

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Département Génie Mécanique**

**Projet de Fin d'Etude**

**Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique**

**Thème**

**ETUDE PRELIMINAIRE DE BIOCARBURANTS EN  
VUE DE LEUR UTILISATION  
SUR LE BANC D'ESSAI MOTEUR TD43**

**Encadré par :**

**M<sup>rs</sup> M. BENBRAIKA  
S. LARBI**

**Présenté par :**

**M. GAHLOUZ**

**Promotion : 2005/2006**

10, Avenue Pasteur Hassen Badi BP 182 EL-Harrach 16200 Alger

*« La vie est ténèbre sans un désir ardent, et tout désir ardent est aveugle s'il n'y a pas connaissances, et toute connaissance est vaine s'il n'y a pas travail, et tout travail est vide s'il n'y a pas amour, et lorsque vous travaillez avec amour vous liez vous-même à vous-même, les un aux autres et à Dieu. »*

*“ Djabrane Khalil Djabrane dans le prophète”*

*A la mémoire de mon grand père, TAYEB  
je dédie ce travail*

*Je tiens à remercier mes deux promoteurs M<sup>rs</sup> M. Benbraïka et S. Larbi, pour leurs aides ainsi que pour leurs qualités scientifiques et humaines qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*Je remercie les membres de mon jury, d'avoir accepté de relire ce PFE ainsi que tout les enseignants qu'ont contribués à ma formation.*

*Je remercie mes frères, ma mère, mon père, ma grande mère, mes tantes, oncle, cousins et cousines qui mon beaucoup soutenu durant mes études.*

*Je remercie tous mes amis.*

## الموضوع : دراسة الوقود البيولوجي لغرض تطبيقه على منضدة التجارب TD43

### ملخص:

لتخفيض استهلاك الوقود، وإيجاد طاقة بديلة للحد من النتائج السلبية للغازات المفترزة في حركة المرور، لجا التقنيون إلى تطوير استخدام الوقود البيولوجي، وعملنا هذا يهدف إلى دراسة الوقود البيولوجي وتقنية تحويل الكتلة الخام البيولوجية إلى الوقود البيولوجي، تأثير خليط البيوايثانول مع البنزين على مرد ودية المحرك وكمية الإفرازات المضرة.

**الكلمات المفتاحية :** الوقود البيولوجي، الكتلة الخام البيولوجية، منضدة التجارب، مرد ودية المحرك

**Sujet :** Etude préliminaire de biocarburants en vue de leur utilisation sur le banc d'essai moteur TD43

### Résume :

Les techniciens d'aujourd'hui se trouvent désormais face à deux objectifs majeurs :

Réduire la consommation énergétique et trouver des substituants pour le carburant classique, car celui-ci est actuellement majoritairement d'origine fossile, avec des réserves épuisables. Minimiser les nuisances provoquées par la circulation automobile, plus particulièrement les émissions de polluants, directes ou indirectes, les biocarburants semblent être une solution pour ces problèmes.

Notre objectif donc, est de contribuer à l'étude des biocarburants, voir l'ensemble des technologies de transformation de la biomasse aux biocarburants, adaptation des moteurs de véhicules ainsi que les infrastructures aux biocarburants et examiner l'effet d'un mélange bioéthanol-essence sur les performances du moteur et les émissions des gaz d'échappement.

**Mots clés :** Biocarburants, biomasse, Banc d'essai, biocarburants dans le moteur

**Subject:** Preliminary study of biofuels for their use on the test bench engine TD43

### Abstract:

Actually, technicians are in challenge two major problems:

Firstly, to reduce consumption and to find a substitute of the fuel, because this one is mainly of fossil origin with reserves exhaustible. Secondly, to minimize the harmful effects caused by the motor vehicle traffic, more particularly the emissions of pollutants, direct or indirect, the biofuels seem to be a solution to these problems.

Our objective is to contribute to the study of the biofuels, to see the whole technologies of conversion of the biomass to the biofuels and adaptation of the vehicles engines as well as the infrastructures to the biofuels, finally to show the effects of a biofuels-gasoline mixture on the performances of the engine and the emissions of exhaust fumes.

**Key words:** Biofuels, conversion of the biomass, Test bench, effects of biofuels on the engine execution

## Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>i</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>ii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vii</b>
<b>Notations</b> .....	<b>ix</b>

### Introduction générale

1. Introduction .....	1
2. Objet de l'étude .....	2
Conclusion.....	3

### Chapitre I : introduction à l'étude des biocarburants

I.1 Introduction .....	4
I.2 L'intérêt d'utilisation des biocarburants .....	4
I.3 Les inconvénients d'utilisation des biocarburants .....	5
I.4 Itinéraires de conversion de biocarburants .....	5
Conclusion.....	6

### Chapitre II : Technologie des biocarburants équivalents du gazole d'origine fossile

II.1 Introduction .....	7
II.2 Biodiesel (RME).....	7
II.2.1 La biomasse.....	7
II.2.2 Technologie de conversion .....	7
II.2.3 Usage final de biocarburant .....	10
II.2.3.1 Propriétés du biocarburant.....	10
II.2.3.2 Adaptations de moteur et d'infrastructure .....	11
II.3 Équivalent de gazole dérivé par huile de pyrolyse.....	13
II.3.1 La biomasse.....	13
II.3.2 Technologie de conversion .....	13
II.3.3 Usage final de biocarburant.....	17
II.3.3.1 Propriétés de carburant.....	17

II.3.3.2 Adaptations de moteur et d'infrastructure.....	18
II.4 Équivalent de gazole dérivé par huile de HTU.....	18
II.4.1 La biomasse.....	19
II.4.2 Technologie de conversion.....	19
II.4.3 Rendement de biocarburants.....	21
II.4.3.1 Propriétés de carburant.....	21
II.4.3.2 Modifications de moteur et d'infrastructure.....	21
II.5 Diméthylether (DME).....	21
II.5.1 La biomasse.....	22
II.5.2 Technologie de conversion.....	22
II.5.3 Usage final de biocarburant.....	23
II.5.3.1 Propriétés de carburant.....	23
II.5.3.2 Adaptations de moteur et d'infrastructure.....	23
II.6 Gazole de Fischer-Tropsch.....	25
II.6.1 La biomasse.....	25
II.6.2 Technologie de conversion.....	25
II.6.3 Usage final de biocarburant.....	26
II.6.3.1 Propriétés de carburant.....	26
II.6.3.2 Adaptations de moteur et d'infrastructure.....	27
Conclusion.....	30
<b>Chapitre III : Technologie des biocarburants équivalent de l'essence d'origine fossile</b>	
III.1 Introduction.....	31
III.2 Itinéraires de gazéification.....	31
III.3 Méthanol.....	34
III.3.1 La biomasse.....	34
III.3.2 Technologie de conversion.....	34
III.3.3 Usage final du biocarburant.....	34
III.3.3.1 Propriétés de carburant.....	34
III.3.3.2 Adaptations de moteur et d'infrastructure.....	36
III.4 Éthanol.....	36
III.4.1 La biomasse.....	36
III.4.2 Technologie de conversion.....	37
III.4.3 Usage final du biocarburant.....	41

III.4.3.1 Propriétés du biocarburant.....	41
III.4.4.2 Adaptations de moteur et d'infrastructure .....	42
Conclusion.....	44

**Chapitre IV : Description du banc d'essai moteur TD 43**

IV.1 Introduction.....	45
IV.2 Généralités .....	45
IV.3 Les différents organes du banc d'essai moteur.....	46
IV.3.1 Le moteur.....	46
IV.3.1.1 Modification du taux de compression .....	46
IV.3.1.2 Protection du moteur .....	48
IV.3.1.3 Système d'allumage .....	48
IV.3.2 Dynamomètre.....	48
IV.3.3 Tachymètre .....	48
IV.3.4 Système de refroidissement du moteur.....	49
IV.3.5 Instrument de mesure.....	49
IV.3.6 Accessoires supplémentaires .....	49
IV.3.7 Spécification du banc d'essai moteur TD43 .....	49
IV.4 Les grandeurs mesurables .....	50
IV.4.1 La vitesse.....	50
IV.4.2 Le couple .....	50
IV.4.3 La puissance du frein.....	50
IV.4.4 Les températures .....	51
IV.4.5 La consommation d'air .....	51
IV.4.6 La consommation du carburant.....	52
Conclusion.....	52

**Chapitre V : Calculs théoriques des performances énergétiques des biocarburants**

V.1.Introduction.....	53
V.2. Propriétés des mélanges biocarburants-carburants fossiles.....	53
V.2.1 Le pouvoir calorifique .....	53
V.2.1.1 Pour un mélange biocarburant-essence.....	54
V.2.1.2 Pour un mélange biodiesel.....	56
V.2.2 Indice d'octane.....	57
V.2.3 Limite inférieure d'inflammabilité.....	59

---

V.3. Effet d'un mélange éthanol-essence sur les performances du moteur et des gaz.....	61
d'échappements	
V.3.1 Effet du mélange éthanol-essence sur $(m_f)$ , $(Sfc)$ , $(\eta_{th})$ .....	61
V.3.1.1 Consommation de carburant $(m_f)$ .....	62
V.3.1.2 Consommation spécifique du carburant $(Sfc)$ .....	63
V.3.1.3 Le rendement thermique $(\eta_{th})$ .....	64
V.3.2 Effet du mélange éthanol essence sur $(L)$ , $(m_a)$ et $(\eta_v)$ .....	65
V.3.2.1 La quantité d'air nécessaire $(L)$ .....	65
V.3.2.2 La consommation massique d'air $(m_a)$ .....	67
V.3.2.3 Le rendement volumique $(\eta_v)$ .....	68
V.3.3 effet du mélange éthanol-essence sur les produits de combustion $(CO_2)$ , $(CO)$ .....	69
Conclusions .....	71
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>72</b>
<b>Perspectives.....</b>	<b>73</b>
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexes</b>	

**Liste des figures et des tableaux**

Figure I.1	Biocarburants comme carburants sans CO <sub>2</sub> .....	4
Figure I.2	Les itinéraires de conversion pour les plus importants..... carburants des moteurs de véhicules et les biocarburants	6
Figure II.1	Arrangement général de processus de conversion pour ..... la production de biodiesel à partir des huiles végétales	9
Figure II.2	Processus de conversion et d'utilisation du biodiesel.....	13
Figure II.3	Arrangement général de processus instantané de pyrolyse (avec un réacteur) ....	15
Figure II.4	Arrangement de processus de conversion d'hydro thermal upgrade (HTU).....	20
Figure II.5	Unité pour l'extraction de l'huile du tournesol 80 litres/heure .....	28
Figure II.6	Unité pour l'extraction de l'huile du tournesol, 13 litres/heure .....	28
Figure II.7	Station de production d'électricité à huile du tournesol 300 kva .....	28
Figure II.8	Motopompe à huile végétale.....	28
Figure II.9	Générateur 9 kva à huile de tournesol .....	29
Figure II.10	Chaudière à huile de colza.....	29
Figure II.11	Massey-Ferguson moteur à biodiesel.....	29
Figure II.12	Moteur à huile de palme 7ch.....	29
Figure III.1	Processus de gazéification et de synthèse générales de la biomasse .....	31
Figure III.2	Vue schématique d'un lit fluidisé .....	32
Figure III.3	Processus de conversion et de production de bioéthanol à partir de grain.....	37
Figure III.4	Processus de conversion et d'utilisation de bioéthanol.....	38
Figure III.5	Voies générales de la fermentation de la matière cellulosique à l'éthanol .....	39
Figure III.6	Unités pour la production de méthanol, Digesteur pour la..... transformation de déchets des animaux aux biométhane et engrais	43
Figure III.7	Exemple d'application d'éthanol sur le moteur, ..... Tracteur Ronault 100 ch avec de l'éthanol	43
Figure IV.1	Banc d'essai TD 43 .....	46
Figure IV.2	Courbe d'étalonnage pour un fonctionnement essence .....	47
Figure IV.3	Courbe d'étalonnage pour un fonctionnement diesel .....	47
Figure IV.4	Courbe d'étalonnage pour le débit d'air .....	51
Figure V.1	Effet du biocarburant sur le pouvoir $(PCI)_b$ (essence).....	55
Figure V.2	Effet du biocarburant sur le pouvoir $(PCI)_b$ (gazole).....	56
Figure V.3	Effet du biocarburant sur l'indice d'octane recherché.....	58

Figure V.4	Effet du biocarburant sur l'indice d'octane moteur.....	59
Figure V.5	Effet de biocarburant sur ( $L_{ib}$ ).....	61
Figure V.6	Effet de l'addition d'éthanol sur ( $m_f$ ).....	62
Figure V.7	Effet de d'addition d'éthanol sur ( $Sfc$ ).....	63
Figure V.8	Effet de l'addition d'éthanol sur le ( $\eta_g$ ).....	64
Figure V.9	Effet de l'addition d'éthanol sur ( $L$ ).....	65
Figure V.10	Effet de l'addition d'éthanol sur ( $m_a$ ).....	67
Figure V.11	Effet de l'addition d'éthanol sur ( $\eta_v$ ).....	69
Figure V.12	Effet de l'addition d'éthanol sur l'émission de CO <sub>2</sub> et CO.....	70

### Liste des tableaux

Tableau II.1	Propriétés du biodiesel RME comparées au gazole .....	10
Tableau II.2	Propriétés de démithylether, comparées au gazole .....	23
Tableau II.3	Propriétés de carburant de gazole de Fischer-Tropsch, comparées au gazole .....	27
Tableau III.1	Propriétés de méthanol, comparées à l'essence.....	35
Tableau III.2	Propriétés de carburant d'éthanol, comparées à l'essence .....	41
Tableau IV.1	Spécification du banc d'essai TD43 .....	50
Tableau V.3	Indice de mélange de biocarburants et leurs dérivés .....	57
Tableau V.5	$L_i$ des carburants .....	60

## Notations

$L_r$	La quantité d'air réellement disponible pour la combustion d'un kilogramme de Carburant,	(kg air/kg comb)
$L$	La quantité théorique d'air nécessaire pour la combustion d'un kilogramme de Carburant,	(kg air/kg comb)
$L_i$	La limite inférieure d'inflammabilité,	(% volume)
$L_{ib}$	La limite inférieure d'inflammabilité du mélange	(% volume)
$P_f$	Puissance du frein,	(kw)
$Sfc$	Consommation spécifique du carburant,	(kg/ kw.h)
$(PCI)_b$	Le pouvoir calorifique inférieure du mélange carburant,	(kJ/ kg)
$m_a$	Le débit massique d'air,	(kg/h)
$m_f$	Le débit massique du carburant,	(kg/h)
$N$	Vitesse de moteur,	(t/mn)
$P_a$	Pression atmosphérique,	(Pa)
$V$	Le volume de carburant,	(ml)
$R$	Constante d'air,	(J/kg.K)
$C_f$	Le couple du frein,	(N.m)
$t_{cycle}$	Le temps de cycle,	(s)
$T_a$	La température ambiante,	(K)
$x_i$	Fraction de volume d'un composant donné dans le mélange carburant,	(% volume)
$V_s$	Le volume à balayer,	(m <sup>3</sup> )
$\eta_{th}$	Le rendement thermique de frein,	(%)
$\eta_v$	Le rendement volumétrique,	(%)
$\rho_i$	Densité du composant donné dans le mélange carburant,	(kg /l)
$\rho_b$	Densité du mélange carburant,	(kg /l)
$\alpha$	Coefficient d'excès d'air	

# Introduction générale

## 1. Introduction

La crise pétrolière des années 70 et le rapport du club de Rome en 1997 sur l'épuisement de certaines ressources d'énergie ont suscité une prise de conscience sur les ressources d'énergie ( pétrole et gaz naturel) qui sont épuisables et devraient être employés avec soin.

Une deuxième perspicacité qui a surgi dans cette période était celle des pays qui n'ont pas eu un grand approvisionnement en ressources naturelles à leur disposition, et qui dépendaient en grande partie des pays qui ont eu accès à ce grand approvisionnement. La plupart des pays appartenant au dernier groupe sont réunis dans l'organisation des pays exportateurs de pétrole l'OPEP. D'un autre côté, il y a l'agence d'énergie internationale AEI, dans laquelle les pays qui n'ont pas accès à un grand approvisionnement en ressources naturelles sont unis, dans le but de réduire la dépendance de l'importation d'énergie des pays de l'OPEP. Réaliser ce but, AEI devrait améliorer la coopération et l'échange d'information entre les pays qui ont eu des programmes nationaux dans la recherche, le développement et le déploiement des biocarburants [1].

L'utilisation des biocarburants dans les moteurs de véhicule a été connue depuis longtemps, mais leur production et leur utilisation s'est développée seulement les trente dernières années. La recherche dans le domaine des biocarburants est actuellement dirigée de manière à améliorer les technologies de conversion, explorer les potentiels techniques et économiques de la biomasse [2].

Plusieurs éléments sont susceptibles d'avoir une influence plus ou moins directe sur le calcul de la compétitivité économique des biocarburants, tels que l'évolution des cours des matières agricoles et des co-produits. Les cours des matières premières agricoles pèseront d'autant plus sur l'économie des biocarburants qu'ils peuvent évoluer selon des dynamiques différentes de celles du marché de l'énergie. A ce titre, un exemple peut être rappelé, les variations du cours mondial du sucre ont eu et continueront d'avoir un impact important sur le programme de développement du bioéthanol au Brésil.

Au début des années 1990, la conjonction des cours faibles du pétrole et élevés du sucre a orienté la valorisation de la canne à sucre vers le marché alimentaire et créé une situation de pénurie pour le bioéthanol [3].

La consommation mondiale de biocarburants est dominée par les pays qui ont pris historiquement des mesures incitatives pour le développement de ces filières : Brésil et États unis pour l'éthanol, France, Allemagne et Italie pour les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) fabriqués à partir des huiles végétales brutes (HVB). Ces mesures se caractérisent souvent par une volonté politique de soutien à l'agriculture [3].

Les pays qui ont pris des mesures initiatives aussi pour l'utilisation des biocarburants, le Tchad et le Mali utilisent l'huile de coton comme carburants pour la production d'électricité, la Nouvelle Zélande produit de l'électricité à partir de l'huile de tournesol et les Etats unis travaillent pour que dans les 20 prochaines années 30% de leur consommation énergétique provienne des biocarburants, notre pays pourra tirer avantage en transformant les fruits à pépins (dattes, amandes) en biodiesels pour réduire la consommation énergétique d'origine fossile [4].

Bien que les perspectives sur les développements technologiques, le coût et la disponibilité commerciale prévue de ces biocarburants change sans interruption, il peut être énoncé qu'ils ne seront pas probablement produits et ne seront pas appliqués avant 2010. Actuellement, seulement l'éthanol et son dérivé ETBE, produits à partir des récoltes vivrières et le biodiesel principalement l'ester méthylique des graines de colza sont appliqués sur une base commerciale sur le marché [1].

## 2. Objet de l'étude

Après avoir déployé, pendant près d'un siècle, des trésors d'ingéniosité pour produire des véhicules à hautes performances, fiables, confortables et sûrs, les techniciens de l'automobile se trouvent désormais face à deux objectifs majeurs :

- Réduire la consommation et trouver de substituant pour le carburant, car celui-ci est actuellement majoritairement d'origine fossile, avec des réservoirs épuisables
- Minimiser les nuisances provoquées par la circulation automobile, plus particulièrement les émissions de polluants.

Comme les technologies alternatives des biocarburants et des moteurs sont toujours dans l'étape de développement. C'est sur ce contexte que débouche notre étude.

Notre objectif donc consiste à contribuer à l'étude des biocarburants les plus répandus, ainsi que l'usage de conversion de la biomasse. Nous étudierons aussi l'ensemble des

technologies de transformation de la biomasse aux biocarburants, les modifications que nous pouvons porter sur les moteurs des véhicules ainsi que les infrastructures afin de recevoir un biocarburant sans aucun endommagement. Finalement on a affaire à une possibilité d'application d'un mélange éthanol-essence, le plus connu sur le marché d'aujourd'hui, sur un banc d'essai moteur TD43.

Le présent travail est reparti comme suit :

- La définition des différents biocarburants, les itinéraires de conversion, travail qu'on détaillera dans le chapitre intitulé : « Introduction à l'étude des biocarburants » ;
- La technologie de conversion de la biomasse, adaptation de moteurs à allumage spontané, travail qu'on détaillera dans le chapitre intitulé : « Technologie des biocarburants équivalents du gazole d'origine fossile » ;
- La technologie de conversion de la biomasse, adaptation de moteur à allumage par étincelle, travail qu'on détaillera dans le chapitre intitulé : « Technologie des biocarburants équivalents de l'essence d'origine fossile » ;
- La définition des différents organes du banc d'essai moteur, les différents critères de performances, travail qu'on détaillera dans le chapitre intitulé : « Description du banc d'essai moteur TD43 » ;
- Effet d'un mélange éthanol-essence sur les performances d'un moteur, et les émissions des gaz d'échappement, travail qu'on détaillera dans le chapitre intitulé : « Calculs théoriques des performances énergétiques des biocarburants » ;

## **Conclusion**

Les biocarburants sont des énergies renouvelables, ils assurent la diversification énergétique et la réduction de la dépendance en énergie, mais leur utilisation dans des moteurs de véhicules, l'exploration des potentiels techniques de la biomasse est toujours dans la phase de développement.

Notre travail constitue une contribution à l'étude des technologies des biocarburants liquides, ainsi que les différentes précautions à prévenir pour une application fiable d'un biocarburant sur le banc d'essai moteur TD43 et des moteurs de véhicules en général.

# Chapitre I

## Introduction à l'étude des biocarburants

## I.1. Introduction

A la fin du dix-neuvième siècle les biocarburants étaient à l'état expérimental. Pendant le vingtième siècle d'autres carburants, à savoir l'essence et gazole dérivé du pétrole brut ont été le centre d'intérêt d'utilisation que les biocarburants ont été seulement employés à un échelle très petite dans le secteur du transport. De nos jours, l'essence et le gazole sont les carburants toujours les plus utilisés dans les véhicules mais l'intérêt aux biocarburants a augmenté, grâce à la culture environnementale de ce siècle [1].

## I.2. L'intérêt d'utilisation des biocarburants

Les biocarburants font partie des activités de recherches et de développement. De par leur composition oxygénée, ils peuvent améliorer la combustion des hydrocarbures et réduire certaines émissions, car ils ne donnent pas de «CO<sub>2</sub>» ou encore pour améliorer les capacités lubrifiantes des carburants, ainsi qu'ils assurent la sécurité d'approvisionnement des pays consommateurs d'énergie.

En ce qui concerne l'amélioration des produits, les biocarburants ont été utilisés comme additifs pour améliorer la qualité des carburants appliqués dans les véhicules routiers. L'application croissante des biocarburants dans le transport a été également stimulée par des buts environnementaux sur l'émission d'anhydride carbonique «CO<sub>2</sub>» qui a été fixée par des gouvernements nationaux et des accords internationaux, comme le Protocole de Kyoto en 1997.

Les biocarburants peuvent jouer un rôle important en réduisant ces émissions de «CO<sub>2</sub>», comme cela est schématisé sur la figure I.1.

