des émissions en particules de matières (PM). La première chose qu'on observe est que le biodiesel A est le plus émetteur en particules de matières. Il est au-dessus de toutes les autres courbes, mais à partir de 15 A il est moins émetteur que le biodiesel B. Les biodiesels G et H ont un bon rendement en termes d'émissions, ils sont plus ou moins constants. De plus ils sont largement inférieurs au biodiesel A en termes d'émissions. Le biodiesel F a aussi un bon rendu il varie de 12 à 14 A mais reste aussi bon que le G et H. Les autres biodiesels sont presque égaux à zéro dès le départ et suivent à peu près le même comportement que le G et H mais à partir de 5,7 A les émissions commencent à augmenter plus rapidement.

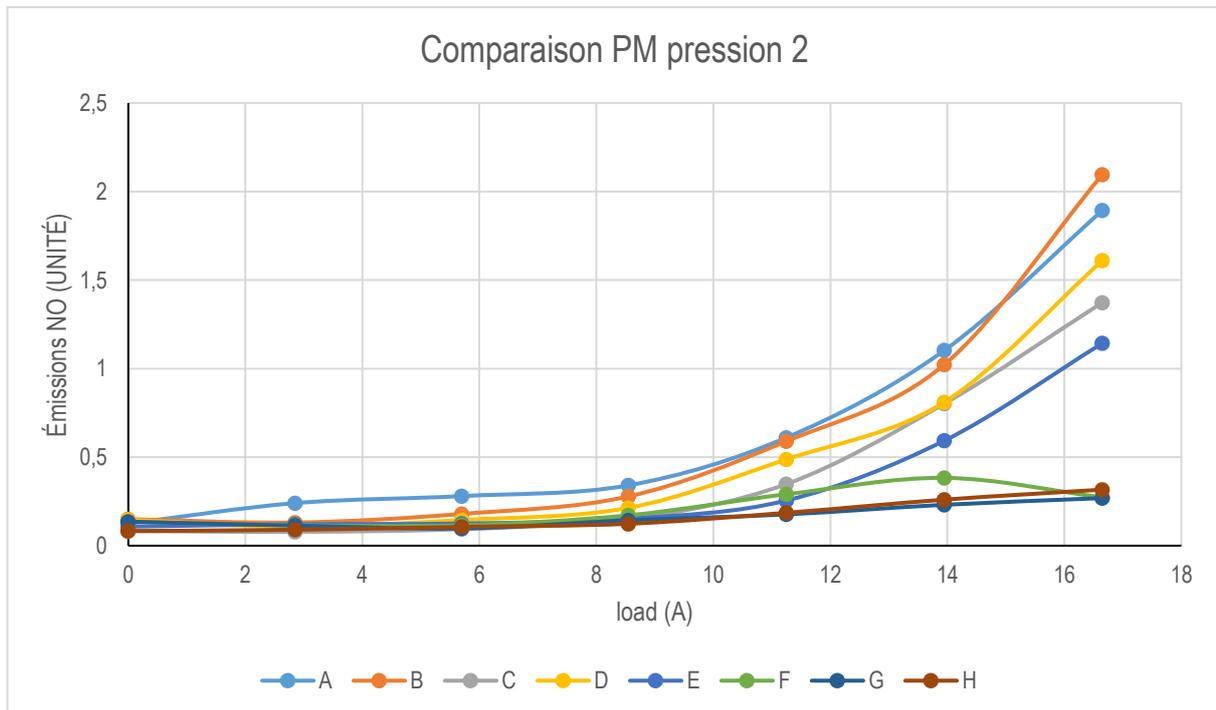


Figure 15 Graphique des émissions en PM, injectés à une pression de 22,5 MPa, selon le niveau de la charge appliquée

Tableau 8 moyenne des biodiesels des émissions en PM en mg/m³
 Valeurs données comme moyenne de trois mesurément s (n = 3) ± déviation (SD).

	MOYENNES							T-TEST	
	0	2,85	5,7	8,55	11,25	13,95	16,65	16.65	
A	0,1 ± 0	0,2 ± 0	0,3 ± 0.2	0,3 ± 0	0,6 ± 0	1,1 ± 0	1,9 ± 0.8		
B	0,15 ± 0	0,1 ± 0	0,2 ± 0.1	0,3 ± 0.2	0,6 ± 0.5	1 ± 0	2,1 ± 0	7.7	***
C	0,1 ± 0	0,1 ± 0 ± 0	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,3 ± 0	0,8 ± 0	1,4 ± 0.3	-20.2	****
D	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,2 ± 0	0,5 ± 0.4	0,8 ± 0	1,6 ± 0	-11.3	****
E	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,2 ± 0.1	0,3 ± 0.2	0,6 ± 0.6	1,1 ± 0	-26.6	****
F	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,2 ± 0.1	0,3 ± 0.2	0,4 ± 0.3	0,3 ± 0	-65,9	****
G	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,2 ± 0.1	0,2 ± 0	0,3 ± 0.2	-65.99	****
H	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,1 ± 0	0,2 ± 0.1	0,3 ± 0.2	0,3 ± 0	-63.83	****

Le Tableau 8 résume l'ensemble des calculs faits pour déterminer les particules de matières. Le principe de calcul reste une fois de plus le même que celui de la moyenne, la déviation standard et l'interprétation d'hypothèse.

6.2 Résultats d'émissions en NO à différentes pressions

Le deuxième objectif de ce mémoire est d'étudier le comportement du NO à différentes pressions. Nous voulons voir les différents résultats qu'on peut obtenir si on change la pression trois fois.

Il est important de préciser que les résultats que nous allons présenter sont ceux des émissions en NO pour différentes pressions. Ici nous avons fait trois changements de pression qui sont 19.83 MPa, 22.50 MPa et 21.33 MPa. Tous nos biodiesels de A à H seront analysés à différentes pressions afin de déterminer l'influence qu'à la pression d'injection sur leurs compositions en acide gras. Pour la suite on aura donc huit graphiques, ces graphiques nous permettront de voir plus précisément les comportements de nos biodiesels.

6.2.1 Biodiesel A

Dans la Figure 16, on peut voir qu'à la pression 1 on a beaucoup moins d'émissions à partir de 8 A. Cependant, en dessous de 8 A les émissions sont plus élevées que celles des pressions 2 et 3. Les émissions de la pression 1 lorsqu'on est à 0 A sont à 2 (mg/m^3) et n'augmentent pas brusquement au fur et à mesure qu'on augmente en charge, il reste plus ou moins constant comparé aux émissions de la pression 2 et 3 qui augmentent brusquement à partir d'une certaine charge. Sur ce graphique la pression de 19.83 MPa est plus appropriée en termes d'émissions, puis la pression 3 de 21.33 MPa et enfin la pression 2 qui est de 22.50 MPa.

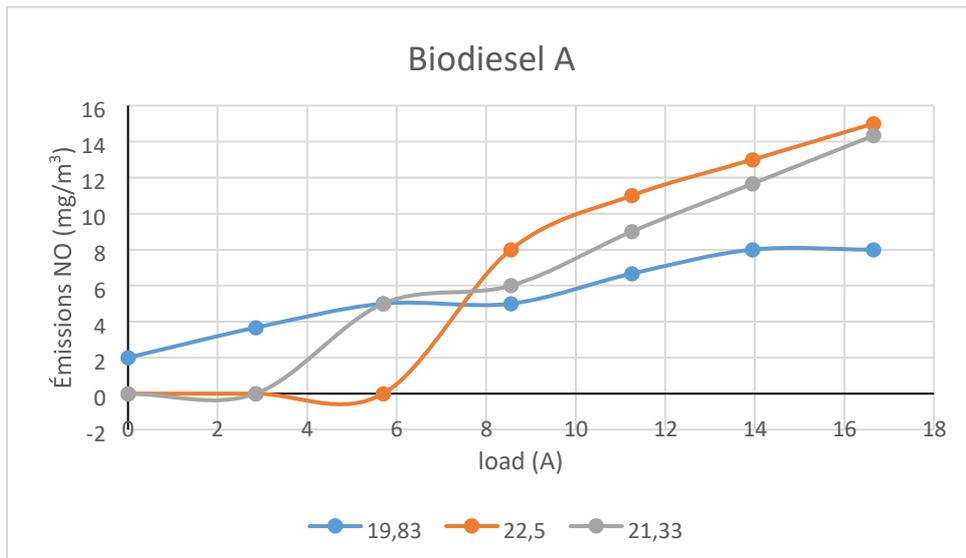


Figure 16 Émissions en NO du biodiesel A à différentes pressions

6.2.2 Biodiesel B

Pour le biodiesel B, la pression de 19.83 MPa est meilleure en termes d'émissions aussi bien en haute qu'en basse charge. La pression 2 de 22.50 MPa est plus intéressante à basse charge (de 0 à 8 A) comparée à la pression 3 de 21.33 MPa, cependant lorsque la charge est à plus de 8 A les émissions de la pression 2 deviennent supérieures à celles de la pression 3.

