

# Valorisation énergétique de déchets gras en biocarburant

par Anthony KERIHUEL

À l'heure où les réserves en énergies fossiles s'amenuisent et le réchauffement de la planète devient un sujet d'actualité, les biocarburants apparaissent comme une solution alternative. Une méthode d'**émulsification** permet de transformer une graisse d'origine animale en un biocarburant et d'ainsi d'alimenter un **moteur Diesel stationnaire de cogénération**.

**Anthony KERIHUEL** est ingénieur de l'École polytechnique universitaire de Marseille (EPUM). Il est doctorant au laboratoire du département des Systèmes énergétiques et environnement (DSEE) de l'École des mines de Nantes.  
Anthony.Kerihuel@emn.fr

## 1. Contexte

Les stocks de déchets gras d'origine animale croissent faute d'emploi depuis que la législation s'est durcie suite à l'apparition de la « maladie de la vache folle » (encéphalopathie spongiforme bovine : ESB) (arrêté du 14 novembre 2000). Or, les graisses animales comme les huiles végétales ont un pouvoir calorifique voisin de celui du gazole [1] [2]. Seul problème, leurs propriétés physiques, notamment leur viscosité et leur température de fusion, bien supérieures au gazole, les rendent solides à température ambiante (tableau 1). Il est donc impossible de les utiliser dans un moteur Diesel sans les transformer au préalable. La méthode de l'émulsification permet de s'affranchir de ces difficultés tout en produisant un minimum d'émissions polluantes lors de la combustion.

La technique de l'émulsification a fait l'objet d'un dépôt de brevet français détenu par l'École des mines de Nantes qui s'intitule *Combustible liquide et procédé de production d'un tel combustible* [18]. La transformation de graisses animales en émulsion a été testée et des essais sur un moteur Diesel stationnaire ont donné de bons résultats tant au niveau des performances du moteur que des émissions polluantes.

## 2. Formation de l'émulsion

Une émulsion est un système hétérogène constitué par la dispersion, sous forme de gouttelettes, d'un liquide dans un autre, les deux liquides étant peu ou pas miscibles entre eux. Une émulsion est l'association de tels produits formant une dispersion stable

pendant un temps limité par le biais d'un tensioactif adéquat. La phase majoritaire est appelée « phase continue » et l'autre « phase dispersée ».

On parle d'émulsion « huile dans eau » (o/w), ou émulsion « directe », quand la phase dispersée est la phase huileuse et la phase continue la phase aqueuse. De même, on parle d'émulsion « eau dans huile » (w/o), ou émulsion « inverse », lorsque la phase continue est la phase huileuse. Les termes « eau » et « huile » désignent respectivement un liquide contenant des molécules hydrophiles (solution aqueuse) et hydrophobes (corps gras). Dans le cas d'un biocarburant, une émulsion inverse est appropriée.

### 2.1 Matériel

Le matériel nécessaire à l'élaboration d'une émulsion de graisse est simple et relativement peu coûteux. Il s'agit d'un **mélangeur mécanique** muni de **pâles rectangulaires**. La géométrie des pâles est choisie pour produire le maximum de contraintes. Enfin, il est essentiel de se munir d'un **système de chauffage thermostaté** afin de fournir la chaleur nécessaire au procédé.

### 2.2 Protocole

Dans le cas de l'émulsification d'une graisse animale, il s'agit dans un premier temps de rendre celle-ci liquide en apportant l'énergie thermique requise pour lui faire atteindre sa température de fusion. Ensuite, afin de réduire la viscosité de cette graisse, un alcool primaire (par exemple, méthanol, éthanol ou butanol) y est ajouté. Ce dernier a un double rôle de solvant et de cotensioactif, c'est-à-dire qu'il améliore la stabilité de l'émulsion formée en favorisant la migration du tensioactif aux interfaces graisse-eau. Le tensioactif est ajouté à son tour à la graisse et le tout est mélangé pendant un temps déterminé. Enfin, une quantité d'eau y est dispersée pour ainsi former des microgouttelettes. Les quantités de produits et les temps de mélange sont fonction du corps gras à émulsionner. L'expérience du préparateur est donc cruciale pour mener à bien cette opération.