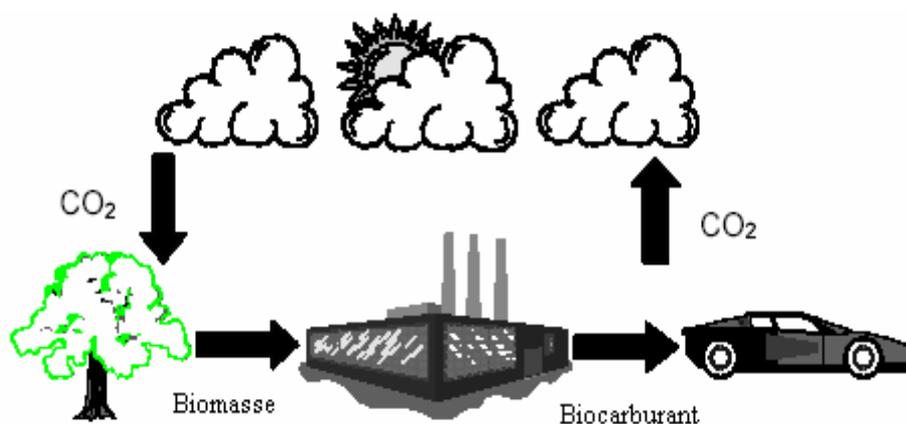


Figure I.1. Biocarburants comme carburants sans CO<sub>2</sub> [1]

Les biocarburants sont produits à partir de la biomasse qui est à l'origine de la matière végétale. Le CO<sub>2</sub> dégagé à l'atmosphère quand la matière végétale est convertie en énergie sera recyclé par les récoltes pendant leur vie et leur croissance au moyen de la photosynthèse.

Les avantages des biocarburants sont bien connus, comme alternatives au pétrole dans le secteur de transport et un bilan environnemental amélioré. Sur ce dernier point, c'est surtout pour leur aptitude à réduire les émissions de gaz à effet de serre GES que leur usage à grande échelle est aujourd'hui envisagé. Utilisé pur, le gain en termes de rejet de GES peut aller de 60 à 90 % pour les filières les plus efficaces (filière cannes à sucre). Ce gain est d'ailleurs du même ordre de grandeur en termes de consommation d'énergie fossile en comparaison avec les carburants pétroliers [1].

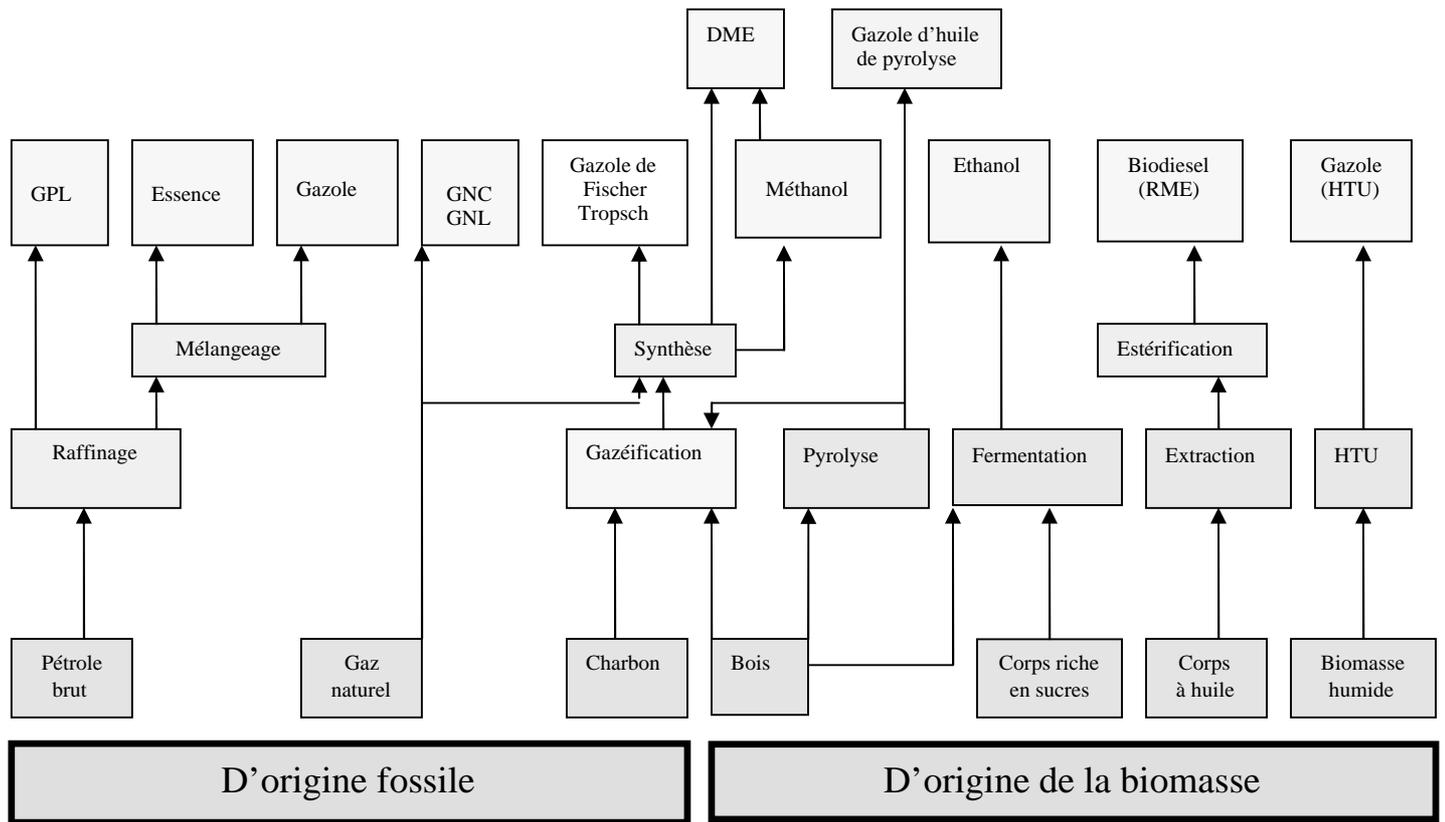
### **I.3. Les inconvénients d'utilisation des biocarburants**

Le principal inconvénient est le coût des filières. Les rendements à l'hectare des principales filières sont relativement faibles : 1 tep/he pour l'EMHV issu de colza ou de tournesol, 1 à 2 tep/he pour l'éthanol ex-blé ou maïs et, enfin, 3 à 4 tep/he pour l'éthanol ex-betterave et ex-canne à sucre. De plus, un certain nombre de contraintes agronomiques font que toutes les espèces ne peuvent être cultivées sur toutes les terres dans les mêmes conditions. En conséquence, le développement massif des biocarburants entraînera une concurrence avec la filière alimentaire pour l'usage des terres.

Enfin, le coût de production des biocarburants est supérieur au prix des carburants fossiles, même si dans le contexte actuel de prix élevé des cours du baril, l'écart se réduit. On notera les coûts particulièrement bas de l'éthanol au Brésil, dès aujourd'hui compétitif avec les carburants pétroliers [2].

### **I.4. Itinéraires de conversion de biocarburants**

Dans cette vue d'ensemble, seulement les biocarburants liquides qui peuvent être employés à la place d'essence et de gazole dans les moteurs à combustion interne qui seront décrits par la suite.



**Figure I.2.** Les itinéraires de conversion pour les plus importants carburants des moteurs de véhicules et les biocarburants [5]

**Conclusion**

L'essence et le gazole d'origine fossile (pétrole brut) sont actuellement les carburants dominants pour les moteurs des véhicules, le gaz de pétrole liquéfié (GPL), un sous-produit du traitement de pétrole brut, et le gaz naturel, sous forme de gaz naturel comprimé (GNC) ou de gaz naturel liquéfié (GNL), ont des émissions de « CO<sub>2</sub> » inférieures.

Pour des carburants produits à partir de la biomasse, les divers itinéraires de conversion sont disponibles, ils se distinguent des différents types de matières de base (biomasse), c'est-à-dire la biomasse boisée, récoltes riches en sucre, plantes oléagineuses, et biomasse humide. Dans la figure ci-dessus, on indique seulement les biocarburants qui seront discutés par la suite. Ces processus de conversion et les caractéristiques des biocarburants résultants seront décrits avec plus de détail dans les prochains chapitres.

## Chapitre II

Technologies des biocarburants  
équivalents du gazole d'origine fossile



## **II.1. Introduction**

L'inventeur du moteur diesel (Rudolph Diesel) a mis au point son moteur avec de l'huile d'arachide et de nombreux exemples d'utilisation étendue à plus ou moins grande échelle, au niveau mondial, ont déjà été réalisées avec de l'huile de colza, tournesol, palme, coton, etc....

Dans le présent chapitre nous décrirons les différents itinéraires de conversions directes de la biomasse ainsi que les caractéristiques de biocarburant qui seront comparées à ceux du carburant d'origine fossile qu'il peut remplacer. Les adaptations d'infrastructure requise pour l'application d'un biocarburant spécifique sur le moteur seront discutées.

## **II.2. Biodiesel (RME)**

Le biodiesel est produit à partir d'huiles végétales, qui peuvent être dérivées des plantes oléagineuses. Les huiles végétales ont déjà été employées pendant longtemps comme carburant, les applications de conversion de la biomasse aux huiles végétales comme carburant pour les moteurs des véhicules est semblable à la production d'huiles végétales pour l'industrie alimentaire, ce qui est un processus bien établi. Puisque les huiles végétales utilisées pour la production de biodiesel sont principalement dérivées des graines de colza, cette section se concentrera sur ce type de biodiesel, ester méthylique de graine de colza (RME).

### **II.2.1. La biomasse**

Les huiles végétales qui sont employées pour la production de biodiesel peuvent être extraites à partir des graines ou pulpe de plusieurs plantes oléagineuses. Les sources les plus importantes pour la production d'huile végétale sont les graines de colza, soja et tournesol. Pour la production de 1 tonne de RME, environ 2.5 tonnes de graine de colza est nécessaire, ce qui exige une aire de terre de 0.77 hectare [6].

### **II.2.2. Technologie de conversion**

Pour la production du biodiesel, des huiles végétales sont extraites à partir des graines oléagineuses serrées mécaniquement (figure II.2) ou bien extraire avec des dissolvants, comme l'hexane. La dernière technologie a comme conséquence un plus grand rendement. Des huiles végétales peuvent être employées directement en tant que carburants de moteur diesel, mais ceci exige des modifications dans le moteur car certaines de leurs propriétés sont moins avantageuses pour cette application.

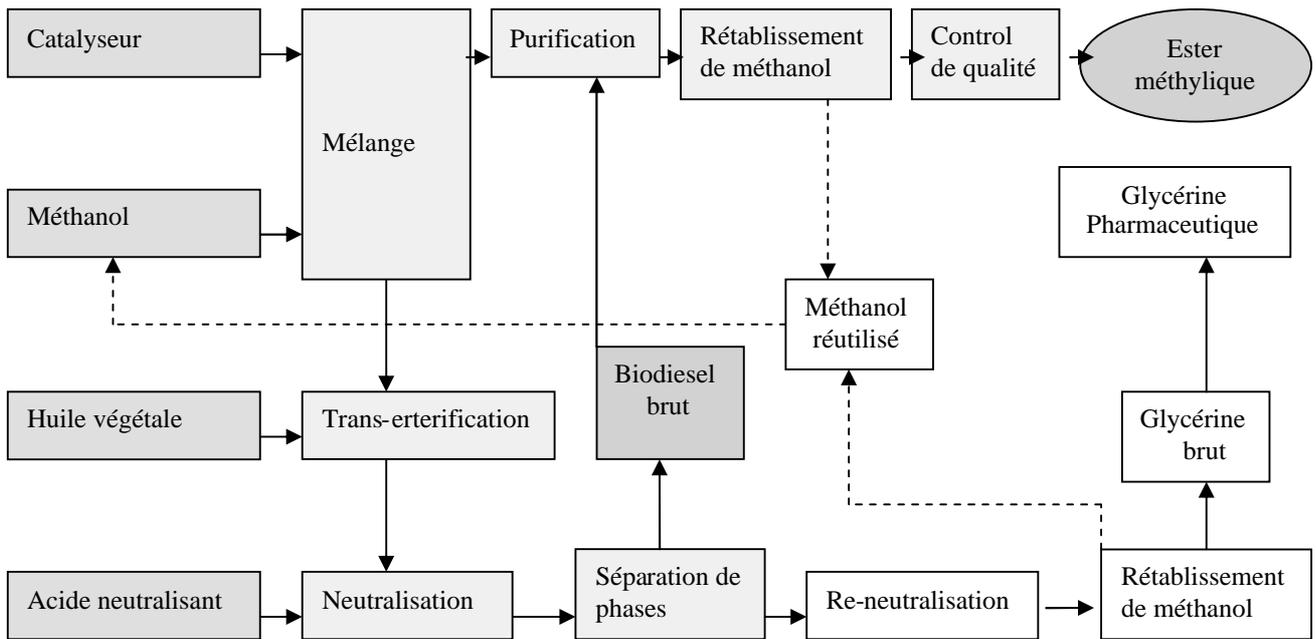
Les problèmes principaux sont leur viscosité très élevée, ainsi que leur stabilité thermique et hydrolytique faible. D'ailleurs, l'indice de cétane des huiles végétales est bas, (entre 33 et 43) ce qui indique qu'ils ont des qualités d'allumage moins favorable.

Pour surmonter les problèmes mentionnés ci-dessus et rendre les huiles végétales appropriées aux moteurs des véhicules routiers, les huiles doivent être adaptés de telle manière qu'ils répondent aux exigences des moteurs diesels courants, particulièrement en ce qui concerne la viscosité et l'indice de cétane par trans-estérification. Ceci signifie que les grandes, structures de molécule d'huiles embranchées (triglycérides) sont transformées en petites molécules droites enchaînées (esters méthyliques) qui sont semblables aux composants gazole d'origine fossile.

L'ester méthylique produit à partir l'huile végétale de grain de colza est appelé ester méthylique (RME). La majorité des esters méthyliques est produite par la trans-estérification catalytique d'huile avec du méthanol. Ici, les triglycérides d'huile végétale réagissent avec du méthanol en présence de catalyseur, ayant pour résultat la production des esters méthyliques (biodiesel). Ce processus a lieu dans un système de réacteur à basse température entre 50 et 66 °C et à une pression autour de 1.4 bar.

Les étapes générales de ce processus de conversion sont indiquées sur la figure II.1

La première étape dans ce processus est de mélanger le méthanol avec le catalyseur, qui est habituellement l'hydroxyde de sodium (soude caustique) ou l'hydroxyde de potassium (potasse). Le méthanol excessif est ajouté pour assurer toute la conversion des triglycérides des esters, ce réagit d'abord avec des acides gras libres présentés dans l'huile, menant à la formation de savon. Le mélange de catalyse-méthanol est introduit dans une enceinte fermée de réacteur, qui empêche la perte d'alcool. Ainsi l'huile végétale est ajoutée au réacteur, le mélange de la réaction est laissé dans l'enceinte pendant 1 à 8 heures. Les concentrations des acides gras libres et l'eau dans le mélange ne doivent pas être trop hauts, ceci peut poser des problèmes en ce qui concerne la formation de savon et la séparation du sous-produit de glycérine.



**Figure II.1.** Arrangement général de processus de conversion pour la production de biodiesel à partir des huiles végétales [7]

Après que la conversion d'huiles végétales des esters ait eu lieu, le mélange est neutralisé d'abord en ajoutant des acides. Le méthanol est éliminé ou récupéré pour sa réutilisation dans le processus. Le mélange se compose maintenant de deux produits principaux « esters méthyliques » et « glycérine ». Ils forment deux couches dans l'enceinte de réaction, parce que la glycérine est plus lourde que les esters méthyliques. La glycérine est séparée des esters méthyliques et les savons présents dans la glycérine sont neutralisés, les sels résultant de ce processus de neutralisation sont parfois récupérés comme engrais.

La glycérine brute peut être employée dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique. Après avoir été séparés de la glycérine, les esters méthyliques sont purifiés au moyen d'un lavage, le catalyseur résiduel et les savons sont enlevés. Des esters produits de cette façon ont une pureté d'environ 98% de quantités. Ceci peut être amélioré plus loin par distillation. Le produit final est un liquide de couleur jaune avec une viscosité fortement réduite. Ce biodiesel a également des propriétés de stockage meilleures à long terme et les huiles végétales originales peuvent être employées comme carburant dans des moteurs diesel [8] [9] [10].

### II.2.3. Usage final de biocarburant

#### II.2.3.1. Propriétés du biocarburant

Puisque la viscosité, la densité et l'indice de cétane de (RME) sont semblables à ceux du gazole, les huiles végétales estérifiées conviennent bien à l'application dans des moteurs diesel.

Dans le tableau .II.1, Les paramètres correspondant au biodiesel sont énumérés pour (RME) et comparés à ceux du gazole fossile.

**Tab II.1.** Propriétés du biodiesel comparées au gazole [6]

Propriétés du carburant	Biodiesel (RME)	Gazole
Formule chimique	Méthyle ester	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
Masse moléculaire (kg/kmol)	296	170-200
Nombre de cétane	54	50
Masse volumique (kg/l) à 15°C	0.88	0.84
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/kg) à 15°C	37.3	42.7
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/l) à 15°C	32.8	35.7
Rapport stoechiométrique (kg air/kg fuel)	12.3	14.53
Contenu en oxygène (%)	9.2-11.0	0-0.6
Viscosité cinématique (mm <sup>2</sup> /s) à 20°C	7.4	4
Point d'inflammabilité (°C)	91-135	77

Les problèmes concernant l'application d'huiles végétales ordonnées dans les moteurs diesel (Moteurs à allumage spontané) peuvent être surmontés largement en convertissant les huiles dans les esters, ce processus a comme conséquence une réduction remarquable de viscosité, à savoir de 50 à 86 mm<sup>2</sup> /s pour les huiles végétales et 7.4 mm<sup>2</sup> / s pour RME. Cependant, la viscosité de RME est toujours deux fois la valeur de carburant gazole, ceci affecte l'atomisation du carburant pendant l'injection au-dessous d'une température de 0°C.

Les problèmes se produisent avec l'approvisionnement du réservoir en biodiesel et le comportement de démarrage à froid du moteur, ces problèmes peuvent être résolus par le chauffage du carburant ou le rajout des additifs pour renforcer l'écoulement, la table indique un indice de cétane plus élevé pour RME comparé au gazole régulier, ceci dénote une bonne qualité d'allumage qui mène à une réduction d'émission de moteur. Le rapport stoechiométrique (air/carburant) est légèrement inférieur pour RME, ce qu'indique aussi que moins d'air est nécessaire pour brûler la même quantité de carburant.

Un inconvénient de la combustion de RME, est que sa densité est légèrement plus haute que celle du gazole, cette densité plus élevée compense sa teneur en énergie réduite (le pouvoir calorifique inférieure). Le pouvoir calorifique est plus bas, ce qui est du à la teneur en oxygène beaucoup élevée dans RME comparé au gazole.

Puisque les véhicules utilisant RME ont, sur une base d'énergie, la même consommation de carburant que ceux qui fonctionnent par le gazole, cette teneur en énergie inférieure mène à une consommation de carburant plus élevée. Le RME diffère également du gazole régulier en ce qui concerne quelques propriétés, l'une d'entre elles est le point d'inflammabilité du carburant, qui est principalement importante pour la manipulation d'un carburant. Le RME doit être chauffé à une température plus élevée que le gazole pour qu'il devienne sous forme de vapeur. Une propriété écologiquement favorable du biodiesel est sa biodégradabilité élevée, cependant, la biodégradabilité élevée signifie également que le carburant est moins stable, ce qui est désavantageux en ce qui concerne le stockage.

### **II.2.3.2. Adaptations de moteur et d'infrastructure**

Certaines propriétés de RME sont semblables comparées à celles de gazole, donc il peut être mélangé au gazole d'origine fossile dans toute proportion pour l'application dans les moteurs diesel conventionnels. Cependant, pour l'utilisation de RME à 100%, un certain nombre de changements relativement petits dans les moteurs sont exigés, l'incompatibilité matérielle avec quelques éléments de moteur devrait être prise en considération, car RME montre des produits chimiques agressives en vers les matériaux métalliques, les joints en caoutchouc, les enduits et les élastomères, bien qu'il peut être mélangé au gazole fossile dans n'importe quel rapport, les fabricants de voiture recommandent souvent des faibles proportions de RME, par exemple 5%, une raison pour que les émissions de  $\text{NO}_x$  n'excèdent pas la barre maximum. D'ailleurs la longévité du moteur ne peut pas être garantie si le moteur fonctionne avec n'importe quel autre carburant autre que celui pour lequel est destiné.

La figure II.2. Montre un schéma explicatif du processus de conversion et d'utilisation du biodiesel

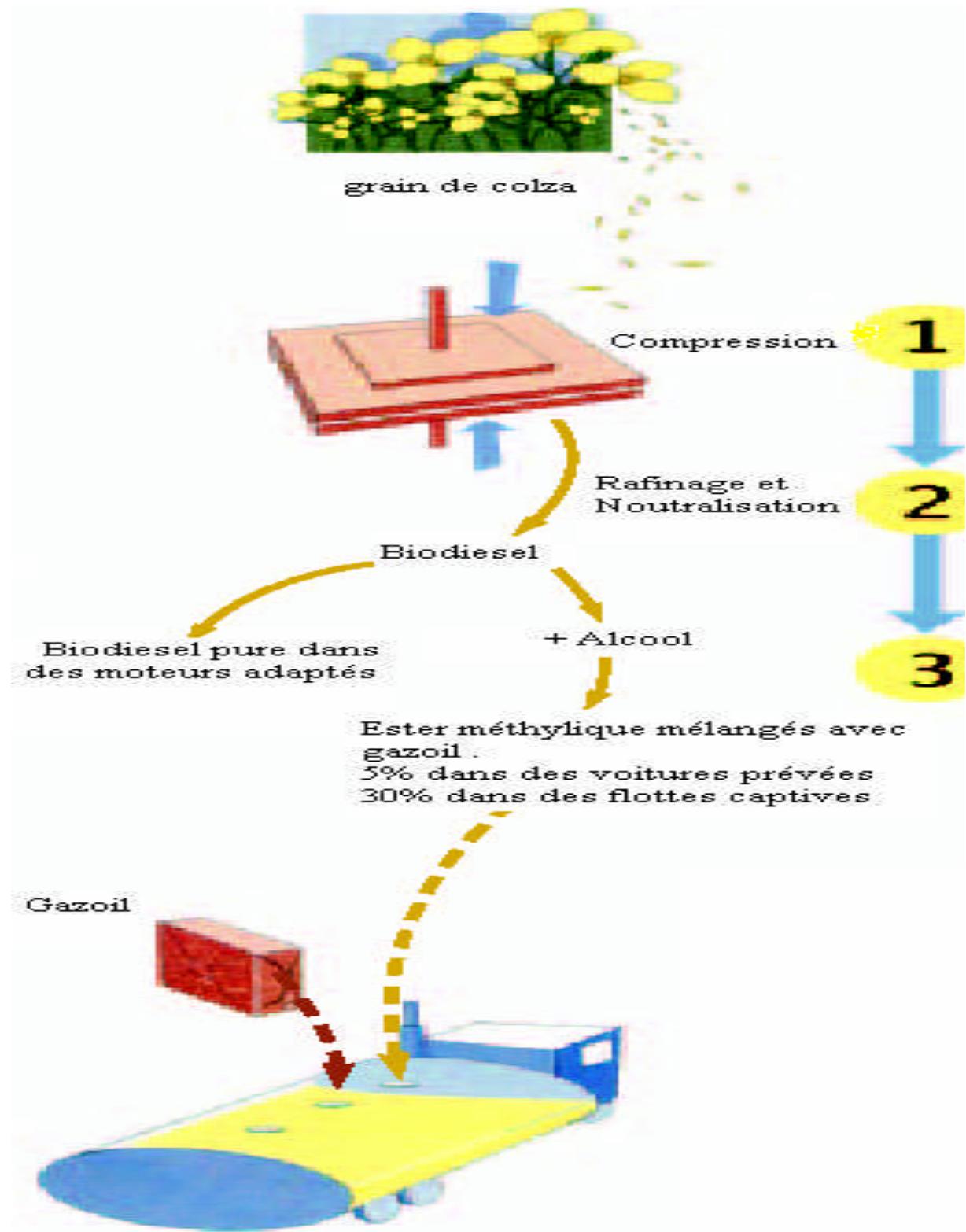


Figure II.2. Processus de conversion et d'utilisation du biodiesel

Puisque le RME peut être mélangé avec le gazole d'origine fossile, le carburant peut être distribué et lancé sur le marché à condition que l'infrastructure gazole existante soit changée, cependant on devrait tenir compte de fait que le minimum de la teneur en énergie volumétrique de RME a comme conséquence un plus grand volume à transférer. Les matériaux de construction doivent être prévus aussi, des matériaux résistants doivent être employés dans les installations et les réservoirs de stockage.