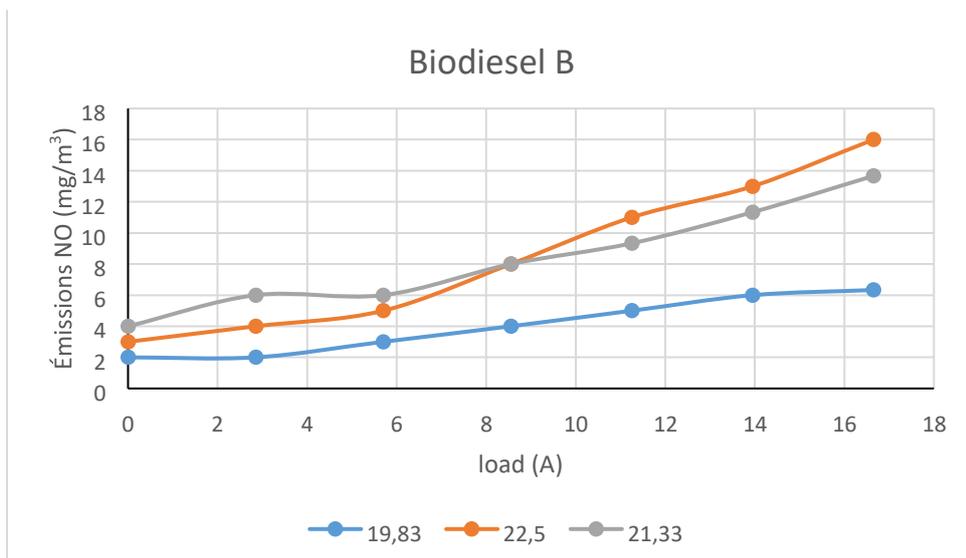


Figure 17 Émissions en NO du biodiesel B à différentes pressions

6.2.3 Biodiesel C

Pour le biodiesel C les émissions de la pression 1 sont plus intéressantes car elles ne commencent pas avec un fort taux d'émissions et ces émissions sont bien en dessous des pressions 2 et 3 bien qu'au départ les émissions de la pression la 2 soient nettement meilleures et n'augmentent considérablement qu'à partir de 3 A. On peut donc dire que pour ce graphique la pression 1 est la meilleure puis la pression 2 et enfin la pression 3.

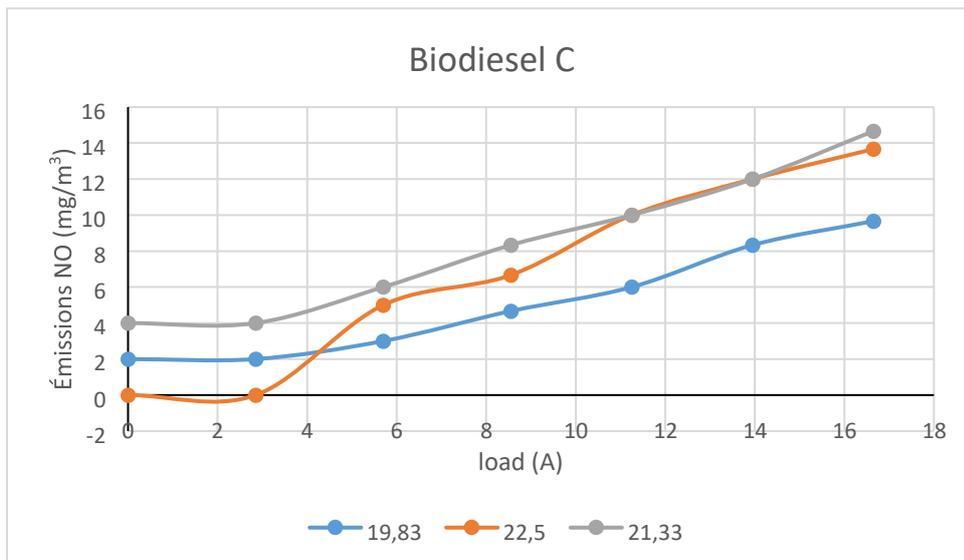


Figure 18 Émissions en NO du biodiesel C à différentes pressions

6.2.4 Biodiesel D

Dans le graphique de la Figure 19, on peut voir que la pression 1 est meilleure en termes d'émissions. De 0 A à 16,65 A on voit que les émissions n'augmentent pas de manière brusque. Les pressions 2 et 3 restent élevées comparées à la pression 1. On peut donc conclure que la pression 1 est plus intéressante en termes d'émissions puis on a la pression 3 et enfin la pression 2.

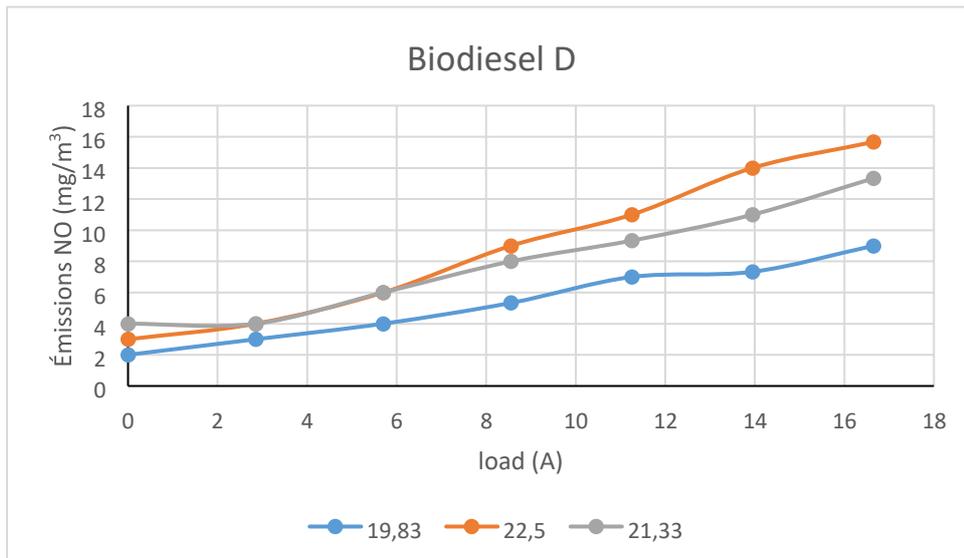


Figure 19 Émissions en NO du biodiesel D à différentes pressions

6.2.5 Biodiesel E

En regardant le graphique de la Figure 20, on peut d'abord remarquer que les émissions pour chaque pression sont à moins de 14 mg/m³ comparé aux émissions des autres biodiesels qui sont à plus de 14 mg/m³ à une certaine pression. La pression 1 est nettement mieux que les deux autres pressions malgré qu'on observe une montée brusque à partir de 3 mg/m³. Toutefois, celle-ci reste toujours en dessous des autres pressions. L'intervalle 6 mg/m³ à 8 mg/m³ constitue une exception car on constate que la pression 2 est légèrement en dessous de la pression 1. La pression 3 dans ce tableau est la plus mauvaise en termes d'émissions, suivie de la pression 2 qui est déjà mieux et de la pression 1 qui est la meilleure en matière d'émission. On peut même remarquer que de 0 mg/m³ à 3 mg/m³ on n'a presque pas d'émissions de NO.