#### Sur les graisses animales :

*Produits de charcuterie. Matières carnées de base.* [F 6 500] de G. Solignat et F. Crouseilles

#### Sur les biocarburants :

*Biocarburants.* [BE 8 550] de E. Poitrat

#### Sur l'émulsification :

*Émulsification. Élaboration et étude des émulsions* [J 2 152] de P. Brochette

*Procédés d'émulsification. Mécanismes de formation des émulsions* [J 2 152] de J.-P. Canselier et M. Poux

*Procédés d'émulsification. Techniques et appareillage* [J 2 153] de M. Poux et J.-P. Canselier

L'indice de cétane traduit la faculté d'un carburant à s'auto-inflammer dans un moteur à compression interne normalisé, en comparant le comportement de celui-ci à celui de deux hydrocarbures de référence. En outre, il représente le temps que va mettre le carburant testé à s'auto-inflammer.

**Tableau 1 – Propriétés du gazole, d'une graisse animale et d'une huile végétale (d'après [1] [2])**

Propriétés	Gazole	Graisse	Huile
Masse volumique .....(kg/m <sup>3</sup> )	840	918	904
PCI .....(kJ/kg)	42 490	39 774	37 000
Viscosité dynamique .....(cSt)	4,59	49,93	40
Indice de cétane .....	45 à 55	40 à 45	35 à 40
Point éclair .....(°C)	75	96	120
Carbone ..... (% massique)	84 à 87	73	77,6
Hydrogène ..... (% massique)	33 à 16	12,3	11,6
Oxygène ..... (% massique)	0	12,5	10,8
Soufre..... (% massique)	0,29	0	0

PCI : pouvoir calorifique inférieur

## 2.3 Tensioactif

### 2.3.1 Tension superficielle

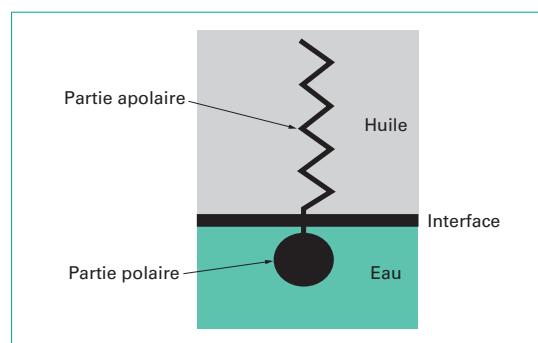
La tension superficielle d'un liquide est la grandeur qui caractérise sa faculté à mouiller la surface d'un solide. Elle s'exprime en newtons par mètre (N/m). La formation de gouttelettes émulsifiées impose la création d'une surface interfaciale importante entre les deux phases liquides. Cette surface interfaciale augmente, lorsque le diamètre des gouttelettes diminue (pour une même phase dispersée). Étant donné que tout liquide tend à réduire, autant que possible, sa surface de contact avec l'air ou avec un autre liquide non miscible, la création d'une surface interfaciale importante exige un apport d'énergie  $\Delta E$  proportionnel à la surface  $\Delta A$  et à la tension superficielle  $\gamma$  tel que :

$$\Delta E = \gamma \Delta A \quad (1)$$

Les émulsions sont donc thermodynamiquement instables et tendent à se séparer (séparation des deux phases) afin de minimiser l'aire interfaciale entre la phase aqueuse et la phase huileuse. Pour éviter ce type de phénomène, des tensioactifs sont ajoutés afin de **stabiliser la dispersion formée**. Dans notre application, cette force tend à s'opposer à la formation d'une gouttelette dispersée dans le fluide. L'utilisation d'un tensioactif permet de réduire la tension superficielle de la phase continue et de faciliter ainsi la mise en forme de l'émulsion.

### 2.3.2 Nature

La nature du tensioactif est très importante car de son pouvoir stabilisant dépend la qualité (stabilité) de la future émulsion. Un tensioactif se caractérise par une tête hydrophile qui s'oppose à une tête lipophile [17] (figure 1). L'échelle de Davies permet de classer les tensioactifs en fonction de leur affinité par un nombre compris entre 1 et 20. Ce nombre est appelé HLB (*hydrophilic-lipophilic balance*), appellation proposée par Griffin en 1949 [3] et 1954 [4]. C'est une caractéristique des surfactants, étroitement liée à la structure de leur molécule. Cette valeur est censée représenter l'équilibre entre les groupements hydrophiles et lipophiles, d'autant plus



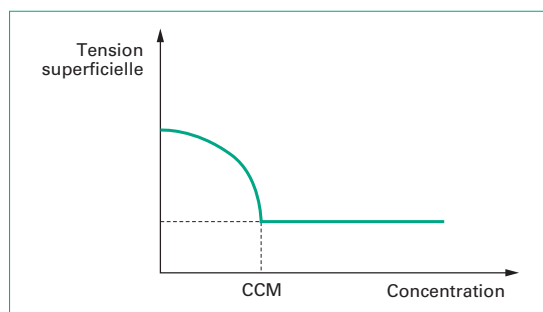
**Figure 1 – Représentation simplifiée d'un tensioactif (d'après [17])**