Le RME se dégrade lors de l'exposition à l'air, le carburant doit être isolé de l'oxygène, l'entrée de l'eau devrait également être évitée, puisque l'eau détruit l'ester-tringlerie entre l'alcool et les composants d'acide dans les esters méthyliques du biodiesel, ce qui cause une déchlorure qui se forme dans le réservoir de stockage. Le bidon de RME doit être stocké dans un endroit foncé et frais. Cependant, aux basses températures, le biodiesel commence à se cristalliser et se solidifier. Une fois réchauffé à la température ambiante, l'huile reprend sa forme originale, le stockage à plus long terme est défavorable [6] [8] [10].

### **II.3. Équivalent de gazole dérivé par huile de pyrolyse**

L'huile de pyrolyse est produite par pyrolyse instantanée appelée processus de conversion. La pyrolyse signifie que la biomasse est thermiquement convertie en absence d'oxygène, avec ce processus, un liquide est produit comme intermédiaire pour une grande variété d'applications, par exemple comme matière première pour la production d'un produit qui remplace le gazole.

#### **II.3.1. La biomasse**

N'importe quel type de biomasse peut être employé pour des procédés de pyrolyse, mais la biomasse lignocellulosique est préférée. Avant que la matière puisse être ajoutée au processus, elle doit avoir une dimension particulièrement petite et un contenu d'humidité au-dessous de 10%, ceci nécessite que la biomasse doive être séchée.

#### **II.3.2. Technologie de conversion**

Comme aucun oxygène n'est présent dans le processus, la biomasse n'est pas brûlée, mais les liaisons chimiques entre les molécules dans la biomasse sont cassées à températures élevées pour former la réaction finale.

Les produits se carbonisent (biohuile et gaz). La quantité et la composition des produits de pyrolyse dépendent de la température de pyrolyse, du taux de chauffage, du temps de séjour et de la composition de la biomasse.

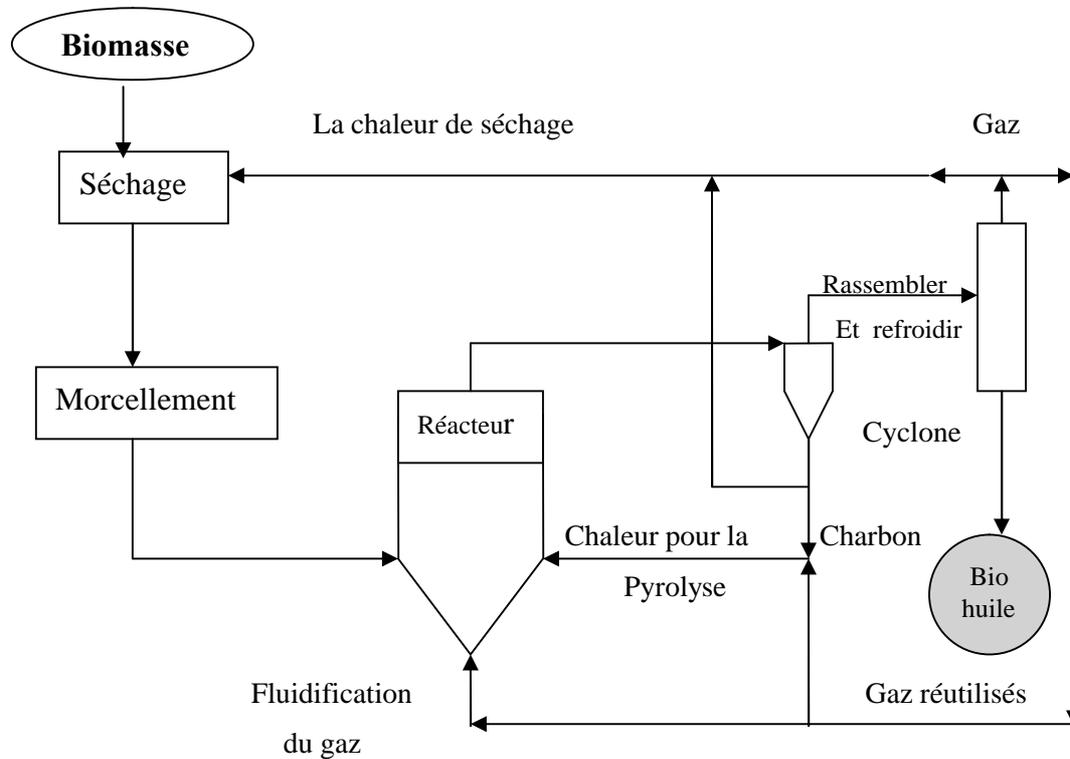
Il y a plusieurs types de procédés de pyrolyse avec différents taux de chauffage. On se focalisera sur le procédé instantané très rapide de pyrolyse, car c'est le plus approprié pour la production de pétrole par pyrolyse. Puisque ce processus a lieu à températures élevées, la production des composants gazeux est maximisée par comparaison à d'autres types de procédés de pyrolyse.

Un combustible liquide est produit en refroidissant ces gaz, la pyrolyse lente qui a lieu à une température autour de 400°C, à un taux de chauffage très bas et un séjour long. Le produit principal est le charbon de bois. A température légèrement élevée, les procédés conventionnels de pyrolyse ont lieu, ayant pour résultat la production de gaz, l'huile et le charbon dans des proportions égales. La pyrolyse rapide a lieu aux températures entre 500 à 650°C et les temps de séjour sont très courts, à savoir 0.5 jusqu'à 5 secondes. Dans ces conditions se produit une vapeur organique (le biohuile après condensation), des gaz et le charbon de bois de pyrolyse.

Dans des procédés instantanés de pyrolyse, les températures les plus élevées sont appliquées entre 700 à 1000°C. Le temps de résidence a lieu au-dessous d'une seconde, à un taux de chauffage des particules très élevé et à un refroidissement rapide des vapeurs produites de produits liquides. La réaction instantanée de pyrolyse est donc utilisée pour convertir la biomasse en liquide.

La figure .II.2, présente l'arrangement de processus général pour la pyrolyse instantanée.

D'abord la biomasse doit être séchée et coupée afin de répondre aux exigences de taille et de contenu d'humidité pour le procédé de pyrolyse, puis elle est introduite dans le réacteur. Plusieurs types de réacteurs peuvent être employé comme des réacteurs de lit fluidisé (figure III.2). Dans ce type de réacteur, les particules fines de biomasse sont alimentées au réacteur avec un lit fait d'un composant inerte, par exemple le sable.



**Figure II.3.** Arrangement général de processus instantané de pyrolyse (avec un réacteur) [11]

Le chauffage des particules de biomasse se fait par soufflage du gaz chaud de bas jusqu'au haut, une fois la vitesse du gaz porteur est assez haute, le lit devient volumineux, et la réaction aura lieu dans le volume entier du réacteur.

Une autre possibilité est la technologie tournante de cône. La biomasse est mélangée aux particules chaudes de sable, les particules sont alimentées au fond du cône où elles sont transportées vers le haut le long du mur chaud par l'action tournante du cône, un gaz porteur n'est pas nécessaire ici à la différence du réacteur de lit fluide, c'est que le tourbillonnement dans le réacteur est déjà provoqué par le mouvement du cône tournant, l'absence du gaz

porteur simplifie la collection des produits de pyrolyse après que la réaction ait eu lieu, puisqu'ils sont non dilués.

Une autre caractéristique favorable de cette technologie est que le réacteur à une conception compacte, le chauffage rapide à un court temps de séjour de phase gazeuse, ainsi que dans ce type un rendement relativement élevé de bio-huile (pour le bois entre 75 à 80 %poids). Un inconvénient de cette technologie est que la dimension particulaire en bois devrait être de 2 millimètres, la technologie de pyrolyse n'a pas cette caractéristique défavorable parce qu'ici, des particules grandes de biomasse peuvent être employées, jusqu'à 13 millimètres, le contenu d'humidité peut être relativement haut, environ 15%. Les particules de biomasse sont transportées par l'intermédiaire de certains nombres des échangeurs de chaleur, où une partie de la biomasse est coupée en plus petites molécules.

Une fois les particules de biomasse ont de pyrolyses, les produits de réaction sont transportés à un cyclone là où ils sont séparés. Le charbon, contenant les structures chimiques aromatiques, peut être brûlé avec de l'air pour fournir la chaleur pour le séchage de la biomasse ou pour le procédé de pyrolyse. Les composants gazeux sont transportés à un refroidisseur, ils sont principalement bio-huile condensée et la partie des gaz non condensables se compose de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et du  $\text{H}_2$ . Ils peuvent être réutilisés pour le séchage de la biomasse ou des gaz de fluidification. L'application de gaz dans un moteur est également une possibilité.

L'huile de pyrolyse contient beaucoup de composants valables qui peuvent être employés dans des buts non énergétiques à savoir la production de produits chimiques. Ils peuvent être séparés par l'extraction des composants principaux de bio-huile comme le phénol, l'eau, le levoglucosan et l'hydroxyacétaldehyde.

Le phénol est employé dans la production du contre-plaqué et des résines en nylon ainsi comme désinfectant et dans quelques médecines.

Levoglucosan est un sucre dérivé, qui peut être employé pour la synthèse pharmaceutique, la synthèse de pesticide, de polymères et de résines, et d'agents tensioactifs.

L'hydroxyacétaldehyde est un autre dérivé de sucre. Il peut être appliqué par exemple en tant qu'agent de blanchiment optique pour la production de papier et pour le brunissement des nourritures.

Le bio huile peut être appliquée comme carburant pour la co-mise à feu à une usine d'énergie électrique ou comme matière première pour la synthèse de la production intoxicante, où elle est gazéifiée avec de l'air (enrichi) et l'oxygène pur. On peut aussi le convertir en carburants des véhicules à moteur tels que le méthanol ou les carburants de Fischer-Tropsch.

Pour l'application directe comme produit de remplacement gazole dans des moteurs de véhicule, de l'huile de pyrolyse doit être améliorée et stabilisée d'abord. L'huile de pyrolyse peut être utilisée comme remplacement pour le gazole fossile dans des applications stationnaires, telles que les chaudières, les fours ou les moteurs [12].

### **II.3.3. Usage final de biocarburants**

#### **II.3.3.1. Propriétés du carburant**

L'huile de pyrolyse est typiquement un liquide, presque noir, selon sa composition chimique, elle est différente de l'huile fossile. Tout d'abord la densité de bio huile qu'est de 1.2 kg/l est élevée que celle de l'huile d'origine fossile. Cependant, la teneur en énergie est inférieure, à savoir entre 16 et 19 MJ/kg, comparée à celle des fuels conventionnels qui est entre 42 et 44 MJ/kg. Ceci est dû à sa teneur élevée en oxygène organiquement. Cependant elle est soluble dans l'eau elle contient moins d'azote, aucun composant en métal et aucun soufre à la différence de l'huile d'origine fossile.

L'exposition d'huile de pyrolyse à la température de 42°C engendre des variations de viscosité, de 0.025 jusqu'à 1.0 Pascal par seconde. Ceci est dû à la teneur en eau qu'est de 15 à 35 % en poids. Particulièrement à températures élevées, l'huile est tout à fait instable et elle commence à se dégrader pendant le processus de vieillissement, des réactions chimiques comme la polymérisation auront lieu, des acides organiques se forment ce qui rend l'huile très acide avec une valeur du pH variant de 2 à 4. En outre, l'huile a une odeur spécifique et elle contient plusieurs composants qui sont cancérogènes.

En raison des caractéristiques mentionnées ci-dessus, l'huile de pyrolyse ne peut pas être employée comme porteur d'énergie directement.

Pour l'usage comme carburant de transport, elle doit être améliorée et stabilisée à la qualité gazole d'abord. Il peut être fait, en utilisant, des procédés catalytiques par exemple d'évolution ou d'hydrogénation. Bien que c'est techniquement faisable, l'évolution chimique d'huile de pyrolyse en carburant de transport n'est pas encore appliquée actuellement en raison de l'hydrogène requis pour ce processus qui est trop cher, mais la technologie est toujours évolutive suivant le besoin de développement.

La qualité finale d'huile de pyrolyse demeurera toujours plus basse que celle du gazole fossile. Jusqu'à présent, l'application directe de bio-huile dans les moteurs diesel est non réussie. Pendant les essais, des problèmes se sont produits avec l'acidité de l'huile, qui a causé la corrosion du moteur. Cependant, l'huile de pyrolyse peut être employée comme entrée pour le procédé de gazéification combiné avec davantage de synthèse au méthanol ou aux liquides de Fischer-Tropsch (Voir sections II.2 et III.3) [12].

### **II.3.3.2. Adaptations de moteur et d'infrastructure**

Pour la conception de moteur, il doit prendre en considération que l'huile de pyrolyse est chimiquement agressive envers l'acier puisque l'huile est très acide, des équipements de stockage devraient être équipés de matériaux qui résistent à l'acide. Puisque l'huile de pyrolyse se dégrade une fois stockée aux températures plus que 50°C, d'où la chaleur, le contact avec la lumière et l'oxygène doivent être évités. Le gazole d'huile de pyrolyse ne se mélange pas avec le gazole d'origine fossile donc l'infrastructure diesel existante ne peut pas être employée [12] [13].

## **II.4. Équivalent de gazole dérivé par huile de HTU**

Pendant les années 80, le laboratoire de coquille à Amsterdam a effectué la recherche sur le courant ascendant hydraulique et l'évolution du processus. La biomasse est décomposée dans l'eau pour produire une huile brute, le liquide est appelé le 'bio brut'. L'objectif de ce processus était de concentrer l'énergie de la biomasse dans un carburant des véhicules avec une densité d'énergie plus élevée. En raison des conditions économiques défavorables les expériences ont été arrêtées. Comme la bioénergie a suscité l'intérêt, les travaux ont été repris dans les années 90 et la technologie a été alors développée plus loin par une compagnie hollandaise [13].

#### **II.4.1. La biomasse**

Le processus d'Hydro Thermal Upgrade (HTU) peut être employé par la conversion d'une large gamme de matières de base, qui est une caractéristique avantageuse de cette technologie. Les matières de base possibles sont les déchets solides municipaux et les pertes agricoles. Le processus a été particulièrement conçu pour la biomasse humide telle que les pulpes de betteraves, le cambouis ou la bagasse ; les mélanges très humides de 10 à 30 % de matériel organique sont des matières de base appropriées.

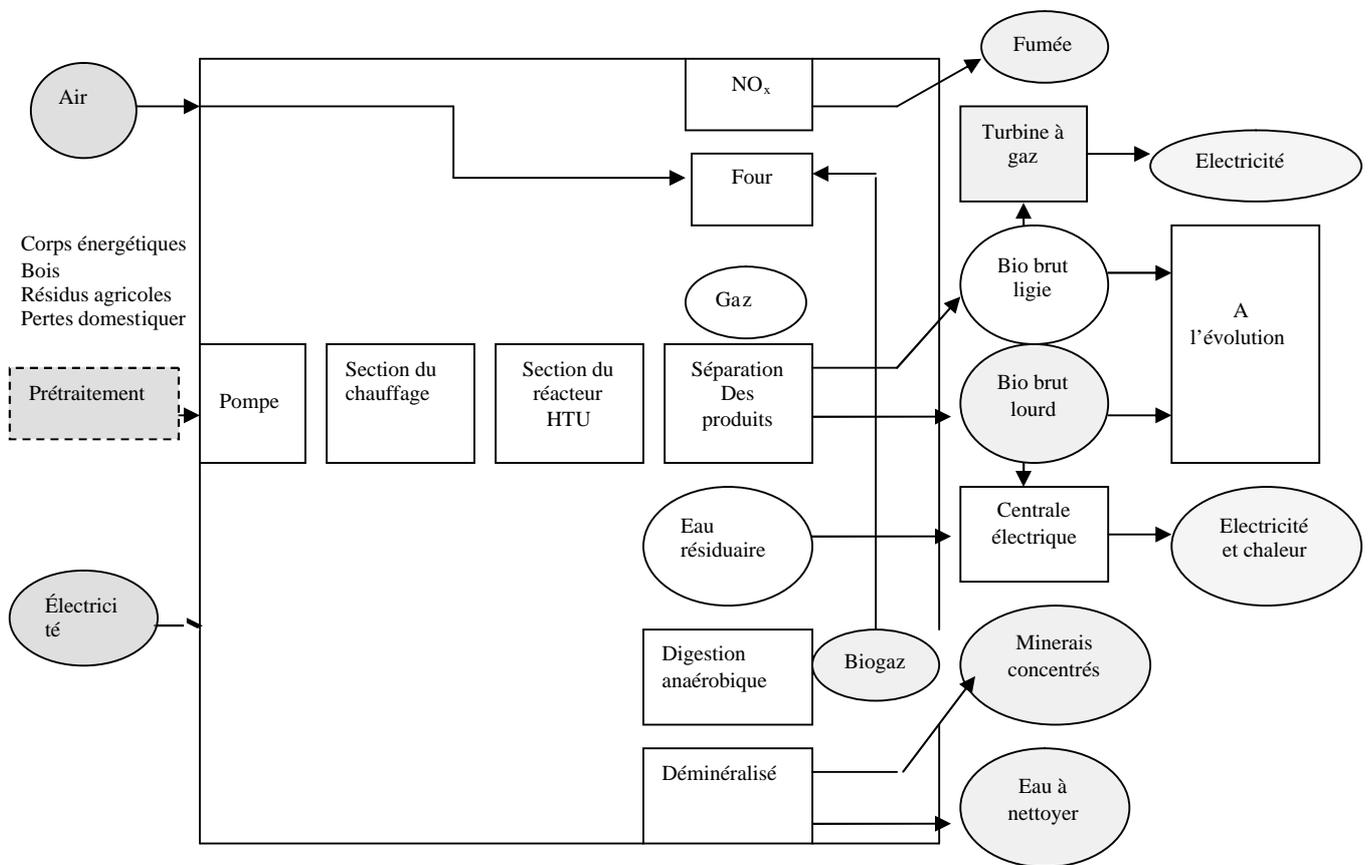
#### **II.4.2. Technologie de conversion**

Dans le processus de HTU, la biomasse sèche ou humide réagit dans l'eau liquide à une haute pression et à une température relativement basse. Le produit principal du processus de conversion de HTU est le bio brut, semblable au pétrole fossile.

Le processus de conversion est montré sur la figure.II.3

La première étape dans le processus de conversion est le traitement préparatoire de la matière de base (biomasse), puisque le processus de HTU est particulièrement conçu pour les matériaux humides, le types sec a besoin d'être imbibé dans un environnement aqueux à une température de 200 à 250 °C et une pression de 30 bar. La présence d'eau influence de manière significative les propriétés de la matière de base de biomasse et le produit final, puis la biomasse humide est transportée au chauffage et plus tard à la section de réaction. Le processus de conversion a lieu à une pression d'environ 120 à 180 bar et à une température de 300 à 350 °C. Dans un service pilote à Apeldoorn, de Hollande, la réaction de conversion de HTU dure de 5 à 10 minutes la consommation d'énergie du processus est relativement haute.

Le bio brut est un liquide organique noir visqueux, un mélange de divers types d'hydrocarbures, et il ne se mélange pas avec l'eau. En raison de son contenu d'oxygène relativement bas (l'oxygène attaché de 10 à 15%), il est plus stable que l'huile de pyrolyse. Elle contient des concentrations très basses d'azote et de soufre et un pouvoir calorifique inférieure (PCI) de 30 à 36 MJ/kg, il peut être séparé en bio brut léger et lourd, qui peut servir de porteurs d'énergie pour différents buts.



**Figure II.4.** Arrangement de processus de conversion d'hydro thermal upgrade HTU [8] [13].

Les fractions plus lourdes, qui contiennent tous les minerais du bio brut peuvent être employé pour la co-mise à feu aux usines d'énergie électrique à base de charbon, elle peuvent également être employées comme naphte pour produire des produits chimiques. Les fractions plus légères qui sont très propres, peuvent être employées pour produire des composants du carburant gazole.

Afin de convertir le biocrude en carburant de qualité gazole, il doit être amélioré au moyen d'hydrogénation, par exemple hydrodeoxygenation catalytique, dans ce processus l'oxygène est enlevé du bio brut en ajoutant l'hydrogène.

### **II.4.3. Rendement de biocarburants**

#### **II.4.3.1. Propriétés de carburant**

Les développements de la technologie de conversion de HTU visent à produire un carburant gazole semblable à ceux du gazole conventionnel, ces caractéristiques sont déterminées par le (C/H) rapport du carburant qui peut être ajusté par les conditions de processus de hydrodeoxygenation. On s'attend à ce que les qualités de carburant du gazole de HTU soient très bonnes, l'indice de cétane est plus haut que celui du gazole conventionnel, ce qui donne un meilleur allumage, le carburant est propre et ne contient aucun oxygène.

#### **II.4.3.2. Modifications de moteur et d'infrastructure**

Le gazole de HTU sera produit de telle manière qu'il réponde aux caractéristiques du gazole d'origine fossile, ce qui signifie que le gazole de HTU peut être mélangé au gazole conventionnel dans n'importe quelle proportion, et qu'il peut être appliqué dans les moteurs diesel. L'infrastructure existante pour la distribution de gazole peut être utile pour HTU ainsi que les moteurs de véhicules [14].

### **II.5. Dimethylether (DME)**

Le Dimethylether actuellement est employé principalement comme propulseur dans des bidons de jet, les recherches pour l'utilisation du DME comme carburant de transport à seulement commencé récemment, une nouvelle méthode pour produire le DME a été accidentellement découvert pendant les tentatives de production d'essence synthétique à partir du gaz de synthèse.