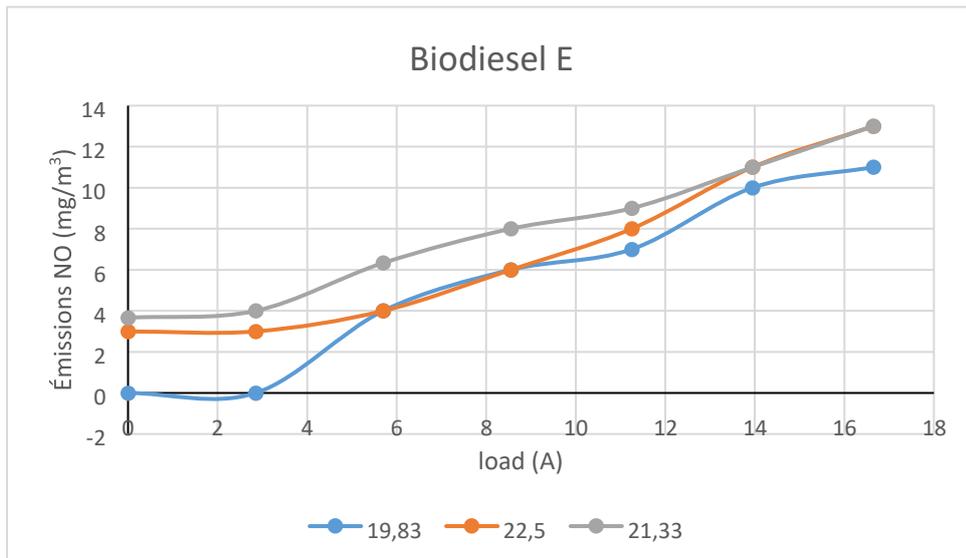


Figure 20 Émissions en NO du biodiesel E à différentes pressions

6.2.6 Biodiesel F

Le graphique de la Figure 21 permet de constater que les émissions de la pression 2 sont les plus intéressantes comparées à la pression 1 et 3 de 0 A à 16,65 A. On peut observer que les émissions de la pression 2 sont inférieures à celles de la pression 3 qui à leurs tours sont inférieures à celles de la pression 1. On a remarqué dans les autres graphiques que la pression 1 était toujours mieux en termes d'émissions mais les faits sont différents dans ce cas. La pression 1 devient la moins recommandable.

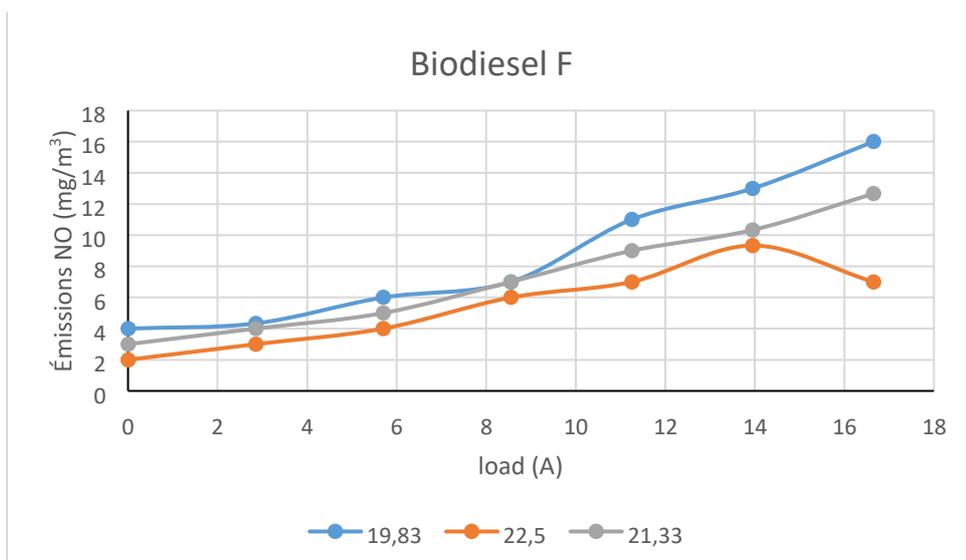


Figure 21 Émissions en NO du biodiesel F à différentes pressions

6.2.7 Biodiesel G

Dans le graphique de la Figure 22, on peut voir les différentes courbes d'émissions du NO. À première vue on peut déjà dire que les émissions de la pression 1 ne sont pas bonnes, elles sont largement supérieures aux émissions de la pression 2 et 3 dont leurs maximums sont respectivement 7 mg/m^3 et $7,33 \text{ mg/m}^3$ comparés au maximum de la pression 1 qui est environ $14,66 \text{ mg/m}^3$. En outre, on peut aussi remarquer que les émissions de la pression 2 sont assez constantes. Elles partent de 3 mg/m^3 lorsqu'on est à 0 A à 7 mg/m^3 lorsqu'on est à 16,65 A. La différence observée est seulement de 4 mg/m^3 . La pression 3 est assez bonne de 0 A à 7 A. Elle est de 0 mg/m^3 de 0 à 5,7 A et en dessous des autres courbes de 5,7 A à 7 A.

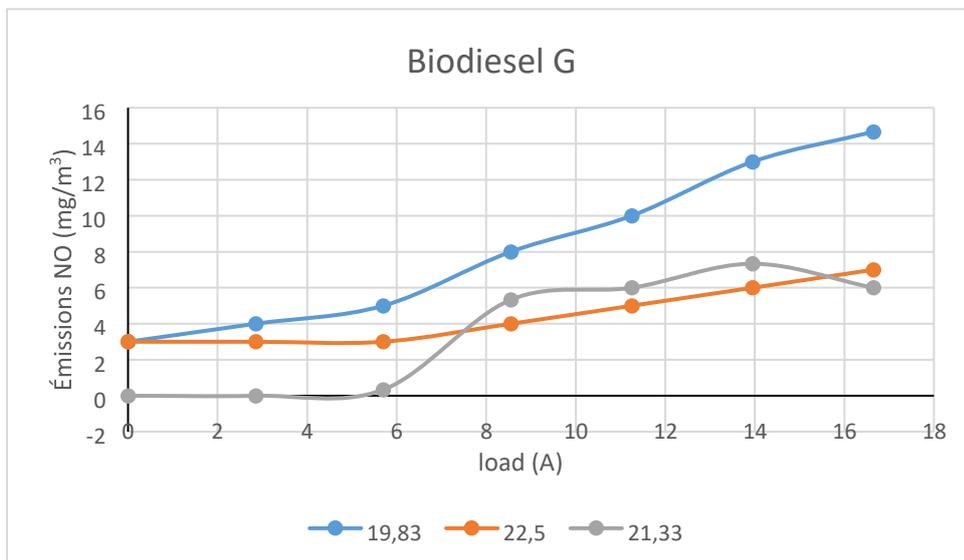


Figure 22 Émissions en NO du biodiesel G à différentes pressions

6.2.8 Biodiesel H

Sur la Figure 23, on peut constater que la pression 2 a la meilleure qualité en termes d'émissions de 0 A à 16,65 A. Puis on a la pression 1 qui vient après et enfin on a la pression 3. Leurs maximums sont respectivement 7, 11.3 et $14,66 \text{ mg/m}^3$. On observe une différence considérable entre les pressions 2 et 3, leurs maximums sont respectivement 7 mg/m^3 et $14,66 \text{ mg/m}^3$. Le maximum de la pression 3 représente donc plus du double de celui de la pression 2 en termes d'émissions.