élevée que le surfactant est hydrophile. Autour de 10, il y a équilibre entre les caractères lipophile et hydrophile. L'intérêt de cette classification, fondée sur le nombre HLB, est qu'il est aisé de connaître, d'emblée, les propriétés des tensioactifs. Griffin a montré que les émulsionnants de l'eau dans l'huile ont un HLB compris entre 3 et 6, tandis que les émulsionnants de l'huile dans l'eau ont un HLB compris entre 8 et 18. De plus, selon lui, les valeurs HLB sont additives. Cela signifie que lorsque deux surfactants sont mélangés, le HLB du mélange prend une valeur intermédiaire entre les HLB des deux surfactants.

Selon la règle de Bancroft [5] [6], il faut choisir un tensioactif qui se dissout préférentiellement dans la phase continue de l'émulsion désirée. Pour notre application, un tensioactif lipophile, de nombre HLB bas, est donc préconisé.

### 2.3.3 Concentration

La concentration en tensioactif est très importante car elle influence la réduction de la tension superficielle du fluide. Comme le montre la figure 2, la baisse de la tension superficielle en fonction de l'augmentation de la concentration en tensioactif atteint un seuil nommé concentration critique micellaire (CCM). L'idéal est de trouver cette concentration



**Figure 2 – Évolution de la tension superficielle d'un fluide en fonction de la concentration en tensioactif**

pour obtenir un maximum de stabilité sans gaspiller un produit coûteux. De plus, une concentration trop importante en tensioactif conduit à leur agglomération en micelles qui entraîne la déstabilisation de l'émulsion. Ce phénomène est dû aux forces oscillatoires (attraction/répulsion) qui s'exercent entre les microgouttelettes de phase dispersée [7].

### 2.3.4 HLB<sub>requis</sub>

Le HLB<sub>requis</sub> d'une solution est le nombre HLB du tensioactif à ajouter qui conduit à une stabilité optimale de l'émulsion à former. L'équilibre entre le pouvoir hydrophile et le pouvoir lipophile du tensioactif correspond parfaitement aux produits en présence.

## 2.4 Cotensioactif

Le rôle du cotensioactif dans notre application est joué par l'alcool. Sa présence permet de réduire la viscosité de la phase continue. La fraction volumique de ce composé s'ajuste en fonction de la viscosité de la phase continue. Pour les graisses dont les propriétés rhéologiques sont très défavorables, il est préférable d'utiliser un alcool primaire à chaîne carbonée longue (trois carbones ou plus) puisque leur pouvoir solvant est plus élevé.

## 2.5 Vitesse de rotation

Le mélangeur est utilisé afin de mettre en forme l'émulsion. L'énergie délivrée par l'agitation de ses pâles est fonction de sa vitesse de rotation. Cette énergie permet à la dispersion de se former et à la taille des gouttelettes de se réduire.

## 3. Combustion des émulsions

L'intérêt des biocarburants étant de les utiliser dans un moteur à combustion interne, la description des mécanismes qui s'opèrent lors de la combustion d'émulsions est effectuée ici.

Les émulsions sont bénéfiques pour la combustion dans les moteurs Diesel car elles permettent, malgré leur viscosité supérieure à celle des carburants initiaux, une meilleure combustion. On entend par là qu'elle génère moins de dépôts de carbone, caractéristiques d'une combustion plus complète, et moins de rejets de NO<sub>x</sub>, tout en offrant un rendement et une consommation comparables à ceux du gazole standard [8].

## 3.1 Effet de la microexplosion

La microexplosion est le mécanisme qui survient lorsque la température des microgouttelettes de phase dispersée atteint la température de saturation de ce fluide avant même que la phase continue ne se soit évaporée. La phase dispersée se trouve donc dans un état dit métastable. Cette situation apparaît lorsqu'un fluide, inclus dans un autre fluide, ne possède pas de sites de nucléation ou qu'il n'est pas en contact avec un gaz. La microexplosion est la réaction qui conduit à une évaporation « quasi instantanée » de la phase dispersée. Ce phénomène peut avoir lieu dès que la température de saturation est atteinte mais également bien plus tard. Seule certitude, il s'est assurément produit lorsque l'on atteint la température limite de surchauffe de la phase dispersée. Cette température se définit comme la température à laquelle un fluide à une température supérieure à sa température d'évaporation, donc dans un état métastable, se transforme instantanément en vapeur sous l'action d'une nucléation homogène.