Avant, le DME avait seulement été utilisé dans l'industrie de produits de beauté et personne n'a jamais essayé de l'appliquer comme carburant gazole. Il s'est avéré être un produit de remplacement attrayant du gazole dû à sa capacité de réduire les émissions d'échappement de NOx. D'ailleurs, il peut être produit à partir de différentes matières de base, telles que la biomasse et le gaz naturel, comme le biomethanol, le biodimethylether est produit au moyen de gazéification de biomasse (voir l'itinéraire de gazéification, chapitre III, section « III.2 ») suivie de la synthèse.

### **II.5.1. La biomasse**

Une matière de base d'environ 3 tonnes de matériaux boisés est exigée pour la production de 1 tonne de DME, ceci correspond à un rendement de 500 litres de DME par tonne de bois.

### **II.5.2. Technologie de conversion**

Le DME, peut être produit directement à partir du gaz de synthèse d'un mélange de CO et de H<sub>2</sub>. C'est semblable au procédé de production du méthanol (voir l'itinéraire de gazéification, chapitre III, section « III.2 » et « III.3 »).

Le DME peut également être produit à partir du méthanol pur. Il est fait au moyen d'un processus appelé la déshydratation catalytique, ce qui dénote un processus où l'eau est chimiquement séparée du méthanol. D'abord, le méthanol est chauffé à une température de 250°C au moyen d'un échangeur de chaleur avant qu'il soit acheminé vers le réacteur, dans le réacteur, une réaction exothermique a lieu et le DME est formé. Les produits de réaction sont chauffés à 365°C avant de les laisser dedans, après le refroidissement de réacteur, le DME est séparé des autres composants, méthanol et eau. La qualité du produit final est déterminée dans un processus de purification.

Souvent, la production du méthanol et le DME est combiné dans un processus, avant d'être employé comme carburant, le DME a été principalement employé comme propulseur de remplacement pour chloro-fluorocarbons dans des bidons de jet. C'est toujours son application primaire comportant 90% de DME globalement produit. Il est également employé comme promoteur d'allumage dans les moteurs à méthanol, il a aussi d'autre but énergétique comme carburant de transport, carburant de production d'électricité et carburant de ménage pour cuisine et chauffage, cependant, ces marchés n'existent pas encore. L'association internationale de DME (IDA) s'attend à de grands approvisionnements économiques en DME pour la production d'électricité, comme carburant de transport et pour des usages à cuire domestiques [5].

**II.5.3. Usage final de biocarburant****II.5.3.1. Propriétés de carburant**

Le DME est approprié comme carburant du moteur diesel à cause de sa basse température d'auto-allumage et son indice de cétane qui est supérieur.

Le tableau II.2. Énumère les propriétés de carburant du DME en comparaison de ceux de gazole fossile.

**Tableau II.2.** Propriétés de DME, comparées au gazole [5]. [6]

<b>Propriétés du carburant</b>	<b>DME</b>	<b>Gazole</b>
Formule chimique	$\text{CH}_3\text{OCH}_3$	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$
Masse moléculaire (kg/kmol)	46	170-200
Nombre de cétane	55-60	50
Masse volumique (kg/l) à 15°C	0,67	0.84
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/kg) à 15°C	28.4	42.7
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/l) à 15°C	18.8	35.7
Rapport stoechiométrique (kg air/kg fuel)	9.0	14.53
Température d'auto-allumage (°C)	235	250

L'indice de cétane du DME est légèrement plus haut que celui du gazole fossile, qui implique un plus court temps d'allumage et il brûle sans produire la suie. D'ailleurs, les moteurs utilisant le produit de DME font moins de bruit. Un inconvénient est que sa teneur en énergie est inférieure à celle du gazole. Ces propriétés physiques sont très semblables à ceux de GPL. Le DME est gazeuse à la température et pression ambiantes, mais à 20°C et à une pression au-dessus de 5 bar elle devient liquide. Son point d'ébullition à la pression atmosphérique est de 25°C.

Le diméthylether peut se mélanger avec la plupart des solvants organiques, il a la haute hydrosolubilité. Il est très propre et ne contient pas de soufre, d'azote ou de métaux.

**II.5.3.2. Adaptations de moteur et d'infrastructure**

Le DME ne peut pas être mélangé au gazole, mais les adaptations ultérieures des moteurs diesel pour leur usage sont relativement simples, la géométrie de l'installation carburant doit être modifiée parce qu'il a une énergie inférieure, ceci signifie qu'un volume plus élevé de carburant doit être assuré pour la même quantité d'énergie comparée au gazole.

Cependant, la pression d'injection de carburant peut être diminuée quand le DME est employé, Ce qui mène à un processus sans heurt de combustion et ainsi des plus basses émissions de NOx.

Le DME ne pose aucun problème de démarrage à froid, dû à sa volatilité élevée, contrairement à l'alcool carburant tel que le méthanol et l'éthanol, puisque il a des plus basses propriétés lubrifiantes que le gazole. Leur application peut mener à la réformation des composants d'installation, c'est particulièrement pour les composants mobiles dans le moteur tel que la pompe. Bien qu'il ne corrode pas des métaux, il peut affecter certains types de plastiques, d'élastomères et de caoutchoucs après un certain temps, ceci devrait être pris en considération dans le choix des matériaux de cachetage pour l'installation de carburant. Pour la distribution et le réapprovisionnement en combustible du DME, l'infrastructure gazole fossile ne peut pas être employée, cependant l'infrastructure pour le DME peut être très semblable à celle du GPL.

Jusqu'à présent, le réseau de distribution pour le DME n'a pas été développé encore, mais en raison des similitudes avec le GPL, le même concept de distribution peut être employé pour le DME. Puisque il est gazeux à la température et à la pression ambiante, il doit être manipulé sous pression, il peut être stocké sous forme liquide entre 5 à 10 bars et à la température ambiante. Ceci signifie que une sous pression des réservoirs sont nécessaires dans le véhicule et dans l'infrastructure de distribution, par exemple les stations de réapprovisionnement en combustible.

Puisque la pression dans les réservoirs est légèrement plus haute que celle pour le GPL, les réservoirs de carburant pour le DME doivent être plus lourd. D'ailleurs, en raison de son incompatibilité avec quelques matériaux, les joints et les tuyaux doivent être utilisés pour les réservoirs de carburant comparés au GPL. Le DME devraient être stockés dans des réservoirs secs bien aérés et le contact avec des sources d'allumage ou de chaleur, telles que la lumière du soleil, devrait être évité. En outre, nous devons prendre en considération que la pression de carburant dans la pompe d'approvisionnement en carburant entre le réservoir et le moteur de véhicule doit passer de 12 à 30 bars afin d'éviter la vaporisation du DME. Cependant, la vapeur de DME est plus lourde que l'air, ainsi il descend quand elle est libérée, juste comme le GPL.

Il est plus sûr comparé au méthanol, parce qu'il n'est pas toxique. Cependant, le contact avec le DME peut causer l'irritation des yeux, du système respiratoire et des gelures en contact avec la peau. En raison de ses similitudes avec GPL, la même sûreté des mesures peuvent être employées pour la manipulation du DME [5] [6] [15].

## **II.6. Gazole de Fischer-Tropsch**

Le processus de Fischer-Tropsch a commencé à se développer en Allemagne dans les années 20 il produit des carburants synthétiques, les combustibles fossiles ont été employés comme matière de base pour le processus. Comme les processus de conversion pour le méthanol et le DME, l'itinéraire de Fischer-Tropsch commencent également par la gazéification de la biomasse, qui est suivie d'un processus de synthèse.

### **II.6.1. La biomasse**

Des liquides de Fischer-Tropsch peuvent être produits à partir de plusieurs types de biomasse (voir la section III.2). Environ 8.5 tonnes de bois sont nécessaires à la production de 1 tonne de gazole de Fischer-Tropsch. Le rendement des combustibles liquides est d'environ 150 litres par tonne de bois. D'autres systèmes doivent alimenter le processus de conversion avec de bio-huile, par exemple huile de pyrolyse (voir la section II.3).

### **II.6.2. Technologie de conversion**

Pour la production des liquides de Fischer-Tropsch, habituellement un réacteur de boue ou un réacteur de lit fixe est utilisé comme réacteur de synthèse. Les catalyseurs de fer ou de cobalt peuvent être employés. Les catalyseurs de cobalt ont à un taux de conversion plus élevé, une plus longue vie et une réactivité plus élevée, alors que le type de catalyseur de fer a une tolérance plus élevée pour des impuretés et un prix inférieur. D'ailleurs, les catalyseurs à base de fer montrent une considérable activité du décalage eau-gaz et le rapport de  $H_2/CO$  est ajusté dans le réacteur de synthèse. Cependant, si un catalyseur à base de cobalt est employé, le décalage d'eau-gaz doit être modifié avant la réaction de synthèse. Dans le réacteur de synthèse, les syngaz sont convertis en large gamme aux hydrocarbures inclut les hydrocarbures légers ( $C_1 - C_2$ ), GPL ( $C_3 - C_4$ ), naphte ( $C_5 - C_{11}$ ), gazole ( $C_9 - C_{20}$ ) et les fractions de cire ( $> C_{20}$ ).

La composition du produit résultant dépend de la température et de la pression du processus, le catalyseur et le type de réacteur. Le processus typiques pour la synthèse de

Fischer-Tropsch en visant pour les produits à longue chaîne (cires) sont les températures 200 - 250°C et pressions de 25 - 60 bar. Si le processus est actionné à températures élevées il produit principalement l'allumeur hydrocarbures qui peuvent être raffinés à l'essence et gazole, dissolvants et oléfines. Pour la production du gazole de Fischer-Tropsch, un plus grand rendement est réalisé pour l'itinéraire de la production des cires suivies par hydrocracking sélectif, comparé à la production directe des fractions gazole du gaz de synthèse, le gaz d'échappement restant après la synthèse peut être réutilisé et alimenté à la synthèse de réacteur encore pour maximiser la production des liquides. Dans un système simplifié, un prétendu de la synthèse de Fischer-Tropsch, les sous-produits gazeux sont utilisés pour la production d'électricité et la génération de chaleur dans une centrale combinée. Un aspect favorable du dernier système c'est que les investissements sont plus bas, dus à l'élimination du gaz réutilisant et la synthèse d'accompagnement de production de gaz.

Le gazole de Fischer-Tropsch est un carburant très approprié pour le transport. Les liquides de Fischer-Tropsch en général sont utilisés comme porteur d'énergie, pour le stockage et pour la génération de l'électricité et/ou de la chaleur. Des composants d'essence produits par ce processus ne peuvent pas être appliqués dans les moteurs à allumage par étincelle. Contrairement à l'essence dérivée du pétrole qui contient des composés aromatiques, l'essence de Fischer-Tropsch se compose des chaînes droites d'hydrocarbure, dont l'indice d'octane est trop bas pour l'application dans des moteurs courants [16].

### **II.6.3. Usage final de biocarburant**

#### **II.6.3.1. Propriétés de carburant**

Le gazole de Fischer-Tropsch a une haute qualité et c'est un carburant propre pour le transport avec des caractéristiques favorables pour l'application dans des moteurs diesel, ses propriétés sont énumérées ci-dessous, en comparaison à celles du gazole dérivé du pétrole.

Le gazole de Fisher-Tropsch est semblable au gazole fossile en ce qui concerne son teneur en énergie, masse volumique, viscosité et point d'inflammabilité qui a lieu également dans la phase liquide aux conditions ambiantes, le carburant a certaines caractéristiques qui sont plus favorables que ceux du gazole régulier.

**Tableau II.3.** Propriétés de carburant de gazole de Fischer-Tropsch, comparées au gazole [17]

Propriétés du carburant	Gazole de Fisher-Tropsch	Gazole
Formule chimique	Paraffine	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
Masse moléculaire (kg/kmol)		170-200
Nombre de cétane	> 74	50
Masse volumique (kg/l) à 15°C	0,78	0.84
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/kg) à 15°C	44.0	42.7
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/l) à 15°C	34.3	35.7
Rapport stoechiométrique (kg air/kg fuel)		14.53
Contenu d'oxygène (%)	0	0-0.6
Viscosité cinématique (mm <sup>2</sup> /s) à 20°C	3.57	4
Point d'inflammabilité (°C)	72	77

Tout d'abord, le gazole de Fischer-Tropsch a un indice de cétane plus élevé, ce qui indique des meilleures qualités d'auto-allumage, d'ailleurs il contient peu d'aromatique, ce qui permet une combustion plus propre qui minimise les émissions d'échappement de NOx. En outre, des émissions de soufre sont évitées. Un autre avantage du gazole de Fischer-Tropsch est sa composition chimique qui peut être machinée pour répondre à toutes les exigences des fabricants de moteur a carburant gazole, des formulations spéciales ou des additifs peuvent être nécessaires, pour répondre à des normes pour répondre aux problèmes de l'onctuosité du combustible, fluage à froid, et compatibilité d'élastomère [18].

### II.6.3.2. Adaptations de moteur et d'infrastructure

Le gazole de Fischer-Tropsch additionné au gazole conventionnel. Il peut être appliqué dans les moteurs diesel et l'infrastructure de distribution de gazole existante sans aucune modification. Le gazole de Fischer-Tropsch mène aux réductions d'émission, si le moteur diesel est optimisé pour exploiter les propriétés favorables du gazole de Fischer-Tropsch, ceci peut même être amélioré plus loin. Les adaptations du moteur incluent par exemple la révision du système de combustion pour utiliser les meilleures qualités d'auto-allumage (un indice de cétane plus élevé) et l'utilisation des dispositifs soufre qui peuvent être appliqués ici en dehors les problèmes parce que le gazole de Fischer-Tropsch ne contient aucun soufre [19].

Les figures ci-dessous représentent des unités pour la production des huiles ainsi que les différentes applications des huiles végétales.



**Figure II.5.** Unité pour l'extraction de l'huile du tournesol 80 litres/heure, France [20].



**Figure II.6.** Unité pour l'extraction de l'huile du tournesol, 13 litres/heure, Tahiti [20].



**Figure II.7.** Station de production d'électricité à huile du tournesol 300 kva, New Caledonia [20].



**Figure II.8.** Motopompe à huile végétale, France [20].



**Figure II.9.** Générateur 9 kva à huile de tournesol, France [20].



**Figure II.10.** Chaudière à huile de colza. France [20].



**Figure II.11.** Massey-Ferguson moteur à biodiesel, France [20].



**Figure II.12.** Moteur à huile de palme 7ch, France [20].

## **Conclusion**

Dans le présent chapitre nous avons présenté les différents processus de conversion de la biomasse aux biocarburants équivalents du gazole d'origine fossile, ainsi que les changements que nous pouvons reporter sur les moteurs et l'infrastructure afin de recevoir les bioénergies sans aucun endommagement. Nous avons vu aussi, comment surmonter les problèmes causés par les propriétés des biocarburants qui ne sont pas en général semblables à celles du gazole d'origine fossile. Notons que pendant le processus de conversion, les produits sont utilisés comme porteur d'énergie et employés dans l'industrie.

Certains biocarburants comme l'équivalent de gazole dérivé par huile de pyrolyse contiennent plusieurs composants qui sont cancérigènes donc il ne peut pas être employé comme porteur d'énergie directement.

## Chapitre III

# Technologies des biocarburants équivalents de l'essence d'origine fossile



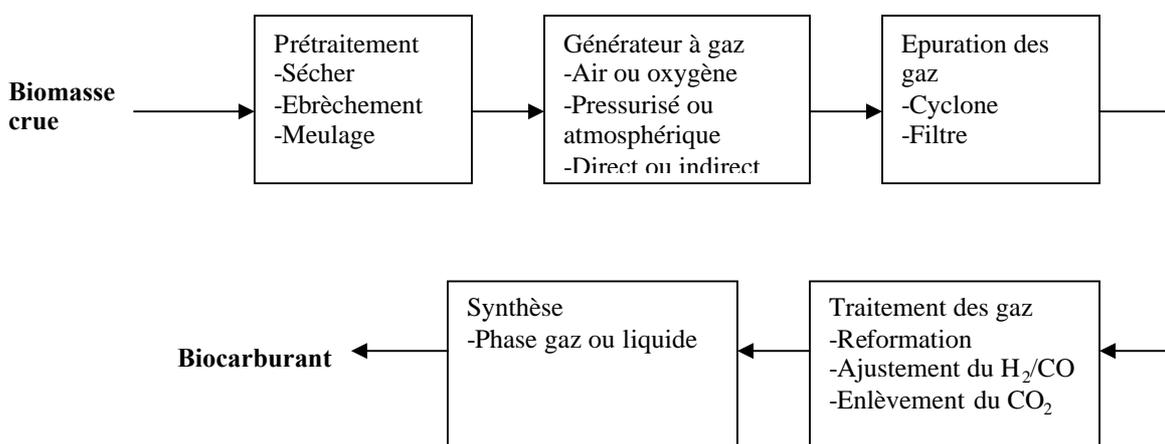
### III.1. Introduction

La biomasse peut être transformée aux gaz de synthèse par voie de gazéification qui donne lieu au biométhanol (démithylether et gazole de Fischer-Tropsch, section II) c'est pour cela que nous nous intéressons dans le présent chapitre à la définition de l'itinéraire de gazéification, nous décrirons aussi le processus de conversions de la biomasse à l'éthanol ainsi que les caractéristiques de biocarburant qui seront comparées à ceux de l'essence d'origine fossile. Les adaptations d'infrastructure requise pour l'application d'un biocarburant spécifique sur le moteur seront discutées.

### III.2. Itinéraires de gazéification

Tout type de biomasse peut être employé comme matière de base, y compris le lignocellulosique tel que les matériaux cellulosiques, les récoltes agricoles (paille, mélasse) et herbes et les plantations de forêt. La biomasse humide, comme les déchets solides municipaux et les résidus agricoles peuvent être aussi employés mais ceci donne une efficacité inférieure.

La gazéification de la biomasse a comme conséquence un mélange de gaz de synthèse, une large gamme des biocarburants liquides peut être produite par la synthèse à partir de ce gaz. Dans cette section on donnera une description générale de la gazéification et le processus de synthèse. Les étapes de ce processus sont indiquées sur la figure III.1.



**Figure III.1.** Processus de gazéification et de synthèse générales de la biomasse [9]

La gazéification dénote l'oxydation partielle de la biomasse par l'addition d'une substochiométrie, une quantité de l'oxygène qui réagit exothermiquement avec la biomasse à température élevée, approximativement de 900°C. Dans le cas d'un procédé direct de

gazéification, la chaleur nécessaire pour le processus est produite en brûlant une partie de la biomasse dans le générateur à gaz. L'air et l'oxygène soufflé des générateurs à gaz fait que la biomasse peut être utilisée pour la gazéification directe. Si c'est l'oxygène qui est soufflé, le gaz peut produire une synthèse d'azote libre. Cependant la production de l'oxygène pour ce processus conduit à une utilisation d'énergie plus élevée et surcharge le placement. Les procédés indirects de gazéification emploient la chaleur qui est produite par la combustion d'une partie de la biomasse ou du gaz produit en dehors du générateur à gaz, la chaleur est alimentée au générateur à gaz après. Un avantage de ce type de procédé de gazéification, c'est qu'il produit presque un azote gazeux libre sans utilisation d'oxygène importé. Cependant, la gazéification indirecte se compose de plusieurs étapes complexes, d'ailleurs elle produit deux jets de gaz qui doivent être réduits [21].

Différents types de réacteurs conviennent à la gazéification de la biomasse, tels que les lits fixes, les lits fluidisés et les lits entraînés. Les lits fixes fonctionnent aux températures entre 700 et 1200 °C, ils sont classés par catégorie selon la direction du gaz traversant le réacteur (vers le haut, vers le bas ou horizontal) ou par les sens d'écoulement plein et du jet de gaz (co-courant, à contre courant ou renvoi de courant). Les réacteurs co-courants peuvent produire un gaz relativement propre (moins de goudron), contrairement au type de générateur à gaz de contre-courant qui fait appel au nettoyage [19].

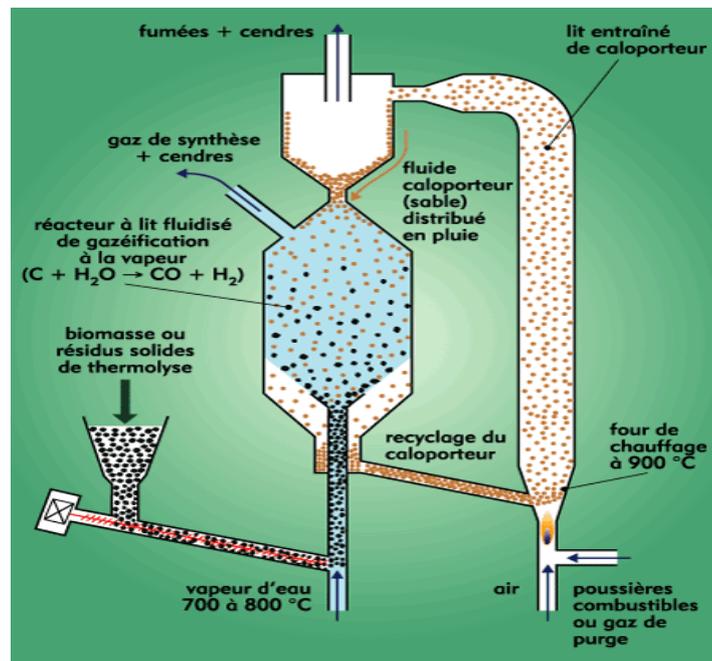


Figure III.2. Vue schématique d'un lit fluidisé [22].

Le gaz de synthèse résultant de la réaction dans le générateur à gaz contient principalement l'oxyde de carbone, l'anhydride carbonique, l'hydrogène, le méthane, l'eau et l'azote. La composition des gaz de synthèse dépend par exemple de la composition en biomasse crue et les conditions de fonctionnement, elle contient une certaine quantité de CO<sub>2</sub>. Le gaz contient également des contaminants comme par exemple de petites particules de charbon, chlorures, soufre, composés d'azote et goudrons, ces contaminants peuvent diminuer l'activité de catalyseur en reformant des gaz.

Le goudron peut poser des problèmes sérieux dans les systèmes de la biomasse de gazéification, comme l'usage et la corrosion dus à la formation de suie en raison de la combustion partielle du goudron ou de la réaction de polymérisation des composés de goudron à températures élevées. Les contaminants dans les gaz de synthèse, tels que les particules fines du goudron doivent être enlevées par le nettoyage, les dispositifs utilisés sont des filtres de tissu.

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, le gaz doit être nettoyé complètement et être refroidi si nécessaire, les impuretés peuvent être enlevées en utilisant des cyclones et des filtres en céramique, le gaz résultant peut être employé dans les chaudières, les moteurs et des turbines à gaz pour la génération de l'électricité et/ou de la chaleur ou comme une matière première pour l'industrie chimique.