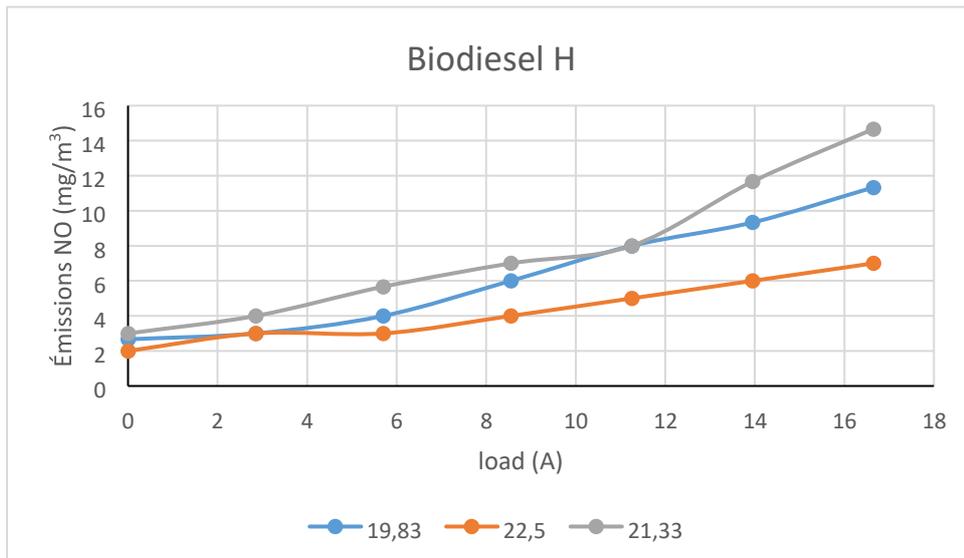


Figure 23 Émissions en NO du biodiesel H à différentes pressions

6.2.9 Émissions en NO des biodiesels de A à H à la pression 1

Dans le Tableau 9, nous avons mis tous les biodiesels qu'on a expérimentés et nous avons fait le test à la pression 1. Ceci nous permet de constater avec exactitude les biodiesels qui sont dans la marge qu'on s'est fixée. Ici la courbe de référence est la courbe du biodiesel A. Toutes les courbes qui seront en dessous ou au même niveau que celle-ci seront convenable pour les résultats que nous souhaitons obtenir. Déjà à vue d'œil les courbes sont très saturées et on a du mal à faire une bonne observation. Mais si on regarde de plus près, on remarque que notre biodiesel de référence (A) a été énoncé pour pouvoir être plus lisible sur le schéma. On remarque donc que la courbe B est en dessous de la courbe A. Néanmoins, celles-ci commencent sur le même point qui est 2 mg/m^3 . Mais le biodiesel B reste toujours plus bas que le biodiesel A au fur et à mesure qu'on augmente en charge. La courbe du biodiesel D est plus ou moins similaire à celle du biodiesel A. Peut-être qu'avec plus d'augmentation de charge cette courbe du biodiesel D dépasserait celle du biodiesel A encore plus. Nous ne pouvons pas en dire plus puisque nous nous sommes limités à 16,65 A. Nous observons également que la courbe du biodiesel C est aussi en dessous de la courbe du biodiesel A. Mais à partir de 13 A elle commence à dépasser la courbe du biodiesel A en termes d'émissions. Elle réagit de la même manière que la courbe du biodiesel D mais dépasse aussi celle-ci en termes d'émissions en NO.

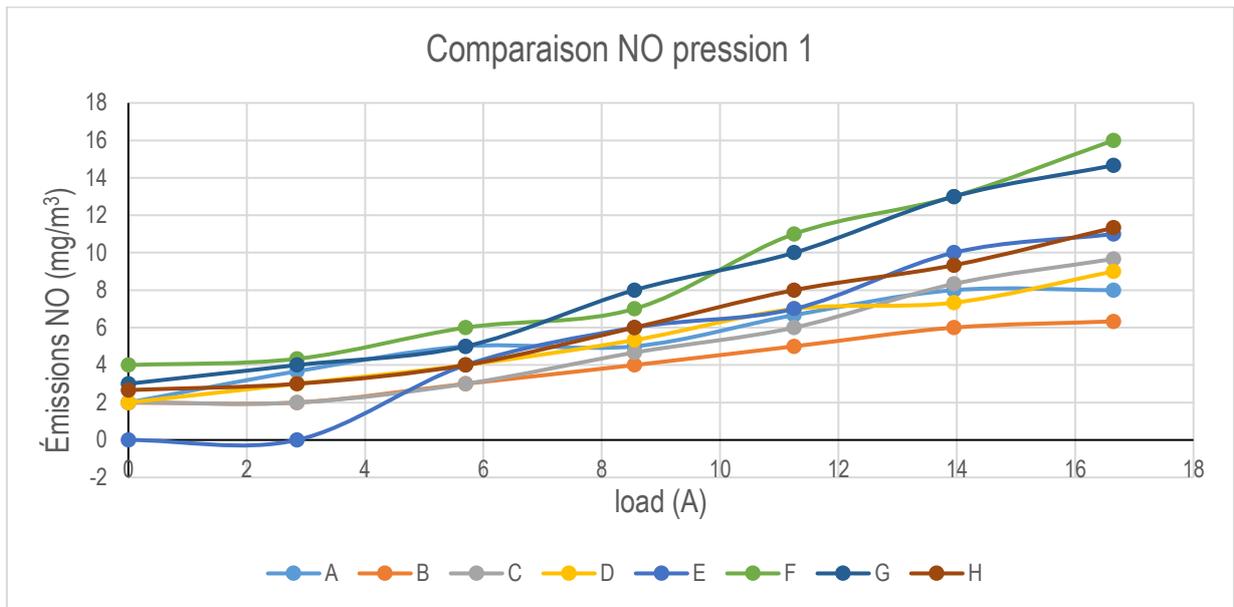


Figure 24 Émissions des biodiesel de A à H à la pression 1

Tableau 9 moyenne des biodiesels des émissions en NO à la pression 1
Valeurs données comme moyenne de trois mesurément (n = 3) ± déviation (SD).

	MOYENNES							T-TEST	
	0	2,85	5,7	8,55	11,25	13,95	16,65	16,65	
A	2	3,7 ± 0.66	5	5	6,7 ± 0.6	8	8		
B	2	2	3	4	5	6	6,3	-5	**
C	2	2	3	4,7 ± 0.6	6	8,3	9,7 ± 0.66	5	**
D	2	3	4	5,3	7	7,3	9	3	
E	0	0	4	6	7	10	11	#DIV/0!	
F	4	4,3	6	7	11	13	16	#DIV/0!	
G	3	4	5	8	10	13	14,7 ± 0.66	20	****
H	2,7 ± 0.66	3	4	6	8	9,3	11,3	10	***

La pression 2 a déjà été présentée à la page 27 et expliquée avec la Figure 13 et le Tableau 5.

6.2.10 Émissions des biodiesels de A à H à la pression 3

Pour le graphique de la Figure 25, on peut voir que le rendement en termes d'émissions est assez complexe. Néanmoins on peut remarquer que le biodiesel G nous donne un assez bon rendement. De 0 A à 5,6 A, il est à 0 mg/m³ en termes d'émissions. À 5,7 A il augmente assez brusquement mais reste toujours en dessous de la courbe du biodiesel A. À partir de 13,95 A on constate que la courbe du

biodiesel G commence à descendre. On remarque aussi qu'à partir de 11,25 A la courbe du biodiesel A augmente rapidement au point de dépasser les courbes des autres biodiesels en termes d'émissions.