### 3.1.1 Seconde atomisation

Lors de la microexplosion, l'évaporation brusque de la phase dispersée provoque un éparpillement de la phase continue (carburant) en microgouttelettes dans la chambre de combustion que l'on appelle seconde atomisation [9]. Elle permet une combustion homogène et complète, du fait de la dispersion de plus fines gouttelettes dans tout le volume. Ce phénomène est accompagné d'un brassage de l'air avec le carburant qui conduit à une amélioration du mélange air-carburant.

### 3.1.2 Émissions de particules

L'apparition de la microexplosion permet de réduire considérablement les émissions de particules [10] [11]. Celles-ci se forment en général au cœur du jet de carburant où la richesse élevée de cette région conduit à la pyrolyse du carburant. La formation débute à partir de molécules composées de 12 à 22 carbones et un ratio H/C d'environ 2, et se termine avec des particules de l'ordre de quelques centaines de nanomètres de diamètre, composées de sphères de 20 à 30 nm de diamètre. En outre, les particules proviennent de suies formées lors de la pyrolyse du carburant et de l'agglomération de celles-ci. Or, la microexplosion permet de limiter la présence de « poches » riches dans le jet de carburant. Cela contribue donc à la réduction de la formation de suies.

## 3.2 Influence de la présence d'eau

L'ajout d'eau dans la chambre de combustion a depuis bien longtemps prouvé son efficacité afin de réduire les émissions polluantes en NO<sub>x</sub> et particules.

### 3.2.1 NO<sub>x</sub>

L'explication de ces résultats peut se faire par la chaleur latente de vaporisation élevée de l'eau qui absorbe beaucoup d'énergie et provoque donc une baisse des températures de la chambre de combustion. Or, les NO<sub>x</sub> se forment dans les régions chaudes de la flamme diffusive et dans les gaz chauds produits. On comprend donc comment la présence d'eau

### Sur les moteurs Diesel :

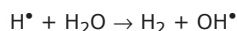
*Moteurs Diesel d'automobiles. Conception et mise au point* [B 2 575] de J.-P. Pouille

*Combustion dans les moteurs Diesel* [B 2 700] de A. Haupais  
*Moteurs Diesel : injection et chambre de combustion* [BM 2 585] de J.-L. Froment

dans la chambre de combustion réduit la formation de NO<sub>x</sub> émis dans les gaz d'échappement [12] [13] [14].

### 3.2.2 Particules

L'eau n'est pas inerte chimiquement et réagit avec les éléments présents. Par exemple, Song et coll. [15] attribuent une partie des diminutions des émissions de particules et de la formation de suie à la production de radicaux libres causée par une réaction entre l'eau et l'hydrogène :



La présence de radicaux libres provoque l'oxydation des suies et particules, ce qui permet leur diminution. En effet, la formation de suies et l'émission de particules sont dues à la combustion partielle du carburant. De cette façon, le mélange riche en oxygène se consume de façon plus complète.

## 4. Résultats expérimentaux

Une graisse de canard a fait l'objet d'une transformation en émulsion comme décrit précédemment (§ 2) afin de tester le biocarburant ainsi formé dans un moteur Diesel standard et d'en mesurer les émissions polluantes.

### 4.1 Installation expérimentale

Le moteur utilisé est un moteur Diesel monocylindre Lister Petter. Ce type de moteur est spécialement conçu à des fins expérimentales, prévu pour fonctionner à vitesse variable, comprise entre 0 et 2 500 tr/min. Durant les tests, la vitesse du moteur est gardée constante à 1 500 tr/min. Celui-ci est

refroidi par air et ses autres caractéristiques sont résumées dans le tableau 2. La pression cylindre est mesurée par un capteur piezo-électrique AVL QH32D implanté dans la culasse. La gamme de ce capteur est 0 à 200 bar pour un gain de 25,28 pC/bar. La détermination de la position angulaire est réalisée par un codeur angulaire AVL 364C fixé sur l'arbre vilebrequin. Ce type de codeur permet d'atteindre une résolution de 0,1 °V (degré vilebrequin). La gestion de cette acquisition est assurée par le logiciel Indiwin d'AVL.

Une baie d'analyse placée en sortie d'échappement permet d'étudier les principaux gaz polluants (CO, NO<sub>x</sub> et hydrocarbures). Celle-ci se compose d'un analyseur à infrarouges (Cosma) pour mesurer le monoxyde de carbone et les hydrocarbures, d'un analyseur de luminescence (Beckman) pour mesurer les NO<sub>x</sub>. La baie est complétée par un opacimètre (Hartridge) afin de quantifier la densité des fumées et ainsi de caractériser les émissions de particules. Il faut préciser que les gaz d'échappement dirigés vers la baie d'analyse sont préalablement nettoyés par un filtre (Whatman) et l'eau présente à l'état gazeux est condensée afin de ne pas fausser les résultats obtenus. Quant à l'utilisation de l'opacimètre, elle suit la procédure standard SAE J1667.