Pendant le traitement du gaz, des hydrocarbures sont convertis en H<sub>2</sub> et CO, qui sont nécessaires pour la synthèse. Le H<sub>2</sub> et le CO doivent être disponibles dans un certain rapport, ce rapport diffère pour les produits finaux, par exemple pour la production du méthanol (section III.3) ainsi que pour des liquides de Fischer-Tropsch (section II.6). Cependant dans le gaz résultant de la gazéification de la biomasse, la proportion d'hydrogène nécessaire est habituellement inférieure, par conséquent les proportions de ces deux composants doivent être décalées dans les gaz de synthèse par l'intermédiaire d'une réaction du décalage eau-gaz. Le CO réagit avec l'eau et produit CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>. Le CO<sub>2</sub> est éliminé après au moyen d'absorption chimique ou physique, le gaz de synthèse est comprimé et transporté à la réaction de synthèse finale.

La réaction de synthèse a lieu sous l'influence d'un catalyseur, la composition de produit finale dépend du catalyseur utilisé et d'autres conditions de processus, les produits finaux

sont extraits par la distillation de l'effluent de réacteur, les biocarburants produit par la gazéification et le processus de synthèse sont toujours très propres, car les gaz de synthèse ont été nettoyés complètement avant d'être alimentés au réacteur de synthèse.

### **III.3. Méthanol**

Le méthanol a été employé comme carburant de transport pendant un long temps, en particulier aux Etats-Unis. Le méthanol peut être produit à partir du gaz de synthèse, qui résulte de la gazéification de la biomasse.

#### **III.3.1. La biomasse**

Pour la production de 1 tonne de méthanol, plus de 2 tonnes de bois sec est exigé, ceci correspond à un rendement de 550 litres de méthanol par 1 tonne de bois, le rendement estimé de méthanol des matériaux herbeux est légèrement inférieur, à savoir environ 450 litres par tonne [23].

#### **III.3.2. Technologie de conversion**

Plusieurs réacteurs peuvent être utilisés dans ce type de processus, par exemple, le réacteur de colonne de bulle de boue. Dans ce type, le méthanol de phase liquide est développé par l'air produit et les autres produits chimiques. Ce processus emploie des catalyseurs sous la forme de poudre.

Afin de protéger le catalyseur de cuivre, le gaz de synthèse dérivé de la biomasse doit être nettoyé complètement pour répondre aux exigences de processus, ce processus peut atteindre une conversion de 95% de méthanol, il peut être combiné avec une turbine à gaz et/ou une turbine à vapeur où le gaz de purge est utilisé pour la production d'électricité. Le méthanol produit a une large gamme des applications, sans compter son utilisation comme combustible de transport, une matière de base, un extractif, ou un dissolvant chimique, il peut également être employé pour la production de l'éther butylique tertiaire méthylique MTBE, un additif d'essence qui améliore la qualité antidétonante du carburant.

#### **III.3.3. Usage final de biocarburant**

##### **III.3.3.1. Propriétés de carburant**

Le méthanol peut être appliqué dans presque n'importe quel type de véhicule et peut être employé comme carburant ordonné ou être mélangé à des hydrocarbures. Cependant, le

méthanol a un bas indice de cétane, 5 comparés à 50 pour le gazole fossile, ce qui témoigne de sa faible qualité d'allumage. Ce qui signifie que son utilisation dans des moteurs à allumage spontané (les moteurs diesels) sera difficile. Puisque le méthanol à une estimation élevée d'octane, son application comme produit de remplacement d'essence dans un moteur à allumage par étincelle est préférée.

Le tableau.III.1. Résume les propriétés de carburant du méthanol (et de son dérivé MTBE), comparées à ceux de l'essence fossile.

**Tableau III.1.** Propriétés de méthanol, comparées à l'essence [6].

Propriétés du carburant	Méthanol	MTBE	Essence
Formule chimique	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> .OCH <sub>3</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>15</sub>
Masse moléculaire (kg/kmol)	32	88	111
Nombre d'octane (MON)	92	100	86
Nombre d'octane (RON)	110	116	97
Nombre de cétane	5		8
Pression de vapeur (kPa) à 15°C	31.7	57	75
Masse volumique (kg/l) à 15°C	0.79	0.74	0.75
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/kg) à 15°C	19.8	35.2	41.3
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/l) à 15°C	15.6	26.0	31
Rapport stoechiométrique (kg air/kg fuel)	6.5		14.7
Température d'ébullition (°C)	65	55.3	30-190

L'indice d'octane du méthanol est plus haut que celui de l'essence, ce qui signifie qu'il a de meilleures qualités antidétonantes. D'ailleurs, il peut potentiellement atteindre une efficacité de carburant plus élevée si le rapport de compression dans le moteur est correctement ajusté. La pression de vapeur est beaucoup inférieure pour le méthanol comparé à l'essence, qui nécessite une évaporation plus lente du carburant, ce qui engendre des difficultés de démarrage à froid, qui peuvent être résolues avec le même genre de mesures techniques que l'éthanol ( section III.4.3).

La masse volumique du méthanol est légèrement plus haute que celle de l'essence. Cependant, le pouvoir calorifique inférieur est moitié de celui de l'essence. Le méthanol a un rapport air/carburant encore inférieur que l'éthanol, qui indique que moins d'oxygène est nécessaire pour la combustion du méthanol. Le méthanol est un liquide clair avec une odeur modérément alcoolique, il est presque insipide. Puisqu'il est toxique, des additifs doivent être

employés pour lui donner une odeur qui le distingue des autres carburants, le contact avec la peau et les yeux doit être évité, le méthanol pénètre la peau et entre dans la circulation sanguine.

### **III.3.3.2. Adaptations de moteur et d'infrastructure**

Le méthanol peut être employé dans les moteurs réguliers à allumage par étincelle et l'infrastructure existante pour l'essence reste sans adaptations si elle est mélangée avec l'essence jusqu'à 15%. Pour l'application du méthanol dans des proportions plus élevées ou en forme pure, les ajustements nécessaires au moteur et l'infrastructure sont identiques que ceux pour l'éthanol (section III.4.3) dû aux caractéristiques semblables des deux carburants, des mesures additionnelles doivent être prises pour le cas de méthanol pur qui brûle avec une flamme invisible, à la différence d'éthanol, on peut rendre la flamme évidente en ajoutant des additifs. En outre, des précautions doivent être prises pour les personnes qui travaillent journaliers avec des véhicules de méthanol parce que le carburant est toxique [6] [19] [23] [24].

## **III.4. Éthanol**

L'éthanol a été employé sur une grande échelle comme carburant de transport, par exemple au Brésil, 60% de l'éthanol produit est vendu sous la forme hydratée (éthanol 93 % vol et eau 7 % vol), qui remplace complètement l'essence des moteurs de véhicule, 40% de l'éthanol restant, sans eau, est appliqué dans un mélange avec l'essence jusqu'à 25%. La technologie la prédominante pour la conversion de la biomasse en éthanol est la fermentation suivie par la distillation. La fermentation est un processus biochimique de conversion dans lequel la biomasse est décomposée par micro organismes (bactéries ou enzymes). Cette technologie peut être employée pour différents types de matières de base (biomasse). Dans cette section on discutera la production d'éthanol à partir des deux récoltes vivrières qui sont la traditionnelle matière de base et la biomasse boisée [6].

### **III.4.1. La biomasse**

Le bioéthanol est principalement produit à partir des récoltes agricoles. Les matières premières appropriées pour la production de l'éthanol sont les produits agricoles contenant du sucre tels que betterave à sucre, canne à sucre et sorgho doux, ce sont les plus vieilles matières de base et faciles à employer. Les récoltes qui contiennent l'amidon peuvent également être employées mais elles doivent être converties en sucres d'abord, celles-ci

incluent des pommes de terre et divers types de grains tels que l'orge, le maïs, et le blé. Actuellement les activités de recherches et de développement dans le domaine des bioéthanol sont principalement focalisées pour employer les matériaux lignocellulosiques ou boisés comme matière de base, résidus agricoles (paille et bagasse de canne à sucre), résidus de forêt, bois de rebut, et déchets solides municipaux [6].

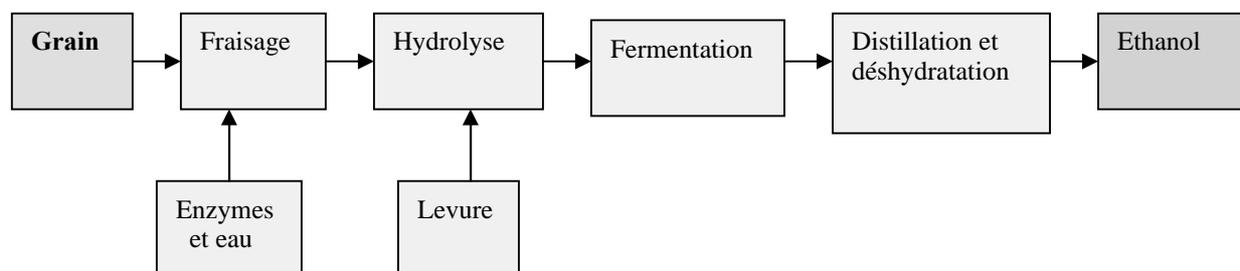
Il y a plusieurs raisons du décalage à la production d'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique. La biomasse est plus abondante et moins chère que les récoltes vivrières. En outre, elle a un équilibre plus élevé d'énergie nette qui la rend plus attrayante d'un point de vue environnemental. Cependant il est plus difficile de convertir ces genres de biomasse en sucres dus à leur structure moléculaire inaccessible.

### III.4.2. Technologie de conversion

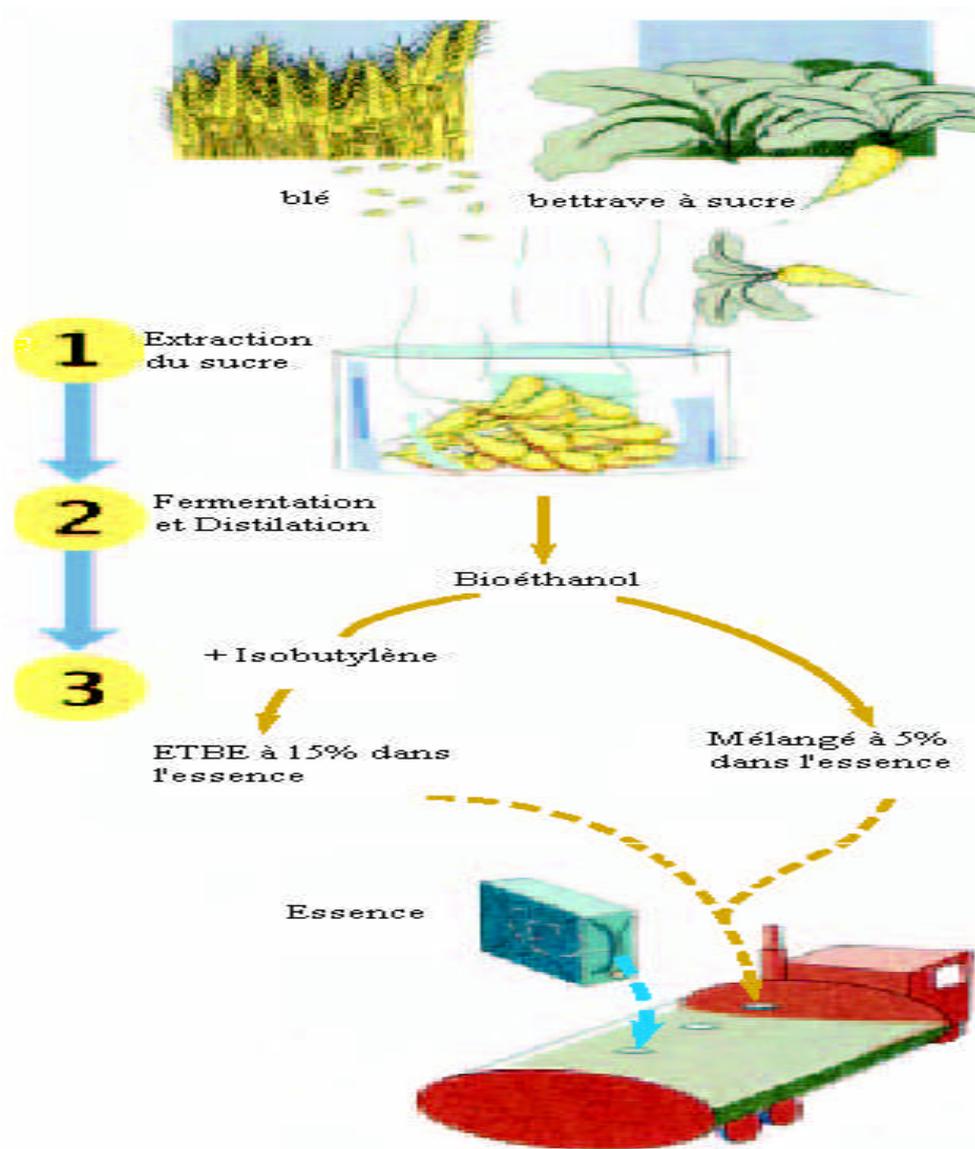
Le bioéthanol peut être produit à partir de divers genres de biomasse, mais seulement peu de récoltes contiennent les sucres simples qui peuvent facilement être séparés et adaptés dans le procédé de fermentation. Cette séparation est faite par l'extraction ou l'écrasement. Pour accomplir le rétablissement de sucre, ce procédé de séparation doit être répété plusieurs fois. D'autres types de biomasse tels que les grains qui contiennent de plus grandes et de plus complexes molécules d'hydrate de carbone qui doivent être décomposés d'abord à des sucres plus simples par l'hydrolyse [23].

La figure III.3 Présente un exemple d'un arrangement de processus de conversion pour la production d'éthanol à partir du grain, avec le moulage sec comme prétraitement.

La figure III.4 Montre le processus d'extraction d'éthanol par la fermentation et la distillation



**Figure III.3.** Processus de conversion et de production de bioéthanol à partir de grain [6]



**Figure III.4.** Processus de conversion et d'utilisation de bioéthanol

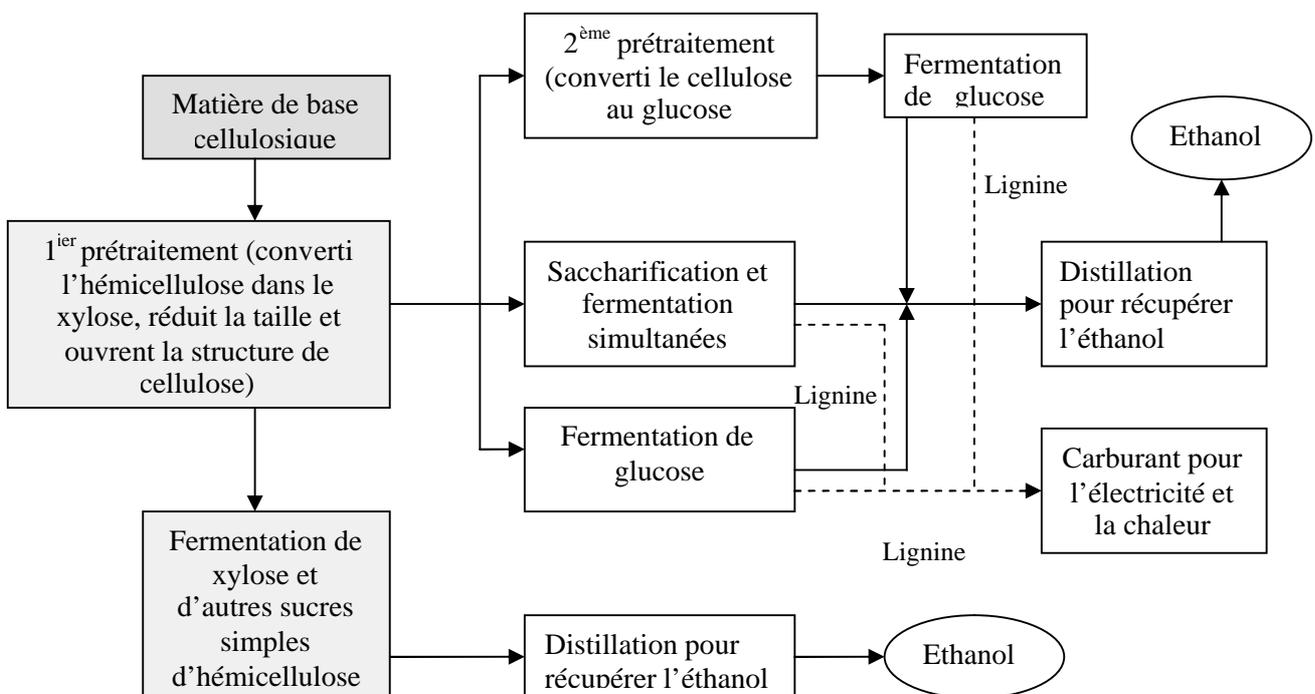
La première étape dans ce processus de conversion comporte le fraisage ou le meulage des grains pour libérer la matière de base féculent dedans, ensuite cette matière est diluée dans l'eau pour ajuster une quantité de sucre dans la mûche, puis ce mélange est cuit pour dissoudre tous les amidons hydrosolubles, l'amidon est converti en sucres simultanément, ce qui peut être fait par des enzymes ou par l'hydrolyse acide, toutes les graines produisent des enzymes qui peuvent convertir l'amidon en forme de sucre fermentescible.

Dans le cas de l'hydrolyse acide, l'acide minéral dilué est ajouté au grain avant de les faire cuire. Des hydrates de carbone courts résultant de ces étapes de transformation peuvent être fermentés par des micro-organismes. Pour la croissance de la levure requise et le procédé de fermentation, la solution doit être légèrement acide à savoir un pH entre 4.8 et 5.0.

Pendant la fermentation l'éthanol est produit puis dilué avec de l'eau, ce processus a également comme conséquence la formation du CO<sub>2</sub> par une série de distillation et des étapes de déshydratation. Le processus de conversion de la biomasse lignocellulosique à l'éthanol diffère seulement du processus décrit ci-dessus de la façon de décomposer, ou d'hydrolyser, la matière première au sucre fermentescible.

Ce procédé d'hydrolyse est plus difficile que l'hydrolyse de l'amidon lignocellulosique de la biomasse qui contient des polymères d'hydrate de carbone, appelés la cellulose entre (40 à 60% de poids sec) et l'hémicellulose entre (20 à 40% de poids sec) qui peut être convertie en sucres. La cellulose se compose de molécules de glucose qui sont collées ensemble dans des longues chaînes qui forment une structure cristalline, l'hémicellulose se compose d'un mélange de polymères composés du xylose, du mannose, du galactose, ou de l'arabinose, elle est beaucoup moins stable que la cellulose, les deux matières ne sont pas solubles dans l'eau. La fraction restante, un polymère aromatique complexe appelé la lignine entre (10 à 25% de poids sec) ne peut pas être fermentée parce qu'elle est résistante à la dégradation biologique, ce matériel peut être utilisé pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur.

La figure.III.2 Indique les voies générales pour la conversion de biomasse lignocellulosique en éthanol.



**Figure III.5.** Voies générales de la fermentation de la matière cellulosique à l'éthanol [11][25].

Plusieurs technologies ont été développées pour la conversion de fraction fermentescible (cellulose et hémicellulose). La méthode la plus ancienne est de convertir les matériaux fermentescibles par l'hydrolyse d'acide dilué (première étape de prétraitement). Les basses concentrations des acides (0.5%) cassent la liaison d'hydrogène entre les chaînes de cellulose et décristallisent le matériel à une température d'environ 200°C, ceci a comme conséquence la conversion d'hémicellulose dans C<sub>5</sub> et C<sub>6</sub> sucre solubles (principalement xylose et mannose), ce qui peut directement être fermenté dans l'éthanol. L'hydrolyse de l'hémicellulose peut avoir lieu dans des conditions relativement douces. La fraction de cellulose est plus résistante et exige un traitement plus rigoureux. Dans cette première étape de traitement préparatoire, la cellulose est exposée à l'hydrolyse en réduisant sa taille et en ouvrant sa structure. Le glucose, un sucre C<sub>6</sub>, est produit à partir de ces fractions en utilisant un acide avec une concentration de 2% et une température jusqu'à 240°C (deuxième étape de prétraitement).

Une autre possibilité pour convertir la cellulose en glucose est d'employer les enzymes de cellulase qui sont capables de décomposer la cellulose, la première application de l'hydrolyse du bois enzymatique à un éthanol, le processus devait remplacer l'étape d'hydrolyse acide de cellulose avec une étape d'hydrolyse d'enzymes de cellulase, ce qui s'appelle hydrolyse et la fermentation séparée dont le rendement de la cellulose est augmenté.

La saccharification et la fermentation postérieures sont simultanées dans ce type d'hydrolyse, les procédés de fermentation enzymatiques de sucre prennent place en même temps dans un navire. Ce qui réduit le nombre de réacteurs requis pour le processus de conversion. Un avantage de ce processus est que les sucres produits pendant l'hydrolyse sont immédiatement fermentés dans l'éthanol, ce qui évite des problèmes tels que l'accumulation de sucre et l'inhibition d'enzymes [11].

Pour les récoltes contenant du sucre, d'amidon et de la biomasse lignocellulosiques, la fermentation et les étapes de distillation sont fondamentalement identiques, l'éthanol produit peut être employé dans les moteurs de véhicules de transport en forme pure ou mélangé à l'essence. S'il est appliqué dans des moteurs de véhicule, sa teneur en eau doit être de près de zéro pour réduire l'effet corrosif du carburant. La purification additionnelle par l'extraction de

l'eau (déshydratation) de l'alcool est une étape du processus supplémentaire dans la production d'éthanol.

L'éthanol peut également servir d'additif d'oxygénation en essence pour la réduction de CO, ou comme matière première pour la production d'ETBE (ethylbutylether). L'ETBE est un produit également oxygéné pour l'essence, il augmente l'indice d'octane.

### III.4.3. Usage final du biocarburant

#### III.4.3.1. Propriétés du biocarburant

L'éthanol est mieux employé dans un moteur à allumage par étincelle en raison de son indice d'octane élevé et en raison de sa faible qualité d'allumage (bas indice de cétane). L'éthanol est moins approprié aux moteurs diesel. Les solutions techniques pour ce problème sont d'injecter de petites quantités de carburant gazole, fumigation de l'alcool et de l'utilisation d'un circuit d'allumage électrique (étincelle) ou des additifs.

Dans Le tableau III.2, les propriétés de l'éthanol (et sa dérivée ETBE) sont énumérées et sont comparées à celles de l'essence.

**Tableau III. 2.** Propriétés de carburant d'éthanol, comparées à l'essence [11]

Propriétés du carburant	Ethanol	ETBE	Essence
Formule chimique	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> -OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
Masse moléculaire (kg/kmol)	46	102	114
Nombre d'octane (MON)	92	105	86
Nombre d'octane (RON)	109	118	97
Nombre de cétane	11		8
Pression de vapeur (kPa) à 15°C	16.5	28	75
Masse volumique (kg/l) à 15°C	0.80	0.74	0.75
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/kg) à 15°C	26.4	36.0	41.3
Pouvoir calorifique inférieur (Mj/l) à 15°C	21.2	26.7	31
Rapport stoechiométrique (kg air/kg fuel)	9.0		14.7
Température d'ébullition (°C)	78	72	30-190

L'indice d'octane de l'éthanol est plus haut que celui de l'essence, l'éthanol a de meilleure caractéristique antidétonante. Cette qualité du carburant peut être exploitée si le rapport de compression dans le moteur est ajusté. Ce qui augmente l'efficacité de carburant du moteur, l'oxygène contenu dans l'éthanol mène également à un rendement plus élevé, qui a comme conséquence un processus plus propre pour la combustion aux températures relativement basses. Les émissions dans le ciel demeure relativement basses. Cependant, la

basse pression de vapeur de l'éthanol est désavantageuse ainsi que les moteurs employant l'éthanol ne peuvent pas fonctionner aux températures au-dessous de 20°C (difficultés de démarrage à froid). Les problèmes les plus importants pour l'application des alcools en tant que carburants dans les moteurs des véhicules est la densité de l'éthanol qui est plus haute que celle de l'essence, ce qui ne peut pas compenser la teneur en énergie qui est inférieure (valeur calorifique inférieure) par rapport à celle de l'éthanol. L'éthanol exige un rapport (air/carburant) inférieur que celui de l'essence donc moins d'oxygène est nécessaire pour sa combustion.