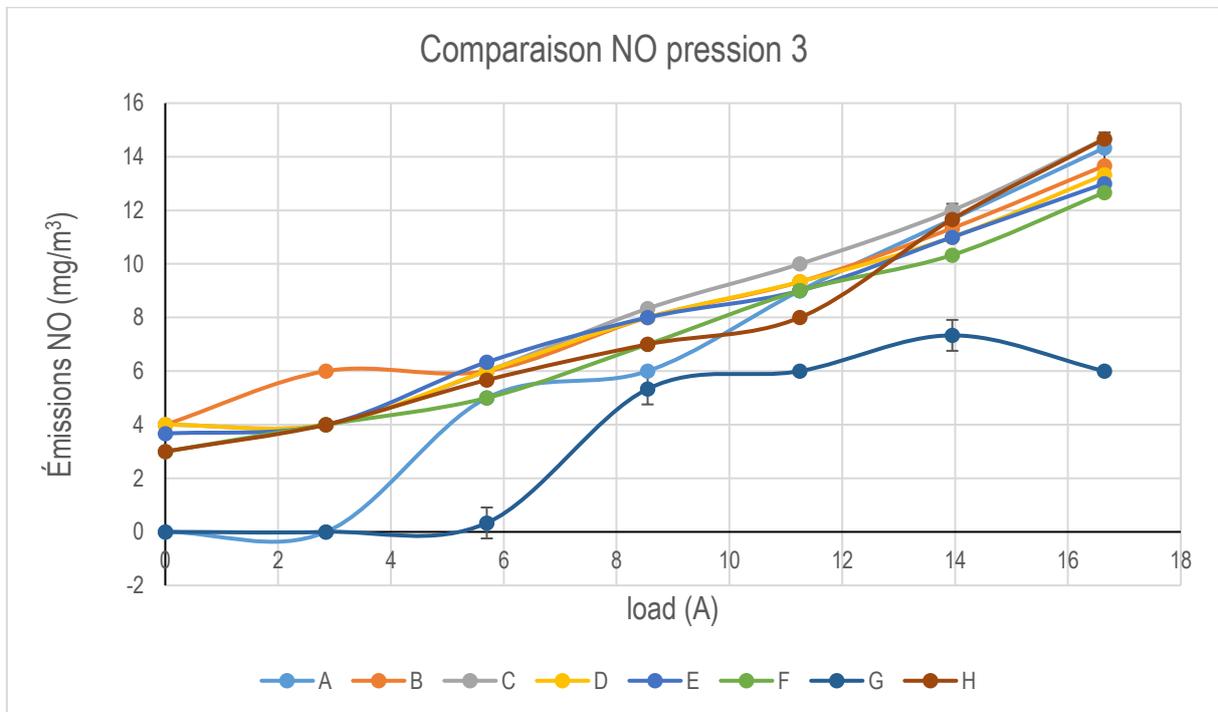


Figure 25 Émissions des biodiesels de A à H à la pression 3

Tableau 10 moyenne des biodiesels des émissions en NO à la pression 3
Valeurs données comme moyenne de trois mesurément s ($n = 3$) \pm déviation (SD).

	MOYENNES								T-TEST
	0	2,85	5,7	8,55	11,25	13,95	16,65	16,65	
A	0 \pm 0	0 \pm 0	5 \pm 0	6 \pm 0	9 \pm 0	11,7 \pm 0.66	14,3 \pm 0		
B	4 \pm 0	6 \pm 0	6 \pm 0	8 \pm 0	9,3 \pm 0	11,3 \pm 0	13,7 \pm 0.66	-1,4	
C	4 \pm 0	4 \pm 0	6 \pm 0	8,3 \pm 0	10 \pm 0	12 \pm 0	14,7 \pm 0.66	0,7	
D	4 \pm 0	4 \pm 0	6 \pm 0	8 \pm 0	9,3 \pm 0	11 \pm 0	13,3 \pm 0	-3	
E	3,7 \pm 0.66	4 \pm 0	6,3 \pm 0	8 \pm 0	9 \pm 0	11 \pm 0	13 \pm 0	-4	*
F	3 \pm 0	4 \pm 0	5 \pm 0	7 \pm 0	9 \pm 0	10,3 \pm 0	12,7 \pm 0.6	-3,5	*
G	0 \pm 0	0 \pm 0	0,3 \pm 0	5,3 \pm 0	6 \pm 0	7,3 \pm 0	6 \pm 0	-25	****
H	3 \pm 0	4 \pm 0	5,7 \pm 0.66	7 \pm 0	8 \pm 0	11,7 \pm 0.66	14,7 \pm 0.66	0,7	

Remarque : tous les tableaux ci-dessus ont été faits selon le même principe qui a été décrit à la pression 2. On peut notamment remarquer qu'ils se ressemblent tous. Pour en revenir brièvement, lors de nos tests, pour chaque pression on a relevé les valeurs

de NO. Pour chaque biodiesel on a fait un test de six étapes, au cours desquels on augmentait à chaque fois la charge. Pour chaque augmentation de charge on prenait trois mesures du NO. Lorsqu'on fait la moyenne de ces trois mesures on obtient les différents tableaux de moyenne présentés ci-dessus. Puis il ne reste plus qu'à faire la déviation standard de ces mesures pour obtenir les différents tableaux déviations standards. En ce qui concerne les calculs d'hypothèses, il suffit d'utiliser la formule que nous avons évoquée dans la partie méthodologie puis les comparer avec le Tableau 6 étoilé pour voir dans quelle mesure nos hypothèses sont acceptées ou rejetées. Notons qu'une valeur avec étoile veut dire que l'hypothèse nulle est rejetée et que l'hypothèse alternative est acceptée. L'hypothèse nulle H_0 signifie qu'il n'y a pas une différence en émission de NO entre les biodiesels B à H en comparaisons avec le biodiesel A qui est le biodiesel de référence sans acide gras et l'hypothèse alternative H_1 veut dire qu'il y a effectivement une différence entre les émissions des biodiesels B à H et le biodiesel de référence A.

Nous avons fait nos tests d'hypothèses en fonction de la charge la plus grande car les émissions sont généralement élevées lorsque la charge augmente.

6.2.11 Model du logiciel ANOVA

Nous avons fondé des matrices à l'aide de ce logiciel et avons inséré les valeurs qui nous permettront d'atteindre nos résultats. R utilise la fonction *lm* pour ajuster les modèles linéaires. *summary()* appliqué à un *lm* objet donnera des valeurs p et d'autres informations pertinentes. Pour un modèle avec plus d'un coefficient, *summary* fournit des estimations et des tests pour chaque coefficient ajusté pour tous les autres coefficients du modèle (Appavu et al., 2020)

```
pression biodieselloadNO
<dbl> <chr> <dbl> <dbl>
1 22.5 A 8.55 8
2 22.5 H 16.67
3 21.3 B 16.6 13 4 19.8 G 5.75
5 21.3 G 2.85 0
6 19.8 H 14.09
7 21.3 A 0
8 19.8 C 16.69
9 21.3 E 2.85 4
10 21.3 B 0.4
```

```
> res <- model.matrix(~biodiesel, data = biopres)
```

```
> head (res[, -1]) biodieselB biodieselC biodieselD biodieselE biodieselF
biodieselG biodieselH
10000000
20000000
30000000
40000000
50000000
60000000
```

Comme nous pouvons le voir on a créé un ensemble de model. Ces modèles nous permettrons de voir les similitudes ou les différences entre les différents éléments que nous allons insérer. On a donc eu recours à quatre modèles

```
> model1 <- lm (NO ~ pression, data = biopres)
> model2 <- lm (NO ~ pression + biodiesel, data = biopres)
> model3 <- lm (NO ~ pression + load, data = biopres)
> model4 <- lm (NO ~ pression + biodiesel + load, data = biopres)
```