### 4.2 Résultats

Les résultats présentés dans ce paragraphe ont fait l'objet de publications internationales [1] [16]. Du gazole standard, de la graisse animale préchauffée (30 °C) et trois émulsions de cette même graisse animale ont été testés. Leurs différentes formulations sont présentées dans le tableau 3.

**Tableau 2 – Caractéristiques du moteur employé pour les essais**

Constructeur	Lister Petter
Type de carburant	4 temps, allumage par compression
Carburateur	Gazole, aspiration naturelle
Nombre de cylindres	Monocylindre
Type de refroidissement	Refroidi à air
Cylindrée	630 cm <sup>3</sup>
Alésage	95,3 mm
Course	88,9 mm
Bielle	165,3 mm
Taux de compression	18
Charge nominale	2,8 kW à 1 500 tr/min
Injection	20 °V avant le point mort haut
AOSA	36 °V
RFSA	69 °V
AOSE	76 °V
RFSE	32 °V

**AOSA** : avance à l'ouverture de la soupape d'admission  
**RFSA** : retard à la fermeture de la soupape d'admission  
**AOSE** : avance à l'ouverture de la soupape d'échappement  
**RFSE** : retard à la fermeture de la soupape d'échappement

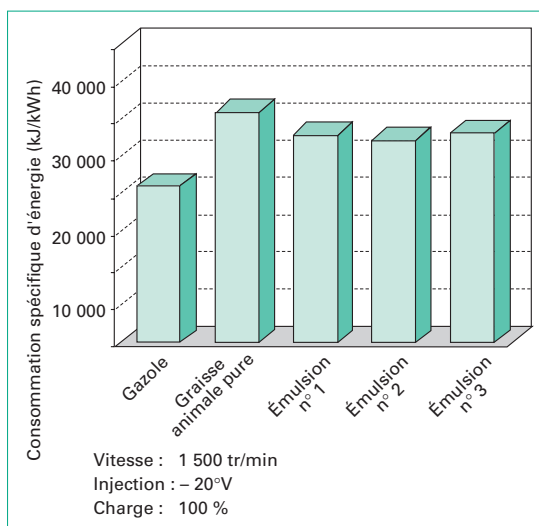
**Tableau 3 – Formulation des émulsions de graisses animales testées**

Émulsion	Eau (% vol.)	Alcool (% vol.)	Tensioactif (% vol.)	Graisse (% vol.)
1	5	5	2	88
2	10	10	2	78
3	15	15	2	68

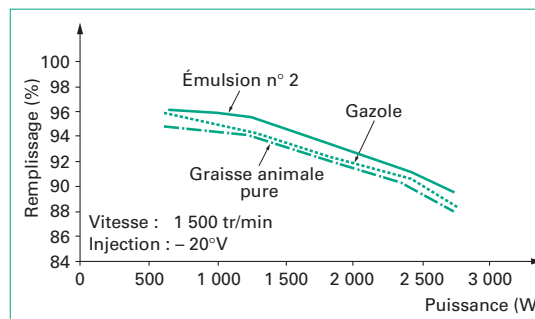
**4.2.1 Performances**

■ **Consommation spécifique d'énergie** : les consommations spécifiques d'énergie ont été calculées pour tous les carburants testés et sont lisibles sur la figure 3. L'émulsification des graisses animales améliore considérablement les résultats. La température de combustion réduite par la présence d'eau et d'alcool minimise les pertes thermiques. La rapide expansion des microgouttelettes d'eau et de méthanol lors de la microexplosion conduit à une atomisation plus fine du carburant. La combustion rendue plus complète tend à abaisser la consommation spécifique d'énergie.