#### **III.4.4.2. Adaptations de moteur et d'infrastructure**

L'éthanol peut être employé dans les moteurs à allumage par étincelle sans adaptations de l'infrastructure existante pour l'essence, cela s'il est mélangé à l'essence jusqu'à 20%. Le problème le plus important est l'utilisation d'éthanol pur dans des moteurs de véhicule à des basses températures, parce que son évaporation est trop lente. L'allumage d'éthanol peut être amélioré en ajoutant des additifs (tels que l'essence), ou en chauffant l'alcool avec un élément de chauffe électrique à l'admission du moteur. Une autre difficulté est la teneur en énergie volumétrique de l'éthanol qui est inférieure, ce qui nécessite un plus grand écoulement de carburant. D'ailleurs, moins d'oxygène est nécessaire pour la combustion, ce qui signifie que la chambre de combustion, la synchronisation de soupape, l'endroit de la bougie d'allumage et l'installation du réservoir de carburant doivent être modifiés pour pouvoir employer l'éthanol pur. Puisque l'indice d'octane de l'éthanol est plus haut que celui de l'essence, on peut augmenter le rapport de compression du moteur qui a comme conséquence une exécution plus élevée pour le moteur.

L'éthanol est incompatible avec quelques matières employées dans les moteurs, s'il est mélangé à l'essence dans une proportion élevée ou appliqué en forme pure. Il affecte certains genres de plastiques, élastomères et les métaux comme l'acier, l'aluminium et le magnésium. Quand l'eau est dissoute dans l'alcool, son agressivité augmente vers le métal donc nous devons appliquer des plastiques spéciaux et des métaux résistants à la corrosion et l'usure. Par exemple l'acier inoxydable, doit être employé pour des éléments de moteur.

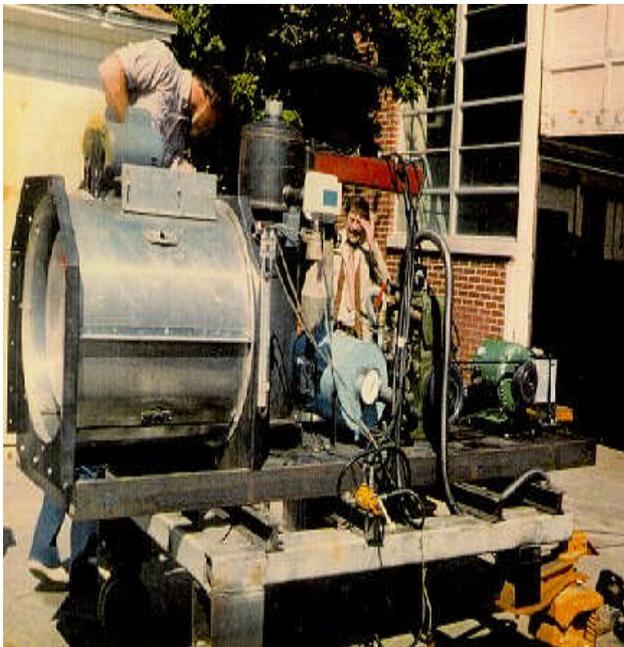
L'application de l'éthanol comme carburant de transport exige quelques adaptations des équipements de la distribution, de l'infrastructure et de réapprovisionnement en combustible. La teneur en énergie inférieure de l'éthanol est nécessaire pour les grands réservoirs de

stockage. Si le même volume de réservoir est employé, la gamme de véhicule est fortement réduite. Pour les camions-citernes et les réservoirs de stockage, les matières employées devraient être compatibles avec l'éthanol, juste comme le réservoir du moteur, comme l'éthanol est soluble dans l'eau donc ils devraient être imperméables à l'eau.

En outre, ils doivent être équipés des toits fixes et des couvertures flottantes internes. Nous devons prendre en considération que l'éthanol peut former une vapeur au-dessus du carburant dans les réservoirs même aux températures ambiantes, qu'il faut éviter parce qu'elle peut causer une explosion et parce qu'elle influence négativement les capacités de conduite, en installant des barrières de vapeur dans l'installation carburant de la voiture et dans le distributeur de carburant et en ajoutant des additifs volatils, comme l'essence.

L'éthanol est biodégradable, de sorte qu'il y ait moins de risque pour la pollution de la flaque, du sol et de l'eau, comparée à l'utilisation des combustibles fossiles [6] [11] [23].

Les figures suivantes montrent une machine pour la conversion de la biomasse et un exemple d'application d'éthanol.



**Figure II.6.** Unités pour la production de méthane [30]  
Digesteur pour la transformation de déchets



**Figure II.7.** Exemple d'application d'éthanol sur le moteur [20]  
Tracteur Renault 100 ch avec de l'éthanol, France

### **Conclusion**

Le processus de gazéification permet de transformer la biomasse aux gaz de synthèse qui peuvent être utilisés dans les chaudières et les turbines à gaz pour la génération d'électricité et/ou de la chaleur, ainsi comme carburant pour moteurs après liquéfaction.

Pour l'application de l'éthanol sur des moteurs de véhicule, sa teneur en eau doit être réduite à zéro pour éviter l'effet corrosif du carburant. On a vu aussi dans le présent chapitre comment surmonter les problèmes causés par les propriétés des biocarburants qui ne sont pas en général semblable à celles de l'essence.

L'application de méthanol dans le moteur de véhicules nécessite de prendre certaines précautions vu ces caractéristiques toxiques.

## Chapitre IV

### Description du banc d'essai TD43

### IV.1.Introduction

Le banc d'essai TD 43 est construit à partir d'un moteur diesel marin à quatre temps « FarrymanA30 », refroidi par l'eau et transformé en vue de lui conférer une certaine universalité. Le taux de compression peut varier entre 5 et 18, ce qui permet en alimentation normale de faire fonctionner le moteur à l'essence, au gazole, au propane ou au gaz naturel.

Des biocarburants (le bioéthanol, l'ETBE, le biométhanol, le MTBE et le biodiesel) peuvent être utilisés comme aditifs aux carburant d'origine fossile et testés sur le banc d'essai toute fois on fait varier les vitesses ou le taux de compression pour différents pourcentages pour voir les critères d'optimisation et leur effets sur les performances du moteur.

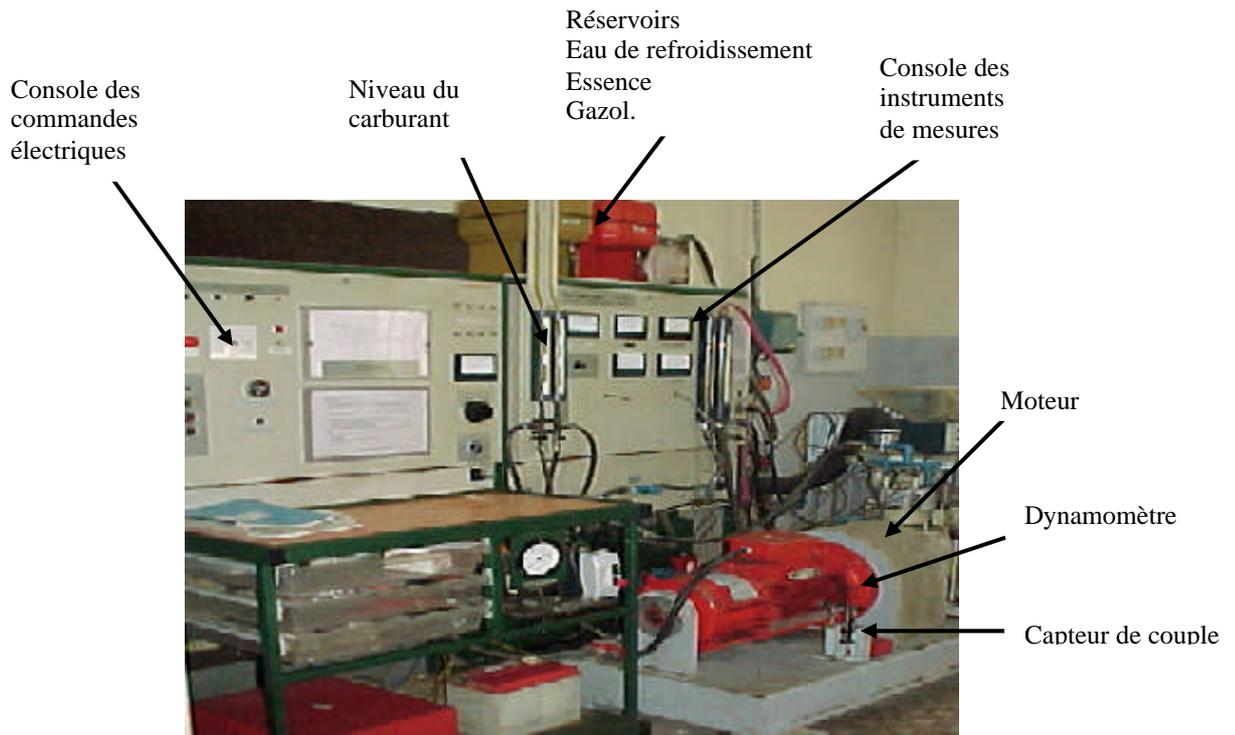
### IV.2.Généralités

Le banc d'essai dispose d'un sur presseur qui peut être utilisé en version diesel et injection d'essence. Un dynamomètre électrique est accouplé au moteur et sert à démarrer ce dernier et le faire tourner lors des essais de frein.

Un socle rigide en acier reposant librement sur quatre pieds anti-vibration sert de support au moteur ainsi qu'au dynamomètre.

Deux consoles sont montées derrière le moteur, celle de gauche regroupe les commandes électriques du dynamomètre en mode moteur et en mode générateur, ainsi que les commandes de sélection des instruments de mesures des performances du moteur. Au-dessus de cette console sont fixés les réservoirs d'essence, de gazole ainsi que le réservoir d'eau de refroidissement. Derrière la console sont montés un débitmètre visqueux destiné à mesurer la consommation d'air du moteur et l'ensemble radiateur-ventilateur assurant le refroidissement.

La figure IV.1. Montre les sections du banc d'essai moteur TD43



**Figure IV.1.** Banc d'essai TD 43 [26]

### IV.3. Les différents organes du banc d'essai moteur

#### IV.3.1. Le moteur

Le moteur est à quatre temps de conception classique. Mis à part le fait que le taux de compression peut être modifié, l'ensemble complet : culasse, cylindre et soupapes peuvent se déplacer par rapport au carter-moteur à l'aide de manette à cliquet. Les tiges des poussoirs des soupapes sont entraînées par des poussoirs hydrauliques qui se règlent automatiquement quand on modifie le taux de compression.

##### IV.3.1.1. Modification du taux de compression

Le taux de compression varie si le volume de la chambre de combustion varie, pour cela il suffit de déplacer la partie supérieure du moteur par rapport au carter. Deux butées pré-réglées sont prévues pour éliminer tout risque de programmer des taux sortant de la plage autorisée de 5 à 18. Le déplacement du cylindre est mesuré à l'aide d'un micromètre. La courbe d'étalonnage attachée à la console droite nous donne le réglage micrométrique correspondant au taux de compression voulu.

Les figures IV.2. et IV.3. Montrent les courbes d'étalonnage pour le réglage du taux de compression à l'aide d'un micromètre.

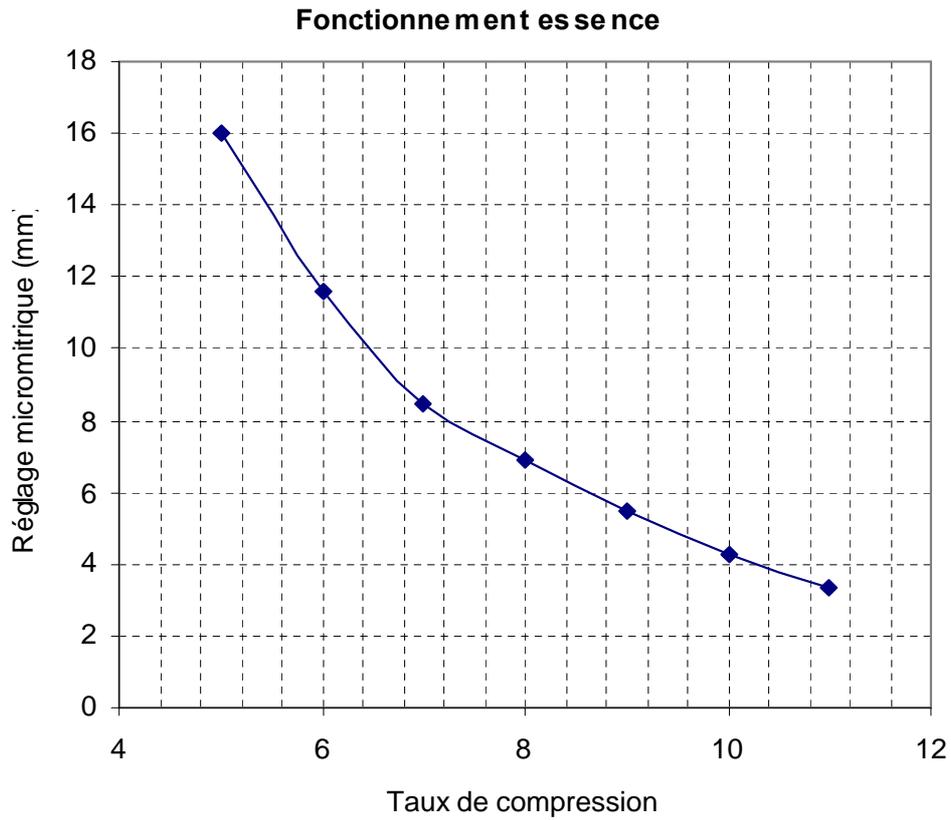


Figure IV.2. Courbe d'étalonnage pour un fonctionnement essence [26]

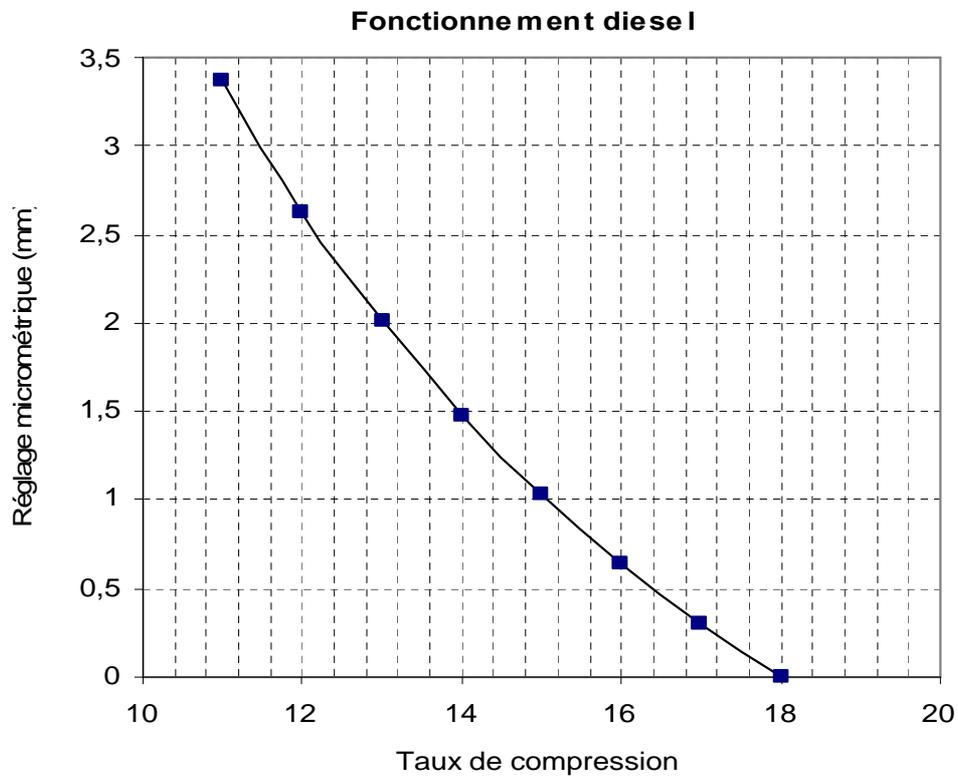


Figure IV.3. Courbe d'étalonnage pour un fonctionnement diesel [26]

### **IV.3.1.2. Protection du moteur**

Le moteur est protégé contre la surchauffe et la survitesse. En effet, il est équipé d'un dispositif automatique qui coupe les alimentations et arrête complètement le banc dès qu'il excède la valeur de 85°C, et contre la survitesse en raison des forces centrifuges, la vitesse maximale du moteur est limitée à 2750 tr/mn et pour cela le banc est pourvu d'un contacteur centrifuge de survitesse qui active le moteur dès que la vitesse atteint la valeur sus citée.

### **IV.3.1.3. Système d'allumage**

Le système d'allumage est composé d'une bobine classique de 12 V et un rupteur dont la commande est assurée par une came. L'allumage peut être calé entre 30° avant PMH et 10° après PMH.

## **IV.3.2. Dynamomètre**

Le dynamomètre est un appareil électrique conventionnel à courant continu qui, outre son rôle de frein d'essai du moteur, sert également à mettre celui-ci en marche et à le faire tourner lors des essais de mesure.

Les commandes du dynamomètre sont situées sur la console de gauche.

En plaçant le sélecteur « Motor-Generate » en position et en branchant un jeu de résistances électriques en parallèle « Banc de charge », le dynamomètre oppose au moteur une résistance qui permet de contrôler sa vitesse à pleine ouverture. La variation de l'intensité de charge s'effectue à l'aide du bouton « on LOAD CURRENT CONTROL ». Le dynamomètre est conçu pour supporter en permanence une intensité de 25A. Le carter du dynamomètre repose sur deux paliers à roulements et pivote entre deux limites très étroites.

### **IV.3.3. Tachymètre**

Le banc d'essai est muni d'un tachymètre électrique qui sert à mesurer la vitesse du moteur en comptant les impulsions, ceci grâce à un disque, pourvu à sa périphérie de fentes et monté sur un arbre intermédiaire entraîné par l'arbre du boîtier d'allumage à l'aide d'une roue dentée et d'une courroie.

#### **IV.3.4. Système de refroidissement du moteur**

L'eau est pompée dans le collecteur de tête vers le radiateur qui dissipe la chaleur dans l'atmosphère et contribue à harmoniser l'écoulement. Elle passe ensuite dans la chemise d'eau du cylindre où elle se charge de la chaleur dégagée par le moteur. Les températures de l'eau sont mesurées à l'entrée et à la sortie par des capteurs installés dans la chemise. L'eau poursuit son chemin à travers la vanne de commande et le rotamètre est retourné finalement au collecteur de tête.

#### **IV.3.5. Instrument de mesure**

Parmi les autres instruments que comporte le banc d'essai, on distingue le couple-mètre qui mesure le couple, les thermocouples qui donnent les différentes températures (eau de refroidissement du moteur, eau de calorimètre, gaz d'échappement)

Le circuit de mesure de la puissance qui, grâce aux signaux électriques communiqués par le couple-mètre et le tachymètre, évalue électroniquement la valeur de la puissance au frein. Un calorimètre relié aux thermocouples, alimenté en eau du robinet du laboratoire permet la mesure de la température des gaz d'échappement. Le banc est équipé également d'un débitmètre visqueux relié à un manomètre dont le rôle est de mesurer la consommation d'air du moteur.

#### **IV.3.6. Accessoires supplémentaires**

Pour son fonctionnement en version essence et propane ou gaz naturel, le banc est équipé respectivement d'un circuit d'allumage et d'un compteur de gaz avec un carburateur adéquat (carburateur à essence et carburateur à gaz).

Dans le but d'accroître la puissance de sortie du moteur par l'amélioration du rendement volumétrique (augmentation de la masse d'air aspirée dans la chambre de combustion), le banc d'essai dispose alors d'un surpresseur électrique permettant la suralimentation du moteur [26].

#### **IV.3.7. Spécification du banc d'essai moteur TD43**

Les différentes caractéristiques de banc d'essai TD 43 sont présentées dans le tableau.1.

**Tableau IIV.1.** Spécification du banc d'essai TD43 [26].

Taux de compression	5 :1 à 11 :1 (essence)
	12 :1 à 18 :1 (diesel)
Alésage	95 mm
course	82 mm
cylindrée	582 cm <sup>3</sup>
régime	1000 à 2500 tr/mn
Puissance maximale	7 kw
Couple maximum	50 Nm
Calage de l'allumage (essence)	De 30° avant à 10° après le PMH
Venturi (essence)	19, 21, 23, 25

#### IV.4. Les grandeurs mesurables

##### IV.4.1. La vitesse

Mesurée électroniquement par un dispositif de couplage d'impulsion. On lit sa valeur directement sur le cadran, (Tachymètre).

##### IV.4.2. Le couple

La tendance du carter à tourner avec l'arbre est absorbée par un bras poussant contre un ressort dont la compression est mesurée par un potentiomètre linéaire.

Le signal électrique de sortie du potentiomètre est proportionnel au couple exercé sur le carter qui se lit directement sur le cadran du couplemètre.

##### IV.4.3. La puissance du frein

Les signaux électriques du tachymètre et du couplemètre sont transmis au circuit de mesure de la puissance qui applique électroniquement la relation :

$$P = \frac{2\pi N}{60.10^3} C \quad (\text{kw})$$

qui sera lue directement sur le cadran. Les pertes par friction ne sont pas comptées.

#### IV.4.4. Les températures

Toutes les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples et sont affichées directement sur les cadrans des thermomètres.

#### IV.4.5. La consommation d'air

L'air n'est aspiré dans le cylindre que pendant une course du piston sur quatre temps, car le moteur est monocylindre. Pour réduire la tendance à avoir un débit pulsant, un débitmètre visqueux est prévu ainsi pour éviter la nécessité d'un volume d'amortissement très important. La mesure du débit s'effectue en relevant la chute de pression entre l'intérieur et l'extérieur du cylindre, et la courbe d'étalonnage nous donne la valeur du débit d'air admis.