Le premier modèle suppose qu'il existe un lien entre la pression d'injection et les émissions en NO. Le deuxième modèle suppose l'existence d'un lien entre la pression d'injection, le biodiesel et les émissions en NO. Le troisième modèle suppose l'existence d'un lien entre la pression d'injection la charge et les émissions en biodiesel et pour finir le quatrième modèle suppose qu'il y'a un lien entre la pression d'injection le biodiesel la charge et les émissions en NO.

```
> summary (model1)
Call
lm (formula = NO ~ pression, data = biopres)

Residuals
Min1QMedian3Q Max
-6.8370 -2.8370 -0.62512.64669.6466

Coefficients
Estimate Std. Error t value Pr (>|t|) (Intercept)
2.7622 3.4516 0.8000.424 pression0.1811 0.1624
1.1150.265

Residual standard error 3.985 on 502 degrees of freedom
Multiple R-squared0.00247, Adjusted R-squared0.0004827
F-statistic 1.243 on 1 and 502 DF,p-value 0.2654
```

On utilise ces valeurs « Estimate » pour paramétrer un modèle linéaire de la forme

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_pX_p + \epsilon.$$

Dans le summary du modèle 1, le premier « Estimate » représente le B0 (intercept) et le B1 c'est l'estimation du coefficient (slope) correspondant à la variable « pression ». Std. Error sont les erreurs standards sur ces valeurs d'estimation ; t value c'est la valeur du coefficient divisé par son erreur standard. Pr (>|t|) est la valeur P du coefficient. Intercept est la moyenne d'expression pour le traitement de pression (« A Brief Introduction to Linear Models in R », s. d.). L'hypothèse H_0 est que nos paramètres sont égaux à zéro donc qu'il n'y a aucun effet significatif, l'hypothèse alternative H_1 est que nos paramètres sont significativement différents de zéro. Pour notre premier modèle il est surprenant que nos valeurs ne diffèrent pas de zéro de façon significative. Ce modèle ne nous dit rien car il n'est pas linéaire et aussi parce que la pression 2 est mieux que les pressions 1 et 3.

```
> summary(mode12)  Call: lm(formula = NO ~ pression +
biodiesel, data = biopres)

Residuals:
Min 1Q Median 3Q Max
-6.9937 -2.9287 -0.48642 0.62679 0.8390

Coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 2.4110 3.4665 0.696 0.4871
pression0.1811 0.1617 1.120 0.2631
biodieselB0.7302 0.7066 1.033 0.3020
biodieselC0.5079 0.7066 0.719 0.4726
biodieselD1.1746 0.7066 1.662 0.0971 .
biodieselE0.4603 0.7066 0.651 0.5151
biodieselF0.9206 0.7066 1.303 0.1932 biodieselG
-0.8413 0.7066-1.191 0.2344 biodieselH -0.1429
0.7066-0.202 0.8399
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 3.966 on 495 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.02589, Adjusted R-squared: 0.01015
F-statistic: 1.645 on 8 and 495 DF, p-value: 0.1096
```

Dans le deuxième modèle nous avons ajouté l'effet du biodiesel et de nouveau nous n'avons pas d'effet.

```
> summary(mode13)
Call:
lm(formula = NO ~ pression + load, data = biopres)

Residuals:
Min 1Q Median 3QMax
```

-5.611 -1.3400.2971.2974.660

Coefficients:

```
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -2.340801.84970-1.266 0.2063
pression 0.181100.08679 2.087 0.0374 *
load 0.605960.0170935.463 <2e-16 *** ---
Signif. codes:0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 2.129 on 501 degrees of freedom
Multiple R-squared:0.7158, Adjusted R-squared:0.7147
F-statistic: 631 on 2 and 501 DF,p-value: < 2.2e-16
```

Dans le modèle 3 nous avons introduit la charge, et nous trouvons qu'il y a un grand effet sur la charge avec un petit effet de pression.

```
> summary(model4)
```

```
Call: lm(formula = NO ~ pression + biodiesel + load, data = biopres)
```

Residuals:

```
Min1QMedian3Q Max
-5.7186 -1.35330.18741.28454.8529
```

Coefficients:

```
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -2.691991.80067-1.4950.13555
pression 0.181100.08372 2.1630.03101 *
biodieselB 0.730160.36596 1.9950.04657 *
biodieselC 0.507940.36596 1.3880.16578
biodieselD 1.174600.36596 3.2100.00142 **
biodieselE 0.460320.36596 1.2580.20905
biodieselF 0.920630.36596 2.5160.01220 *
biodieselG-0.841270.36596-2.2990.02193 *
biodieselH-0.142860.36596-0.3900.69644 load
0.605960.0164836.762< 2e-16 ***
---
Signif. codes:0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 2.054 on 494 degrees of freedom
Multiple R-squared:0.7392, Adjusted R-squared:0.7345
F-statistic: 155.6 on 9 and 494 DF,p-value: < 2.2e-16
```

Le modèle 4 nous montre qu'il y a encore un effet de la charge. Ce qui signifie qu'il faut toujours tenir compte de la charge pour voir l'effet du biodiesel et de la pression. De tous ces modèles le modèle 3 est mieux que le modèle 1 et le modèle 4 est mieux que le modèle 2. Donc il faut toujours tenir compte de la charge.

Les modèles ont été combinés pour voir s'il y aura des effets :

```
> anova(model2, model1)
```

```
Analysis of Variance Table
```

```

Model 1: NO ~ pression + biodiesel
Model 2: NO ~ pression
Res.DfRSS Df Sum of SqF Pr(>F)
1495 7785.5
2502 7972.7 -7 -187.22 1.7005 0.1066

```

Entre le modèle 2 et 1 il n'y a aucun effet.

```

> anova(model3, model1)
Analysis of Variance Table

```

```

Model 1: NO ~ pression + load
Model 2: NO ~ pression
Res.DfRSS Df Sum of SqFPr(>F)
1501 2271.3
2502 7972.7 -1 -5701.4 1257.6 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Entre les modèles 3 et 1, il y a un grand effet sûrement dû à la présence de la charge

```

.
> anova (model4, model1)
Analysis of Variance Table
Model 1 NO ~ pression + biodiesel + load
Model 2 NO ~ pression
Res.DfRSS Df Sum of SqFPr (>F)
1494 2084.0
2502 7972.7 -8 -5888.6 174.48 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Entre les modèles 4 et 1, il y a un grand effet qui est aussi sûrement dû à la présence de la charge.

```

> anova (model4, model3)
Analysis of Variance Table