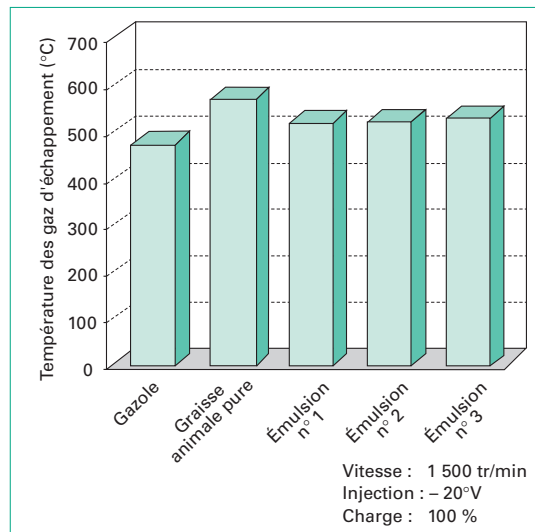
■ **Remplissage** : la figure 4 résume les valeurs du remplissage calculées pour le gazole, la graisse animale et son émulsion avec du méthanol. L'émulsion de graisse animale permet d'augmenter la valeur du remplissage. Les liquides à forte chaleur latente de vaporisation dispersés dans la graisse absorbent de la chaleur et permettent d'introduire une quantité d'air plus importante dans le cylindre. De plus, la combustion se terminant plus tôt dans le cas des émulsions, la température régnant dans la chambre de combustion est inférieure lors de l'admission de l'air. Il en résulte une amélioration du remplissage.



**Figure 3 – Variation de la consommation spécifique d'énergie pour une graisse animale et ses émulsions**

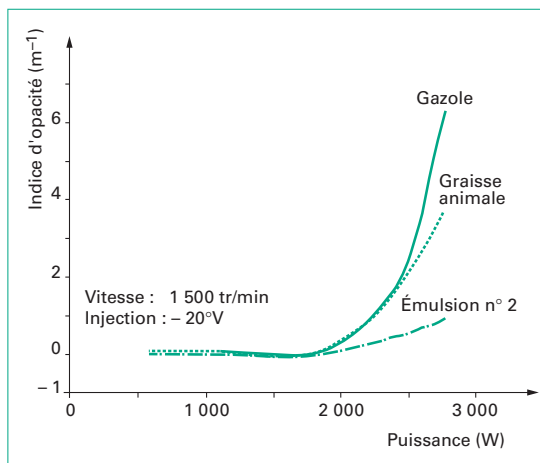


**Figure 4 – Variation du remplissage pour une graisse animale et l'émulsion n° 2**

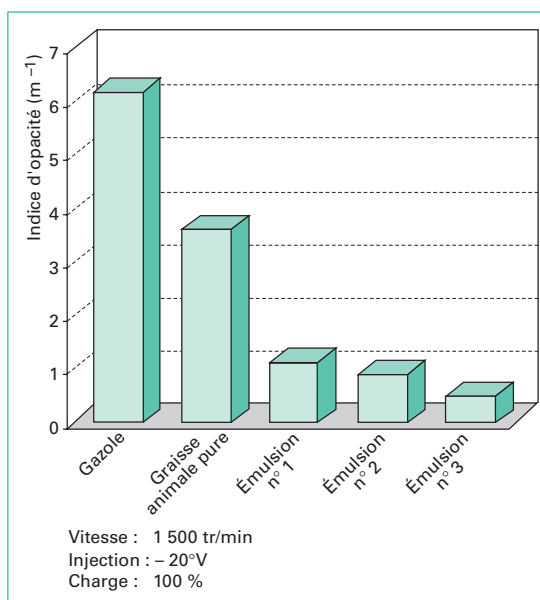


**Figure 5 – Variation de la température des gaz d'échappement avec une graisse animale et ses émulsions**

■ **Température des gaz d'échappement** : les températures mesurées au cours des essais moteurs sont résumées sur la figure 5. On constate que les températures, lors de la combustion des émulsions de graisse, sont inférieures à celle de la graisse pure. Cela résulte de la durée de combustion réduite des émulsions par rapport à la graisse pure. De plus, il est probable que l'absorption de la chaleur par l'eau et le méthanol intervienne également dans ce résultat. On remarque que l'augmentation de la proportion en eau et méthanol n'amplifie pas la réduction de la température d'échappement.



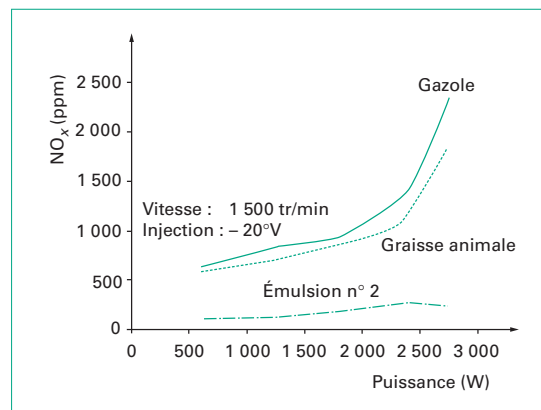
**Figure 6 – Variation de l'indice d'opacité d'une graisse animale et de l'émulsion n° 2**