La figure IV.4. Montre la courbe d'étalonnage qui donne la variation de débit massique d'air Pour la correction dans le cas d'autre températures et pression en multipliant le débit

$$\text{massique d'air par : } 3,564 \cdot P_a \cdot \frac{(T + 114)}{T^{2.5}} \quad [26]$$

Avec :  $P_a$  : (mbar) et  $T$  : (K)

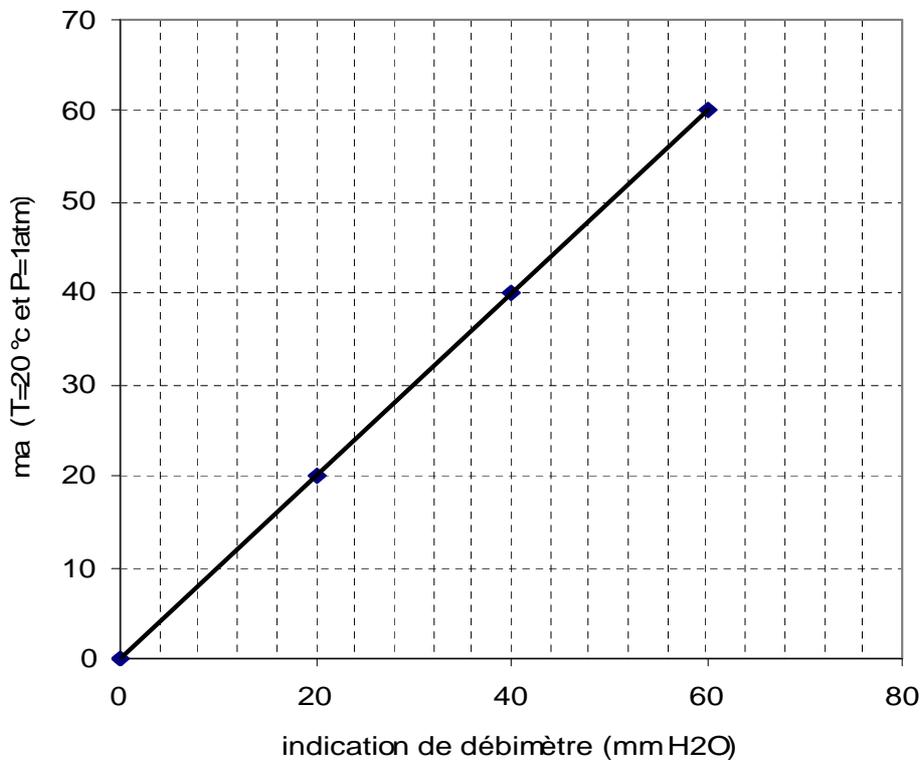


Figure IV.4. Courbe d'étalonnage pour le débit d'air [26]

#### **IV.4.6. La consommation du carburant**

Elle est déterminée après l'ouverture des robinets et en mesurant le temps nécessaire au moteur pour consommer les différents volumes donnés par la pipette.

#### **Conclusion**

Le banc d'essai moteur TD43 n'est pas adopté pour l'utilisation de biocarburant à l'état pur, mais on peut réaliser des essais d'application des mélanges biocarburant-carburant fossile en petites proportions par exemple « biodiesel-gazole fossile jusqu'à 20% », « bioéthanol-essence fossile jusqu'à 25% », « biométhanol-essence fossile jusqu'à 15% ».

Les instruments de mesures du banc d'essai permettent, pour toute application, de faire varier la vitesse de rotation ou le taux de compression pour différentes fractions de biocarburants afin de déterminer les performances du moteur. Certains biocarburants ont un indice d'octane élevé ce qui permet d'augmenter le rapport de compression du moteur qui a comme conséquence une exécution plus élevée pour le moteur (augmentation de puissance du moteur).

## Chapitre V

# Calculs théoriques des performances énergétiques des biocarburants

## V.1. Introduction

L'agrément de conduite et d'utilisation en toutes circonstances, l'obtention de performances satisfaisantes, la fiabilité et la longévité d'une automobile dépendent évidemment de facteurs technologiques, mais aussi des critères de qualité du mélange biocarburant avec un carburant d'origine fossile. Ces critères sont imposés par les réglementations, ainsi que par les contraintes de stockage et de distribution. C'est ainsi que nous nous intéressons dans notre travail aux méthodes de calculs théoriques de certains critères physiques et chimiques des mélanges biocarburants (éthanol, méthanol, ETBE, MTBE, biodiesel et le démytylether) avec des carburants d'origine fossile.

On s'appuie sur le résultat de la référence [27], qui a constaté que le mélange d'éthanol-essence à un effet négligeable sur la puissance du moteur et le résultat de [28], qui a mesuré le temps requis pour consommer 32ml du mélange carburant ainsi que la puissance de frein du moteur. Nous ferons une étude théorique de l'effet des différents pourcentages du mélange éthanol-essence sur le rapport d'air-carburant ( $L$ ), le débit du carburant ( $m_f$ ), le rendement global ( $\eta_g$ ) et la consommation spécifique du carburant ( $Sfc$ ) ainsi que les émissions d'échappement d'oxyde de carbone ( $CO$ ) et d'anhydride carbonique ( $CO_2$ ). Notons que, on fait varier la vitesse du moteur de 500 tr/mn, entre 1000 et 2500 tr/mn.

## V.2. Propriétés des mélanges biocarburants-carburants fossiles

### V.2.1. Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique massique ou volumique représente la quantité d'énergie dégagée par unité de masse ou de volume du carburant, lors de la réaction chimique de combustion complète conduisant à la formation de  $CO_2$  et  $H_2O$ .

On fait la distinction entre le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI), selon que l'eau obtenue par combustion se trouve à l'état liquide ou à l'état gazeux. La seule grandeur véritablement utile en pratique est le (PCI), puisque dans les produits de combustion rejetés par les moteurs et les brûleurs, l'eau se trouve sous forme de vapeur [2].

Pour un mélange biocarburant-carburant fossile, le pouvoir calorifique en fonction des différents pourcentages de biocarburant se calcule par la formule de **Mendeliev** [2].

$$PCI = 8100C + 3000H + 2600(S - O) - 600(9H + W) \quad (\text{Kcal/kg}) \quad (1)$$

Avec :

C, H, S, O et W désignent le pourcentage en (kg d'éléments/ kg de combustible).

Dans le cas des biocarburants, ne contenant pas de soufre et de l'eau [2], la formule prend la forme suivante :

$$(PCI = 8100.C + 24600.H - 2600.O) 4.18 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2)$$

La détermination du pouvoir calorifique dépend du calcul de la composition élémentaire par une analyse chimique.

Soit un mélange d'un biocarburant (A) et d'un carburant d'origine fossile (B),  $x_i$  et  $(1-x_i)$  leurs fractions respectivement dans le mélange, donc :

$$C = \left[ \frac{x_i \cdot m_c a_c}{\sum ma} \right]_A + \left[ \frac{(1-x_i) \cdot m_c a_c}{\sum ma} \right]_B \quad (3)$$

$$H = \left[ \frac{x_i \cdot m_h a_h}{\sum ma} \right]_A + \left[ \frac{(1-x_i) \cdot m_h a_h}{\sum ma} \right]_B \quad (4)$$

$$O = \left[ \frac{x_i \cdot m_o a_o}{\sum ma} \right]_A + \left[ \frac{(1-x_i) \cdot m_o a_o}{\sum ma} \right]_B \quad (5)$$

Avec :

$m_c, m_h, m_o$  : Les masses atomiques des éléments correspondants.

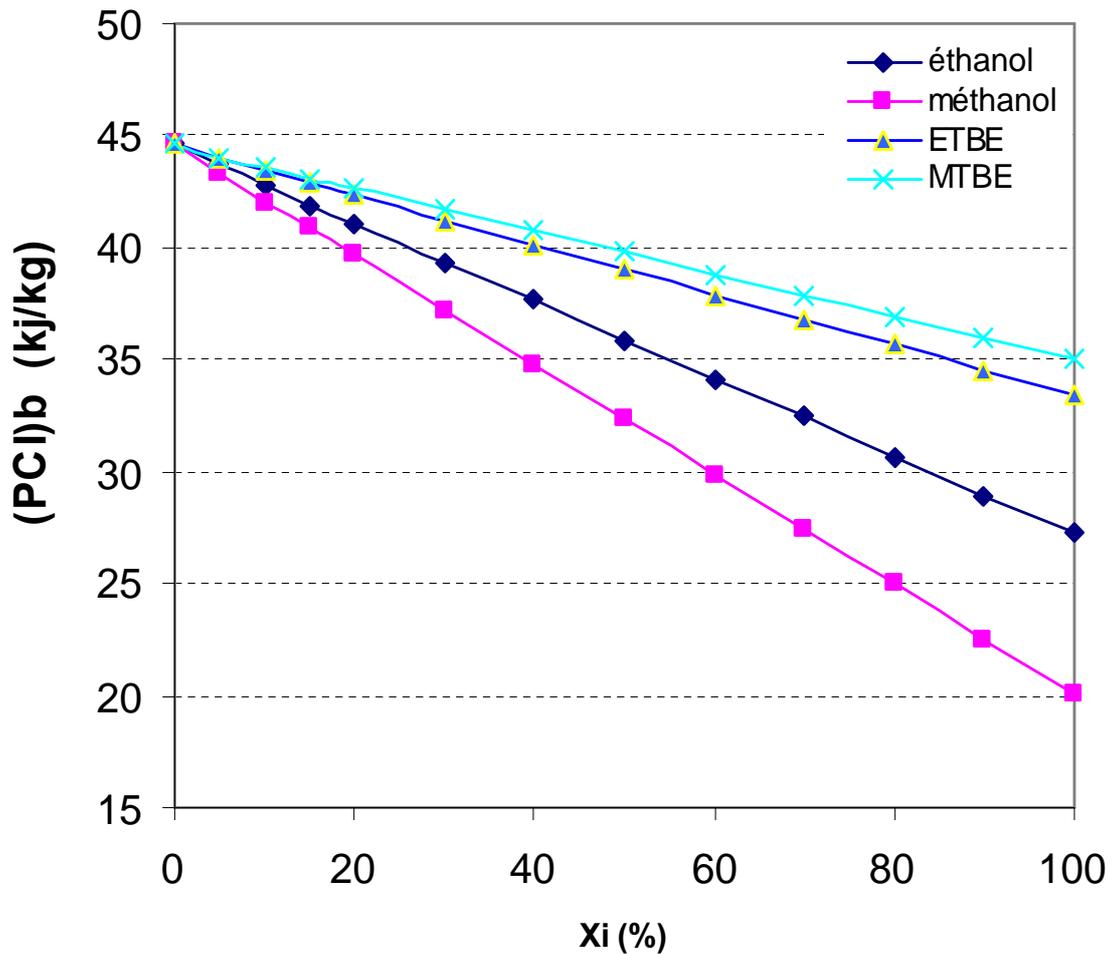
$a_c, a_h, a_o$  : Les nombres d'atomes des éléments correspondants.

$\sum ma$  : La masse molaire d'un élément

### V.2.1.1. Pour un mélange biocarburant-essence

Dans cette application et à l'aide des relations précédentes, On calcule le pouvoir calorifique pour un mélange des différents pourcentages d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ), de méthanol ( $CH_3OH$ ) et de leurs dérivés ETBE ( $C_4H_9OH$ ), MTBE ( $C_5H_{11}OH$ ) avec l'essence ( $C_8H_{18}$ ).

Les résultats sont montrés dans le tableau.V.1 (voir annexes) et sont représentées par le graphe de la figure V.1.



**Figure V.1.** Effet du biocarburant sur le pouvoir  $(PCI)_b$  (essence)

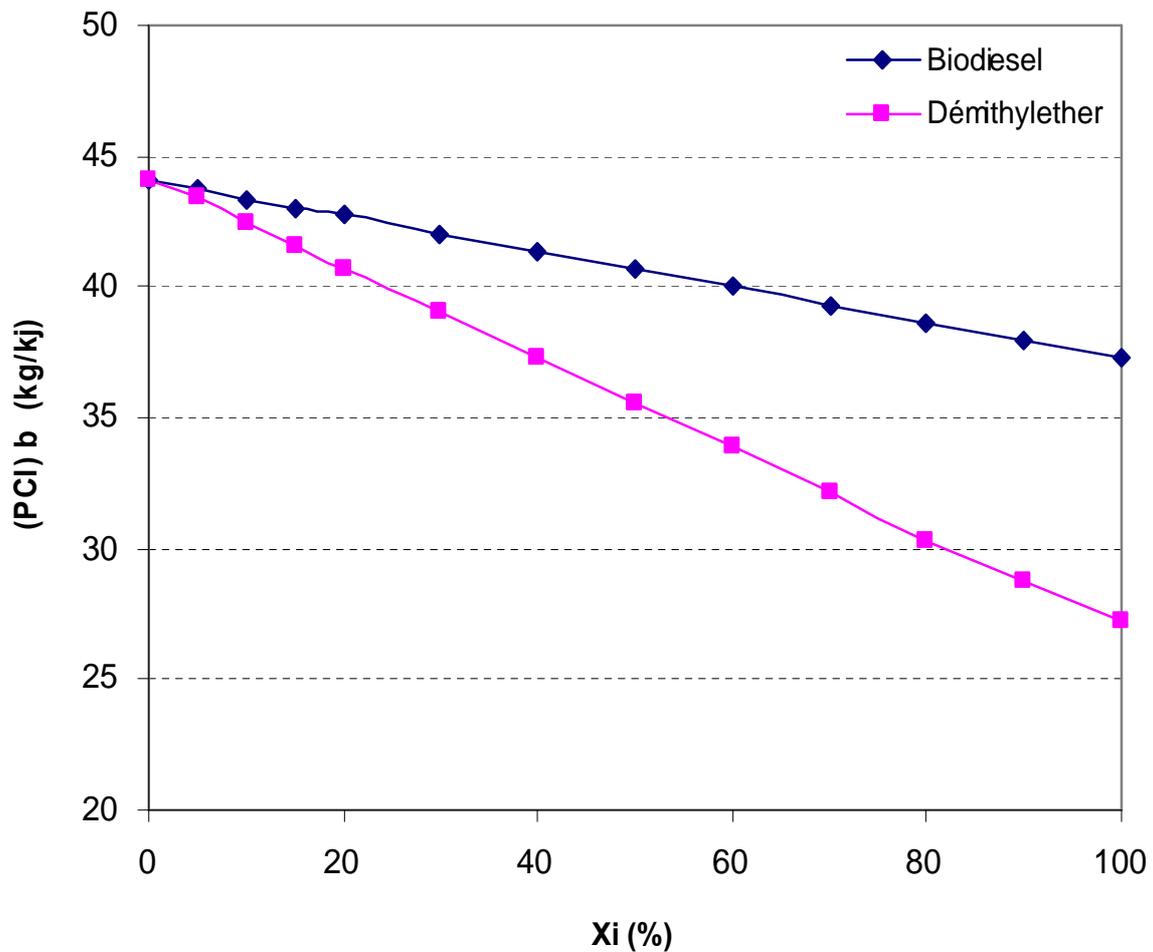
La figure ci-dessus montre l'effet d'addition de biocarburant sur le pouvoir calorifique, ce dernier diminue avec l'augmentation du (%) de biocarburant ajouté, ce qui est logique puisqu'il contient en lui-même une partie de l'oxygène nécessaire à leur combustion. Les écarts seront plus importants en cas d'utilisation de mélanges à forte teneur en biocarburants.

On constate aussi, que le  $(PCI)_b$  du mélange des dérivés MTBE et ETBE de méthanol et d'éthanol respectivement, représentent une chute moindre, ce qui explique qu'une bonne quantité d'énergie dégagée par unité de masse ou de volume du carburant par rapport aux autres biocarburants.

### V.2.1.2. Pour un mélange biodiesel

Dans cette application, on calcule le pouvoir calorifique pour un mélange de différents pourcentages biodiesel ( $C_{84}H_{184}O_{11}$ ) et le déméthylether ( $C_2H_5OH$ ) avec le gazole d'origine fossile ( $C_9H_{19}$ ).

Les résultats sont montrés dans le tableau.V.2 (voir annexe) et sont représentés par le graphe de la figure. V.2



**Figure V.2.** Effet du biocarburant sur le pouvoir  $(PCI)_b$  (gazole)

La figure V.2 montre le pouvoir calorifique qui diminue avec l'augmentation du (%) de biocarburant ajouté, ce qui est logique puisque les biocarburants sont des carburants l'oxygénés. Les écarts seront plus importants pour un pourcentage de mélanges à forte teneur en biocarburants.

On constate aussi, que le  $(PCI)_b$  de mélange biodiesel, représente une chute moindre, ce qui implique une bonne quantité d'énergie dégagée par unité de masse ou de volume du carburant par apport au mélange DME.

### V.2.2. Indice d'octane

C'est la caractéristique essentielle des essences ou carburants utilisés dans les moteurs à allumage commandé. Elle détermine les qualités de combustion d'un carburant et ses conditions optimales d'utilisation et elle est étroitement associée à la notion du rendement [2].

On distingue, *RON* (*Research Octane Number*) et *MON* (*Motor Octane Number*). L'indice d'octane d'un mélange biocarburant-essence est calculé à partir des relations :

$$(RON)_b = x_i M_A + (1 - x_i) RON_B \quad (6)$$

$$(MON)_b = x_i M_A + (1 - x_i) MON_B \quad (7)$$

Avec :

$RON_B$  : Le RON de constituant,  $B$

$MON_B$  : Le MON de constituant,  $B$

$(RON)_b$  : Le RON du mélange

$(MON)_b$  : Le MON du mélange

$x_i$  : La fraction du constituant A (biocarburant) dans le mélange

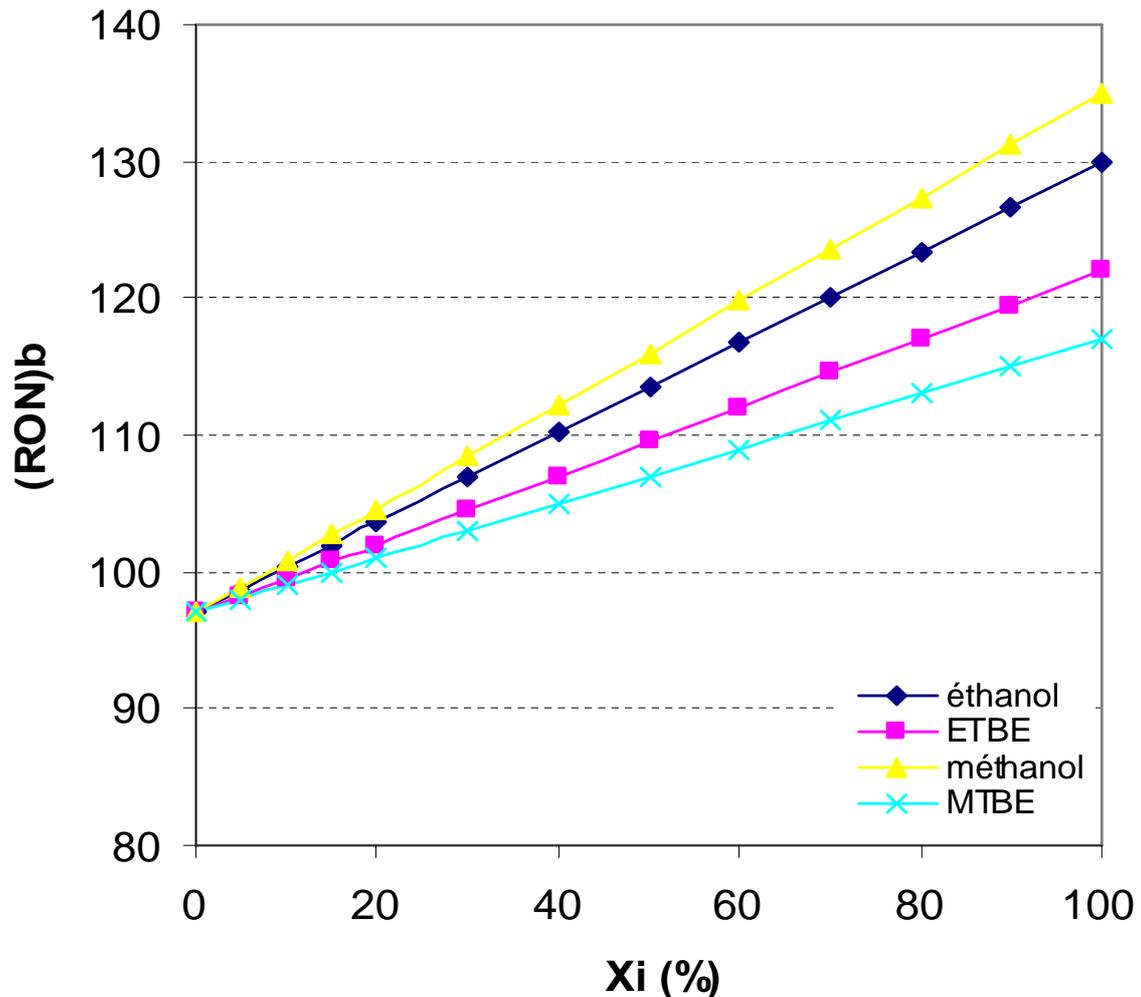
$M$  : Le RON ou MON de l'un des constituants dans le mélange, le tableau suivant montre les différents indices de mélange.

**Tab V.3.** Indice de mélange de biocarburants et leurs dérivés [2]

Biocarburant	Indices de mélange M	
	<i>RON</i>	<i>MON</i>
Méthanol	125-135	100-105
MTBE	113-117	95-101
Ethanol	120-130	98-103
ETBE	118-122	100-10

A partir des relations (6) et (7) on peut calculer le  $(RON)_b$  et  $(MON)_b$  des mélanges biocarburant-essence en fonction de la fraction  $x_i$  du biocarburant. On prend pour le calcul de  $(RON)_b$  et  $(MON)_b$  les valeurs maximales de M,  $RON_B = 97$  et  $MON_B = 86$  (c'est un choix),

Les résultats pour  $RON_b$  sont montrés dans le tableau.V.4 (voir annexes) et sont représentés par le graphe de la figure.V.3



**Figure V.3.** Effet du biocarburant sur l'indice d'octane recherché

Sur la figure V.3 on constate l'effet du biocarburant sur le  $(RON)_b$  qui augmente avec l'augmentation du (%) de biocarburant ajouté, ce qui permet au moteur à essence d'éviter la résistance à l'auto inflammation du mélange biocarburant ainsi que le phénomène de cliquetis. Le  $(RON)_b$  du mélange méthanol-essence représente une augmentation beaucoup plus que les autres mélanges ce qui lui donne une caractéristique de succédané liquide du gaz naturel.