```

```

Model 1 NO ~ pression + biodiesel + load
Model 2 NO ~ pression + load
Res.DfRSS Df Sum of SqFPr (>F)
1494 2084.1
2501 2271.3 -7 -187.22 6.3398 3.794e-07 ***
---
Signif. codes0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Entre les modèles 4 et 3, il y a un effet significatif entre les différents paramètres, et l'effet est sûrement dû à la présence de la charge.

7 Discussion

Après cette série d'expériences, on peut affirmer que les émissions du biodiesel seront différentes à chaque fois que la composition de celui-ci sera modifiée. Cela permet de répondre aux questions qui font l'objet de cette étude.

Premièrement, comment expliquer le changement des émissions dans le moteur ?

Les biodiesels ayant des compositions chimiques différentes, on s'attend aussi à avoir des émissions différentes les uns aux autres. Les changements des émissions comme ceux du F, G et H qui réagissent dans la plupart du temps différemment par rapport aux autres biodiesels peuvent être dû à la qualité de la chambre de combustion, ou bien à la façon dont le récipient de carburant a été nettoyé. En effet, s'il n'était pas bien nettoyé, peut-être par négligence ou par précipitation, cela pourrait changer les résultats des émissions et surtout que les biodiesels F, G et H étaient les derniers biodiesels à être mesurés.

Deuxièmement, est-ce qu'il y'a un changement lorsque la charge change ? Lorsque la charge du moteur augmente, la consommation en carburant augmente aussi pour que la vitesse demandée soit atteinte. Plus la charge augmente plus le carburant est injecté et plus vite tourne le piston tourne, ce qui entraîne beaucoup d'émissions à ce moment. C'est donc à ce moment qu'on peut notamment constater sur les figures de nos résultats que lorsqu'on est à 16,65 A les émissions sont toujours élevées parce que la charge est également plus élevée. Il y a des régulateurs de vitesses dans les moteurs diesels qui modifient automatiquement le débit de carburant injecté lorsqu'on augmente ou diminue la charge. Par conséquent, une augmentation des émissions est tout à fait normale.

Si on compare ensuite les différents types de biodiesels, les biodiesels G et H sont beaucoup mieux en termes d'émissions en NO et à toutes les pressions. Les biodiesels E et F semblent aussi être beaucoup mieux aux pressions deux et trois. La composition avec les biodiesels G, H et plus ou moins F va causer moins d'émissions de NO.

Concernant le NO₂, les biodiesels G et H sont négatifs et mieux en termes d'émissions alors que le biodiesel F est négatif juste au début et à la fin des tests. Il n'est donc pas tout à fait mieux en termes d'émissions. Lorsqu'on regarde le Tableau

7, il semble que les biodiesels F, G, H, B et D sont mieux en termes d'émissions mais en regardant la Figure 14, on s'aperçoit que seuls les biodiesels G et H sont mieux en termes d'émissions.

S'agissant des émissions en PM, les biodiesels de C à H vont diminuer leurs émissions en PM. Le biodiesel B ne fait rien concrètement, les biodiesels F, G et H se présentent encore mieux que les autres lorsqu'on regarde la Figure 15. Le changement de la composition des biodiesels vers celles du G et H pourrait être une bonne chose pour les rapports en termes d'émissions. Dans le Tableau 3 sont affichées les compositions des différents biodiesels et on se demande ce qui rend la composition de G et H autant mieux en termes d'émissions. La faible quantité de linoléique et de Linoléique pourrait expliquer ce fait, mais il est difficile de donner des avis pour le reste de la composition car les compositions sont presque pareilles et il n'y a pas de différences considérables. Pour avoir ces résultats en termes d'émissions, il faudra juste faire les compositions en acide gras comme celles du biodiesel G et H. Pour le moment, il est difficile de déterminer si la composition donnée en acide gras a un effet sur les émissions. Si on compare avec le biodiesel A, on peut affirmer que, s'agissant de l'acide palmitique, le G en contient plus et le H en contient moins. En ce qui concerne l'acide stéarique, G en contient moins et H plus. S'agissant de l'acide oléique, H en contient plus que A, tandis que G en contient beaucoup moins que A, en revanche, le B en contient aussi moins que le A mais même en allant dans ce sens on n'obtient aucun résultat concret. Cependant, le biodiesel F donne aussi souvent des valeurs significatives en termes d'émissions. La différence pourrait être liée aux chaînes longues avec une ou deux doubles liaisons. On pourrait se pencher plus tard sur l'étude des chaînes carboniques avec doubles et triples liaisons utilisées pour la composition du biodiesel.

En ce qui concerne l'effet de pression, il est préférable d'utiliser une pression plus basse pour la plupart des biodiesels, sauf dans le cas des biodiesels F, G et H qui se comportent différemment pour certaines raisons que nous ignorons et qui sont mieux en termes d'émissions à une pression plus haute. Lorsqu'on regarde l'ensemble des biodiesels pour chaque pression, à la pression 1 (Tableau 9) les biodiesels B et C ont un effet significatif mais les G et H ne signifient rien car leurs courbes (Figure 24) sont supérieures à la courbe A. À la pression 2 (Tableau 7) les biodiesels G et H sont exactement pareils en termes d'émissions, ils sont significatifs comme les biodiesels

F et E. À la pression 3 (Tableau 10) les biodiesels G, F et E sont significatifs, cependant, le G est mieux en termes d'émissions (Figure 25). Pour essayer de comprendre ces émissions on s'est tourné vers les modèles du logiciel ANOVA. Nous observons à travers le modèle 4 que la charge a un grand effet sur les émissions, l'effet de la pression est léger, mais il existe. Les biodiesels B, F et G donnent un effet, mais le H ne donne aucun effet, ce qui corrobore l'explication donnée avant. En effet, on a le biodiesel D qui a un effet significatif mieux comparé aux autres biodiesels, ceci pourrait être dû à sa composition. Dans ce modèle ANOVA, nous n'avons pas tenu compte de deux choses ; tout d'abord on doit toujours tester les hypothèses dans un modèle linéaire (analyse qui évalue si une ou plusieurs variables prédictives expliquent la variable dépendante (critère)).

Puis on doit aussi tester qu'il n'y a pas des interactions entre les paramètres et c'est quelque chose que nous n'avons ni recherché ni expliqué dans ce mémoire. Les interactions peuvent exister entre la pression d'injection qui peut changer et la composition du biodiesel. On pourra dire que la pression ne change pas en fonction de la composition du biodiesel. En effet, la pression d'injection est une valeur donnée et plus ou moins connue comme dans le cadre de ce mémoire où on a eu à utiliser trois pressions d'injection. Les émissions peuvent changer en fonction de la qualité de la pression d'injection, normalement plus la pression est grande plus on a une bonne atomisation du biodiesel ce qui va rendre la combustion complète et limitée les émissions. Mais dans notre cas la plupart des biodiesels émettaient moins lorsque la pression était basse, à l'exception des biodiesels F, G et H. Ainsi, ces biodiesels réagiraient normalement à l'effet de pression comparés aux autres.

Troisièmement, est-ce que la réaction de combustion change avec la composition du biodiesel ? La composition du biodiesel peut changer la réaction de combustion, dans le sens que, si le processus d'évaporation du carburant ayant une longue chaîne carbonique dans la chambre d'injection n'est pas rapide, ceci pourrait mener à un mauvais mélange air carburant et causer une combustion incomplète, ainsi que le développement de la suie dans la chambre de combustion. Plus la combustion est complète, plus le rendement est important et lorsque le rendement est important, le moteur est performant. Lorsque le moteur est performant, il consomme moins de carburant et pollue moins.

Il faut y ajouter que les modèles que nous avons introduits sont des modèles linéaires, mais on peut aussi avoir d'autres relations entre X et Y qui sont par exemple parabolique, logarithmique, hyperbolique etc. Toutefois, nous n'avons pas étudié d'autres relations pour éviter de rendre ce mémoire beaucoup plus complexe. Il y a beaucoup d'autres relations qu'on ne peut pas capter juste avec un effet linéaire. Étudier toutes ces autres relations nécessite plus de temps et de ressources que nous ne disposons pour ce mémoire et c'est pour cette raison que nous ne l'avons pas fait. Cela pourrait aussi expliquer pourquoi on n'a pas vraiment d'effet direct car les relations entre les émissions, biodiesels, charges et pression ne sont pas linéaires.