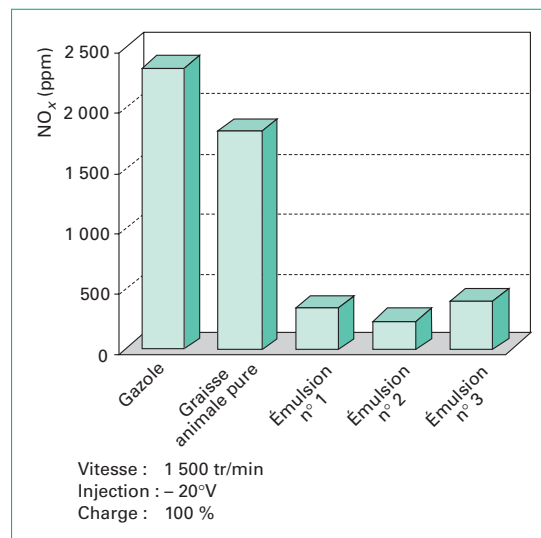
**Figure 7 – Variation de l'indice d'opacité d'une graisse animale et de ses émulsions**

#### 4.2.2 Émissions polluantes

■ **Fumées** : la densité des fumées noires chargées en particules carbonées est caractérisée à l'aide de l'indice d'opacité. Les valeurs mesurées sont présentées sur la figure 6. Il est intéressant de voir que les émulsions réduisent considérablement l'émission de fumée. Cette baisse est d'autant plus marquée que la fraction d'eau et de méthanol est importante (figure 7). La microexplosion favorise les échanges entre le carburant et l'oxygène de l'air ambiant. L'explosion brusque des gouttelettes de graisse améliore les surfaces d'échange en produisant de plus nombreuses microgouttelettes. De plus, l'ajout de méthanol, carburant oxygénant, amplifie l'oxydation



**Figure 8 – Variation de l'émission d'oxydes d'azote avec une graisse animale et l'émulsion n° 2**



**Figure 9 – Variation de l'émission d'oxydes d'azote avec une graisse animale et ses émulsions**

des particules carbonées. De cette combinaison découle une baisse significative de l'émission de fumées noires.

■ **Oxydes d'azote** : sur la figure 8 sont résumés les résultats obtenus à la suite de la combustion de nos carburants. Les émulsions réduisent de façon drastique les émissions de  $\text{NO}_x$ . La présence d'eau et de méthanol dans les émulsions réduit la température de flamme de la combustion et abaisse donc la formation des  $\text{NO}_x$ . Il est à noter que dans le cas des émulsions, la formation de  $\text{NO}_x$  est moindre malgré une phase de combustion de prémélange amplifiée. De plus, comme le prouvent les résultats présentés sur la figure 9, la baisse d'émission de ce polluant est d'autant plus prononcée que la fraction d'eau et de méthanol est grande. Cela est vrai à condition de rester dans des proportions raisonnables (< 10 % d'eau et 10 % de méthanol).

## 5. Perspectives

Cette technologie a été validée au niveau du laboratoire dans le cas de graisses animales. Il est dorénavant envisagé de la développer à l'échelle industrielle par l'élaboration d'un prototype.

## Bibliographie

### Références

- [1] KERIHUEL (A.), SENTHIL KUMAR (M.), BELLETTRE (J.) et TAZEROUT (M.). – *Investigations On a CI Engine Using Animal Fat And Its Emulsions with Water and Methanol as Fuel*. Society of Automotive Engineers, n° 2005-01-1729 (SP-1978) (2005).
- [2] SENTHIL KUMAR (M.), KERIHUEL (A.), BELLETTRE (J.) et TAZEROUT (M.). – *Investigations on the Use of Pre-heated Animal Fat as Fuel in a Diesel Engine*. Renewable Energy, 30, 1443-1456 (2005).
- [3] GRIFFIN (W.C.). – *Classification of surface-active agents by "HLB"*. Journal of The Society of Cosmetic Chemists, 1, 311 (1949).
- [4] GRIFFIN (W.C.). – *Calculation of HLB values of non-ionic surfactants*. Journal of The Society of Cosmetic Chemists, 5, 249-256 (1954).
- [5] BANCROFT (W.D.). – *The theory of emulsification*. Journal of Physical Chemistry, 5, 501 (1913).
- [6] BANCROFT (W.D.). – *The theory of emulsification*. Journal of Physical Chemistry, 6, 501 (1915).
- [7] WASAN (D.T.), NIKOLOV (A.D.) et AIMETTI (F.). – *Texture and stability of emulsions and suspensions : role of oscillatory structural forces*. Advances in Colloid and Interface Science, 108-109, 187-195 (2004).
- [8] ARMAS (O.), BALLESTEROS (R.), MARTOS (F.L.) et AGUDELO (J.R.). – *Characterization of light duty diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel*. Fuel, 84, 1011-1018 (2005).
- [9] ADIGA (K.C.) et SHAH (D.O.). – *On the vaporization behavior of water-in-oil microemulsions*. Combustion and Flame, 80, 412-414 (1990).
- [10] ANDREWS (G.E.), BARTLE (K.D.), PANG (S.W.), NUREIN (A.M.) et WILLIAMS (P.T.). – *The reduction in diesel particulate emissions using emulsified fuels*. SAE Paper, n° 880348 (1988).
- [11] BARNAUD (F.), SCHMELZLE (P.) et SCHULTZ (P.). – *AQUAZOLE : an original emulsified water-diesel fuel for heavy-duty applications*. SAE Paper, n° 011861 (2000).
- [12] BROWN (K.F.), CHADDERTON (J.), DALY (D.T.), LANGER (D.A.) et DUNCAN (D.). – *Opportunity for diesel emission reductions using advanced catalysts and water blend fuel*. SAE Paper, n° 010182 (2000).
- [13] LANGER (D.A.), PETEK (N.K.) et SCHIFERL (E.A.). – *Maximizing the effectiveness of water blended fuel in reducing emissions by varying injection timing or using after-treatment device*. SAE Paper, n° 010513 (2001).
- [14] NAZHA (M.A.A.), RAJAKARUNA (H.) et CROOKES (R.J.). – *Soot and gaseous species formation in a water-in-liquid fuel emulsion spray – a mathematical approach*. Florence World Energy Research Symposium (1997).
- [15] SONG (K.H.), LEE (Y.) et LITZINGER (T.A.). – *Effects of emulsified fuels on soot evolution in an optically-accessible DI diesel engine*. SAE Paper, n° 00012794 (2000).
- [16] SENTHIL KUMAR (M.), KERIHUEL (A.), BELLETTRE (J.) et TAZEROUT (M.). – *Effect of water and methanol fractions on the performance of a CI engine using animal fat emulsions as fuel*. ImechE Paper, Journal of Power and Energy, 219, 583-592 (2005).

### Thèse

- [17] MORANÇAIS (P.). – *Étude de la formation des émulsions dans des mélangeurs statiques. Application aux procédés de microencapsulation par polymérisation interfaciale*. École doctorale des sciences pour l'ingénieur de Nantes (1997).

### Brevet

- [18] KERIHUEL (A.), KUMAR (M.S.), BELLETTRE (J.) et TAZEROUT (M.). – *Combustible liquide et procédé de production d'un tel combustible*. N° 0410291, demande déposée le 29 septembre 2004.

### Dans les Techniques de l'Ingénieur

- BROCHETTE (P.). – *Émulsification. Élaboration et étude des émulsions*. [J 2 150], Formulation (1999).
- CANSELIER (J.-P.) et POUX (M.). – *Procédés d'émulsification. Mécanismes de formation des émulsions*. [J 2 152], Formulation (2004).
- POUX (M.) et CANSELIER (J.-P.). – *Procédés d'émulsification. Techniques et appareillage*. [J 2 153], Formulation (2004).
- SOLIGNAT (G.) et CROUSEILLES (F.). – *Produits de charcuterie. Matières carnées de base*. [F 6 500], Agroalimentaire (2003).
- POITRAT (E.). – *Biocarburants*. [BE 8 550], Génie énergétique (1999).
- POUILLE (J.-P.). – *Moteurs Diesel d'automobiles. Conception et mise au point*. [B 2 575], Machines hydrauliques et thermiques (1997).
- HAUPAIS (A.). – *Combustion dans les moteurs Diesel*. [B 2 700], Machines hydrauliques et thermiques (1992).
- FROMENT (J.-L.). – *Moteurs Diesel : injection et chambre de combustion*. [BM 2 585], Machines hydrauliques et thermiques (1999).

## Réglementation

Arrêté du 14 novembre 2000 modifiant l'arrêté du 24 juillet 1990 portant interdiction de l'emploi de certaines protéines d'origine animale dans l'alimentation et la fabrication d'aliments destinés aux animaux de l'espèce bovine et étendant cette interdiction à certaines graisses animales et pour l'alimentation d'autres animaux.

## Normalisation

SAE J1667 1996 Snap-Acceleration Smoke Test Procedure for Heavy-Duty Diesel Powered Vehicles