Finalement, les erreurs auraient-elles été commises pendant l'expérience ? Les erreurs commises pendant l'expérience peuvent aussi être à l'origine de certains résultats incompris comme la différence des biodiesels F, G et H avec les autres biodiesels. Lors d'une expérience on a mélangé deux biodiesels. Toutefois, les résultats étaient tellement compromettants qu'on s'est très vite rendu compte de notre erreur. En outre, on oublie parfois de bien nettoyer le récipient du biodiesel et on met un autre biodiesel par-dessus, ceci peut aussi causer des changements de la composition initiale du biodiesel a expérimenté et par conséquent des émissions aussi. Par ailleurs, nous avons eu un souci avec notre moteur qui ne démarrait plus, mais ce problème a rapidement été résolu. Néanmoins, l'état du moteur avant cette panne pourrait aussi être à l'origine d'une mauvaise combustion. Ce mauvais état du moteur qu'on n'ignorait dès le départ serait donc à l'origine des mauvais résultats en émissions.

Que faire pour améliorer l'expérience : Pour améliorer cette expérience dans le futur, il faudra tout d'abord s'assurer que le moteur est en parfait état de fonctionnement et faire une composition en acide avec plus de différence dans la composition de telle sorte qu'en voyant les résultats on soit capable de déterminer la cause d'éventuels problèmes. En outre, il serait aussi nécessaire d'étudier les effets des émissions sous d'autres relations comme les relations logarithmiques, paraboliques etc.

8 Conclusion

Dans le but de réduire les émissions dues au diesel, des recherches ont été effectuées sur l'utilisation d'un autre carburant notamment le biodiesel, la composition de celui-ci est différente selon la matière première qu'on utilise. Dans le cadre de ce mémoire nous avons utilisé l'huile de colza et avons fait des compositions différentes de biodiesels avec des pourcentages en acides gras différents. Après plusieurs séries d'expériences sur les émissions de biodiesel, on s'est posé la question de savoir si les émissions du biodiesel sont influencées par la composition en acide gras et la variation de la pression d'injection.

L'étude individuelle de chaque biodiesel à des pressions différentes nous a montré que les émissions changent effectivement avec la pression. Pour la majorité des biodiésels les émissions étaient mieux lorsque la pression était plus basse, tandis que pour les autres biodiesels les émissions n'étaient mieux que lorsque la pression était plus haute. On peut donc affirmer que la composition des biodiesels et l'effet de pression agissent sur la qualité des émissions. Selon les modèles statistiques étudiés, il en ressort que lorsqu'on combine à la fois l'effet des émissions, de la pression, des biodiesels et de la charge, il y a bien des effets significatifs. Pour la pression il y a un léger effet significatif, tandis que pour la charge il y a un grand effet significatif. En ce qui concerne les biodiésels, des effets sont observés pour certains biodiesels mais pas pour d'autres en fonction de leur composition. On peut donc conclure que la pression d'injection et la composition des biodiesels en acides gras exercent une influence sur les émissions en NO.

On en revient à se demander s'il n'y aurait pas d'autres méthodes d'influence des émissions en dehors du changement de la composition du biodiesel, notamment l'installation des appareils au niveau des collecteurs d'échappement afin de filtrer les NO_x et les PM.

Bibliographie

A Brief Introduction to Linear Models in R. (s. d.). Consulté le 13 août 2021, à l'adresse https://ucdavis-bioinformatics-training.github.io/2019-March-Bioinformatics-Prerequisites/thursday/linear_models.html

Appavu, P., Madhavan, V. R., Venu, H., & Jayaraman, J. (2020). A novel alternative fuel mixture (diesel–biodiesel–pentanol) for the existing unmodified direct injection diesel engine : Performance and emission characteristics. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 44(1), 1-9. NRC Research Press. doi:10.1139/tcsme-2019-0049

Bergh, D. van den, Doorn, J. van, Marsman, M., Draws, T., Kesteren, E.-J. van, Derks, K., Dablander, F., et al. (2020). A Tutorial on Conducting and Interpreting a Bayesian ANOVA in JASP. *L'Année psychologique*, Vol. 120(1), 73-96.

Biodiesel—Low-tech Lab. (s. d.). Consulté le 27 avril 2021, à l'adresse <https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Biodiesel>

Boczkowski, J., & Lanone, S. (2019). Impacts de la pollution de l'air sur la santé humaine. *Annales des Mines—Responsabilité et environnement*, N° 96(4), 17-21.

Brun, O., Caillaud, D., Charpin, D., & Dalphin, J.-C. (2019). La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire : Les experts du groupe PAPPEI répondent au Bureau de la SPLF. *Revue des Maladies Respiratoires*, 36(10), 1083-1087. doi:10.1016/j.rmr.2019.10.005

Caouette, C. (2010). *Effets du dioxyde d'azote et de l'ozone sur les maladies respiratoires à Montréal*. (masters, Université du Québec, Institut national de

- la recherche scientifique, Québec). Consulté à l'adresse
<http://espace.inrs.ca/id/eprint/1424/>
- Chenot, E.-D., & Schwartz, C. (2021). *Chapitre 8. Dynamique des polluants dans le système atmosphère-sol-plante potagère. Jardins potagers : Terres inconnues ?* (p. 75-96). EDP Sciences. Consulté à l'adresse
<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1051/978-2-7598-1037-6-013/html>
- Cuvelier, C., Cabaraux, J.-F., Dufrasne, I., Hornick, J.-L., & Istasse, L. (2004). Acides gras : Nomenclature et sources alimentaires. *Annales de Médecine Vétérinaire*, 148(3). *Annales Medecine Veterinaire*. Consulté à l'adresse
<https://orbi.uliege.be/handle/2268/8153>
- Demirbas, A. (2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 35(9), 4661-4670. doi:10.1016/j.enpol.2007.04.003
- Fetni, S. (s. d.). L'effet de couplage entre l'avance à l'injection et la pression d'injection sur les performances des moteurs alimentés par le biodiesel issu des huiles de friture. *International Journal of Scientific Research*, 4.
- Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405-416. doi:10.1016/S1389-1723(01)80288-7
- Gohin, A. (2013). Le biodiesel émet-il beaucoup de gaz à effet de serre ? *Revue française d'économie*, Volume XXVIII(3), 165-212. *Revue française d'économie*.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 143-169.

doi:10.1016/j.rser.2011.07.143

[Hot Item] 6kw Red Color Silent Diesel Generator Set (DG8500SE). (s. d.). *Made-in-China.com*. Consulté le 7 mai 2021, à l'adresse <https://czhiearn.en.made-in-china.com/product/LBdxrqWHHUKf/China-6kw-Red-Color-Silent-Diesel-Generator-Set-DG8500SE-.html>

II. 1) La transformation chimique. (s. d.). Consulté le 21 février 2021, à l'adresse <http://biodiesel.e-monsite.com/pages/ii-production-bilan-et-comparaison-avec-le-gazole/ii-1-synthese.html>

Kezrane, C., Bendriss, A., Loubar, K., Sary, A., Liazid, A., & Tazerout, M. (2016). COMPARAISON DES ÉMISSIONS POLLUANTES D'UN MOTEUR DIESEL ALIMENTÉ AVEC QUATRE CARBURANTS. Université des Frères Mentouri Constantine. Consulté à l'adresse <http://archives.umc.edu.dz/handle/123456789/132954>

Le monoxyde de carbone, ce tueur silencieux ! (s. d.). Consulté le 21 février 2021, à l'adresse <https://www.mc.be/votre-sante/environnement/intoxication-co>

Legrand, P. (2010). Intérêt nutritionnel des acides gras saturés. *Sciences des Aliments*, 29(3-4), 115-122. doi:10.3166/sda.29.115-122

Les biocarburants à base de colza et de maïs | Agriculture du Maghreb. (s. d.). Consulté le 25 juillet 2021, à l'adresse <https://www.agri-mag.com/2017/09/les-biocarburants-a-base-de-colza-et-de-mais/>

Les énergies renouvelables en France en 2020—Suivi de la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables. (2020)., 4.

Mofijur, M., Siddiki, S. Y. A., Ahmed, M. B., Djavanroodi, F., Fattah, I. R., Ong, H. C., ... & Mahlia, T. M. I. (s. d.). Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources-A mini-review.

- Mohan, B., Yang, W., & Chou, S. Kiang. (2013). Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 664-676. doi:10.1016/j.rser.2013.08.051
- Mostert, M., Caris, A., & Limbourg, S. (2017). Road and intermodal transport performance : The impact of operational costs and air pollution external costs. *Research in Transportation Business & Management, Intermodal freight transport management*, 23, 75-85. doi:10.1016/j.rtbm.2017.02.004
- Riva, A., Michielsen, N., Ollivier, E., Delorme, M.-O., Daugeron, D., Ferloni, P., Taravella, G., et al. (2011, 1 août). Pollution de l'air et santé : Il s'agit avant tout d'un problème de particules en suspension. doi:10.13140/RG.2.2.24769.38241
- Rodriguez De Rodriguez, M. D. P. (2014). Production de biodiesel à partir d'une huile modèle de microalgues par voie de catalyse enzymatique hétérogène. Université de Sherbrooke. doi:http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/111
- Testud, F. (2010). Dioxyde de carbone. *EMC - Pathologie professionnelle et de l'environnement*, 5, 1-5. doi:10.1016/S1155-1925(10)71870-X