De même pour  $(MON)_b$  les résultats sont montrés dans le tableau.V.5. (Voir annexes) et sont représentés par le graphe de la figure.V.4

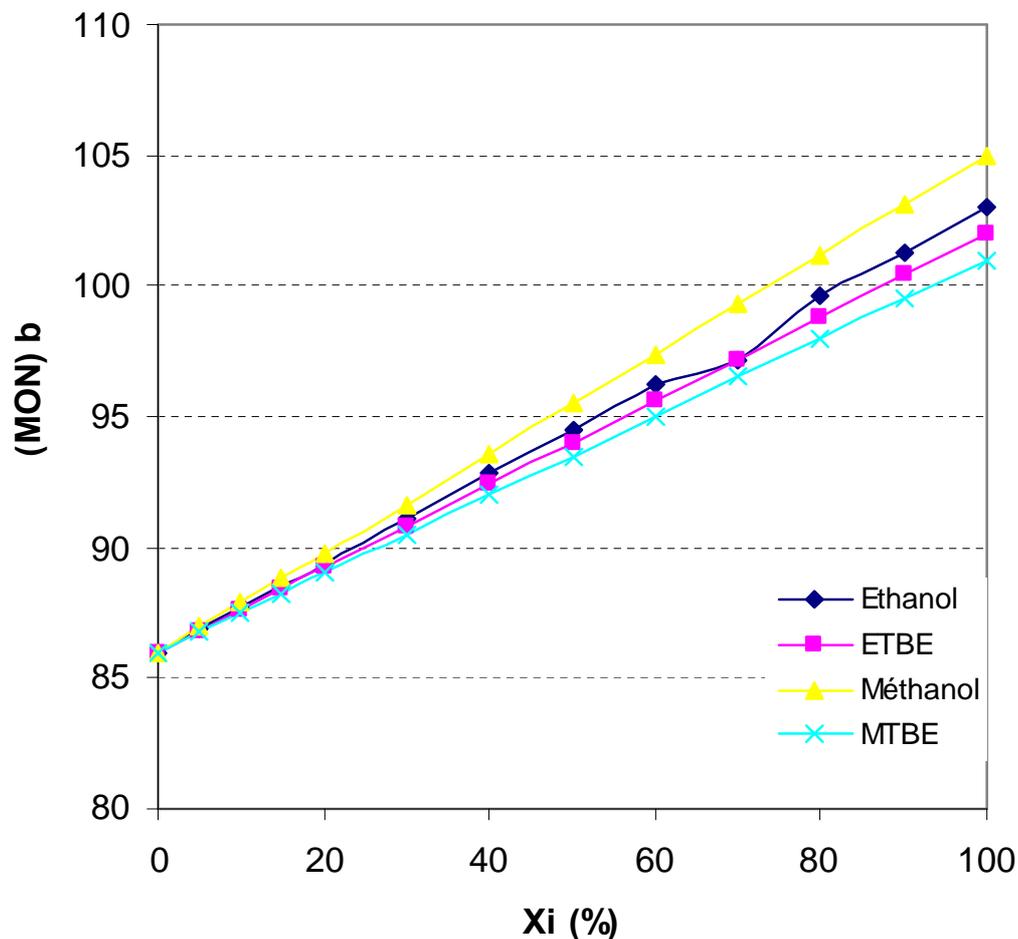


Figure V.4. Effet du biocarburant sur l'indice d'octane moteur

De même sur la figure V.4, l'effet d'addition de biocarburant sur le  $(MON)_b$  qui augmente avec l'augmentation du (%) de biocarburant ajouté. Seulement les plages de variation de  $(MON)_b$  des mélanges biocarburants sont semblables.

### V.2.3. Limite inférieure d'inflammabilité

Lorsqu'on considère un mélange constitué de carburant et d'air, l'expérience montre que la propagation de la flamme n'est possible qu'à l'intérieur d'un certain domaine de composition. La limite d'inflammabilité inférieure, est par définition, le pourcentage extrême en carburant (exprimé généralement en volume) entre lequel le système est inflammable. En effet, l'initiation de la flamme requiert toujours une quantité minimale d'énergie qui devient de plus en plus élevée au voisinage des limites.

La limite d'inflammabilité varie également en fonction des conditions expérimentales, température, pression, dilution de l'oxygène dans le milieu réactionnel. Une élévation de température entraîne une réduction de  $L_{ib}$ . Lorsque plusieurs carburants sont mélangés, la limite inférieure d'inflammabilité peut être estimée par la relation semi-empirique de **Le chatelier** [2].

$$L_{ib} = \frac{100}{\sum_i^j \left( \frac{x_j}{L_{ij}} \right)} \quad (8)$$

Avec :

$L_{ij}$  : limite inférieure d'inflammabilité du constituant  $j$  dans l'air

$L_{ib}$  : limite inférieure d'inflammabilité du mélange

$x_j$  : teneur volumique du constituant  $j$  dans le mélange

A partir des  $L_{ij}$  d'éthanol, de méthanol et d'essence donnés sur la table suivante, on calculera les  $L_{ib}$  pour différentes teneurs volumiques  $x_j$

**Tableau V.5.**  $L_i$  des carburants [29].

Composant	$L_i$ % vol
Méthanol	6.7
Ethanol	3.3
Essence	1.0

L'application de la relation (8), permet de calculer la limite inférieure d'inflammabilité du mélange  $L_{ib}$  des différents mélanges biocarburant-essence qu'on représente par le tableau.IV.6. (Voir annexes) et par le graphe de La figure.V.5, qui montre l'augmentation considérable pour  $L_{ib}$  avec l'augmentation du pourcentage de biocarburant ajouté ce qui est expliqué par la composition oxygénée des biocarburants ajoutés. On remarque ainsi que le mélange de méthanol représente une limite d'inflammabilité meilleure que le mélange d'éthanol.

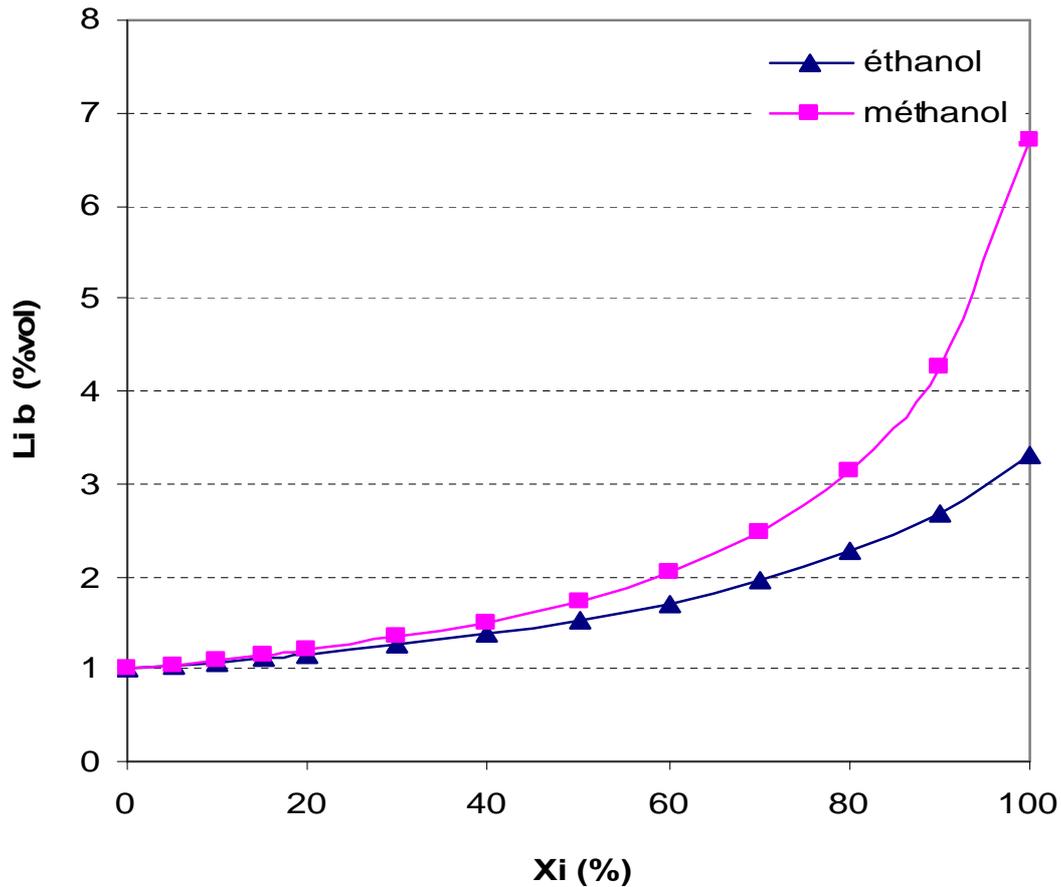


Figure V.5. Effet de biocarburant sur  $L_{ib}$

### V.3. Effet d'un mélange éthanol-essence sur les performances du moteur et des gaz d'échappement

Dans le tableau V.7. (Voir annexes), nous indiquons les propriétés et les conditions auxquelles les performances du moteur sont calculées.

#### V.3.1. Effet du mélange éthanol-essence sur $(m_f)$ , $(Sfc)$ , $(\eta_g)$

La consommation du carburant est estimée en mesurant la quantité du carburant consommé par unité de temps et les valeurs de la densité de différents mélanges pour le carburant sont calculées par

$$\rho_b = \sum_i \rho_i x_i \quad (9)$$

$$m_f = \frac{3,6.V.\rho_b}{t} \quad (10)$$

La puissance de frein est calculée en mesurant la vitesse de moteur et le couple de moteur est donné par.

$$P_{frein} = \frac{2\pi N C_{frein}}{60.10^3} \quad (11)$$

La consommation spécifique du carburant est définie comme le rapport de la consommation de carburant sur la puissance de frein.

$$SFC = \frac{m_f}{P_{frein}} \quad (12)$$

Le rendement global du frein est défini comme le rapport de la puissance du frein sur la chaleur calorifique à l'entrée de chaque mélange.

$$\eta_g = \frac{3600.P_{frein}}{m_f(PCI)_b} \quad (13)$$

Les résultats sont montrés sous forme de tableaux (Tab V.8, Tab V.9, Tab V.10, Tab V.11) pour différentes valeurs de la vitesse de rotation (voir les annexes)

### V.3.1.1. Consommation de carburant ( $m_f$ )

L'effet des mélanges éthanol-d'essence sur la consommation de carburant est montré sur la figure. V.6.

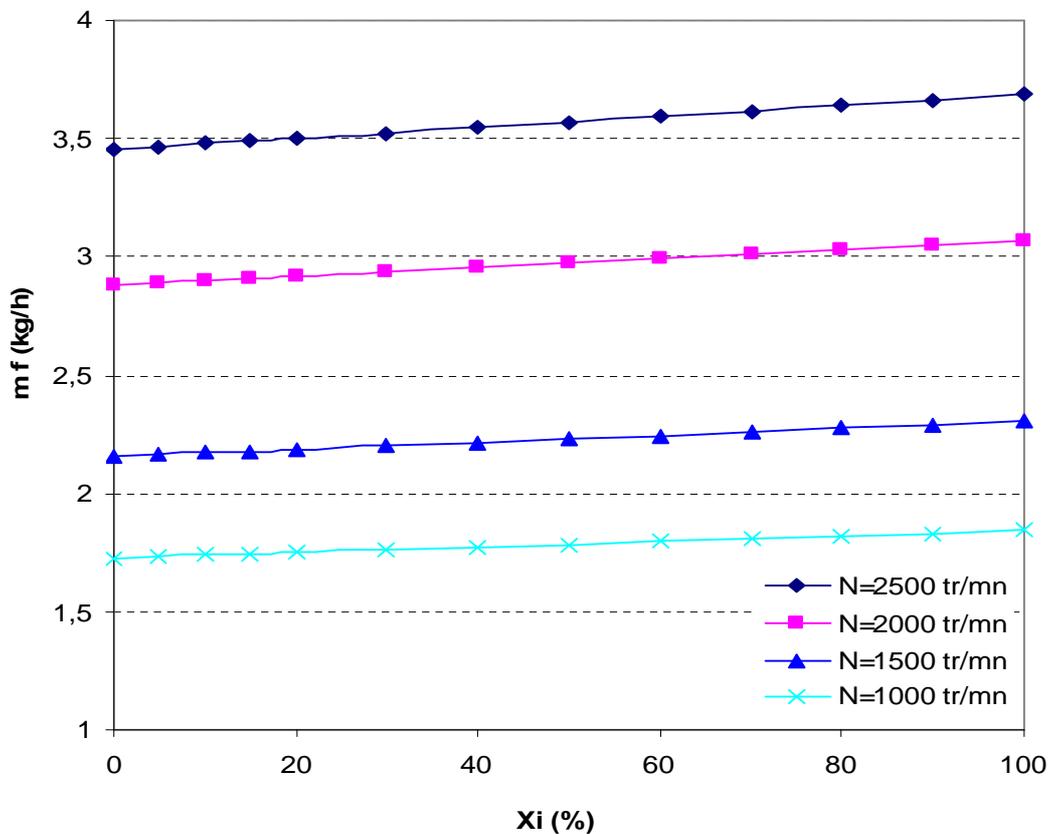


Figure V.6. Effet de l'addition d'éthanol sur  $m_f$

Le  $(m_f)$  augmente à mesure que  $x_i$  augmente pour toutes les vitesses du moteur. Ce comportement est attribué au  $(PCI)_i$  d'éthanol, qui est distinctement inférieur à celui d'essence ainsi que la densité  $\rho_i$  de l'éthanol qui est supérieure à celle de l'essence.

A mesure que la vitesse de moteur augmente de 1000 à 2500 t/mn  $(m_f)$  diminue du fait d'une augmentation de la vitesse d'air et d'une diminution de pression au venturi du carburateur. Par conséquent, la chute de pression au venturi du carburateur et à l'intérieur de la chambre, provoque plus de consommation de carburant. Ainsi que l'élévation de la vitesse engendre plus de temps requis pour la consommation d'une même quantité du combustible, d'où l'augmentation de  $(m_f)$

### V.3.1.2. Consommation spécifique du carburant ( $Sfc$ )

La figure.V.7, montre l'effet d'employer le mélange éthanol-essence sur la consommation spécifique du carburant.

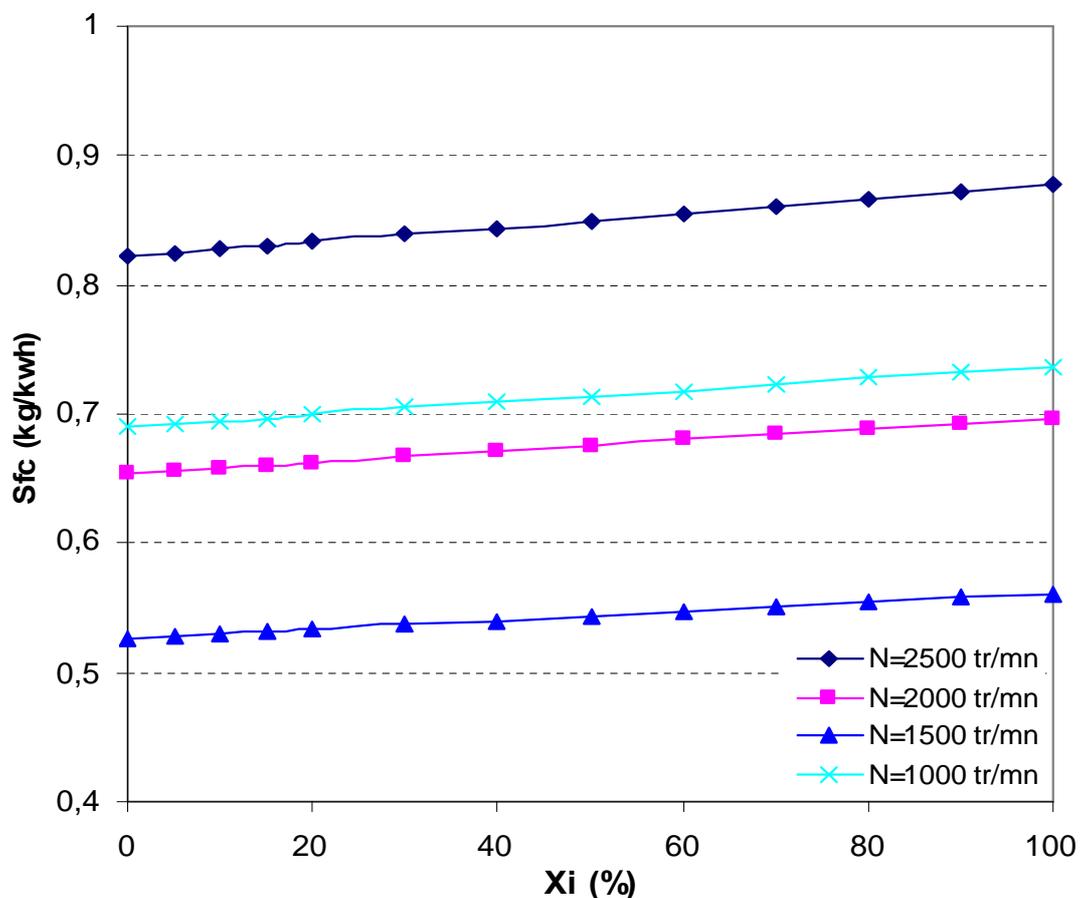


Figure V.7. Effet de d'addition d'éthanol sur ( $Sfc$ )

Le ( $SFC$ ) augmente avec l'augmentation de ( $x_i$ ). Vu que la ( $SFC$ ) est une relation entre le rendement global et la puissance qui demeure constante. La consommation spécifique du combustible semble être maximale pour une vitesse de 2500 tr/mn, alors que pour 1500 tr/mn on a une consommation minimale par rapport aux autres.

### V.3.1.3. Le rendement global ( $\eta_g$ )

La figure.V.8, présente l'effet d'employer des mélanges éthanol-essence sur le rendement global ( $\eta_g$ ) qui augmente à mesure que ( $x_i$ ) augmente, ceci revient à la chute du pouvoir calorifique inférieur du mélange carburant. On remarque que l'effet de l'augmentation de la ( $Sfc$ ) sur le ( $\eta_g$ ) demeure négligeable devant l'effet de la diminution du ( $PCI$ ). Pour la vitesse du moteur de 1500 tr/mn, le rendement global est maximal.

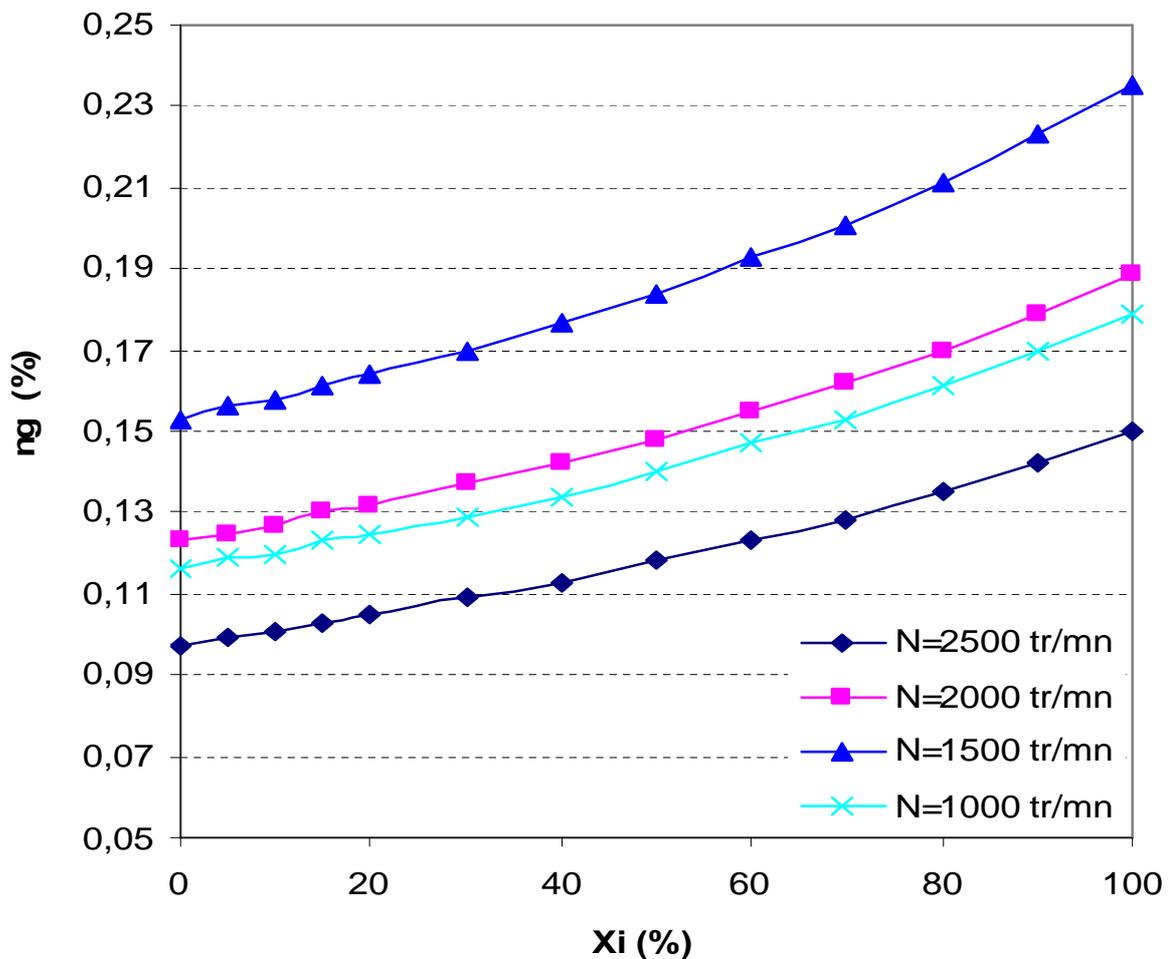


Figure V.8. Effet de l'addition d'éthanol sur le ( $\eta_g$ )

### V.3.2. Effet du mélange éthanol essence sur $(L)$ , $(m_a)$ et $(\eta_v)$

Les résultats sont montrés sous forme de tableaux (Tab V.12, Tab V.13, Tab V.14, Tab V.15) pour différentes valeurs de la vitesse de rotation (voir annexes).

#### V.3.2.1. La quantité d'air nécessaire $(L)$

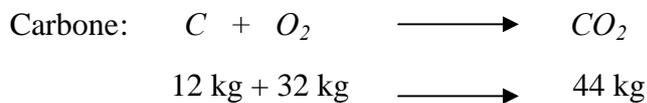
Pour déterminer théoriquement la quantité d'air nécessaire pour brûler une certaine quantité de combustible, il faut résoudre les équations thermochimiques de la réaction de combustion de toutes les parties constituantes du combustible considéré.

On résout ces équations pour 1 kg de combustible liquide contenant du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène.

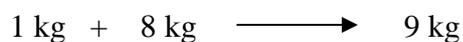
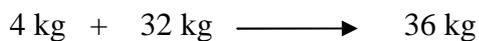
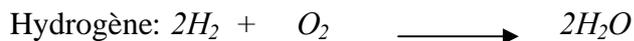
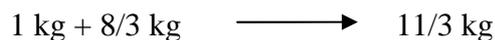
$$C + H + O = 1$$

On admet que le carbone brûle en formant du  $CO_2$  et l'hydrogène s'oxyde en donnant  $H_2O$ . La quantité d'air nécessaire pour une combustion complète d'un kg de combustible s'appelle la quantité d'air théoriquement nécessaire, notée  $(L)$ .

On a les équations élémentaires de la combustion



Si la quantité de carbone oxydé est égale à 1 kg ;



Sachant que dans un 1 kg de mélange éthanol-essence il y a C kg de carbone, H kg d'hydrogène, nous obtenons une quantité théorique nécessaire d'oxygène.

$$O = 8/3 \cdot C + 8 \cdot H - O_{cb} \tag{14}$$

La détermination de la quantité théorique d'air nécessaire  $(L)$  pour la combustion d'un kg d'essence s'effectue comme suit :

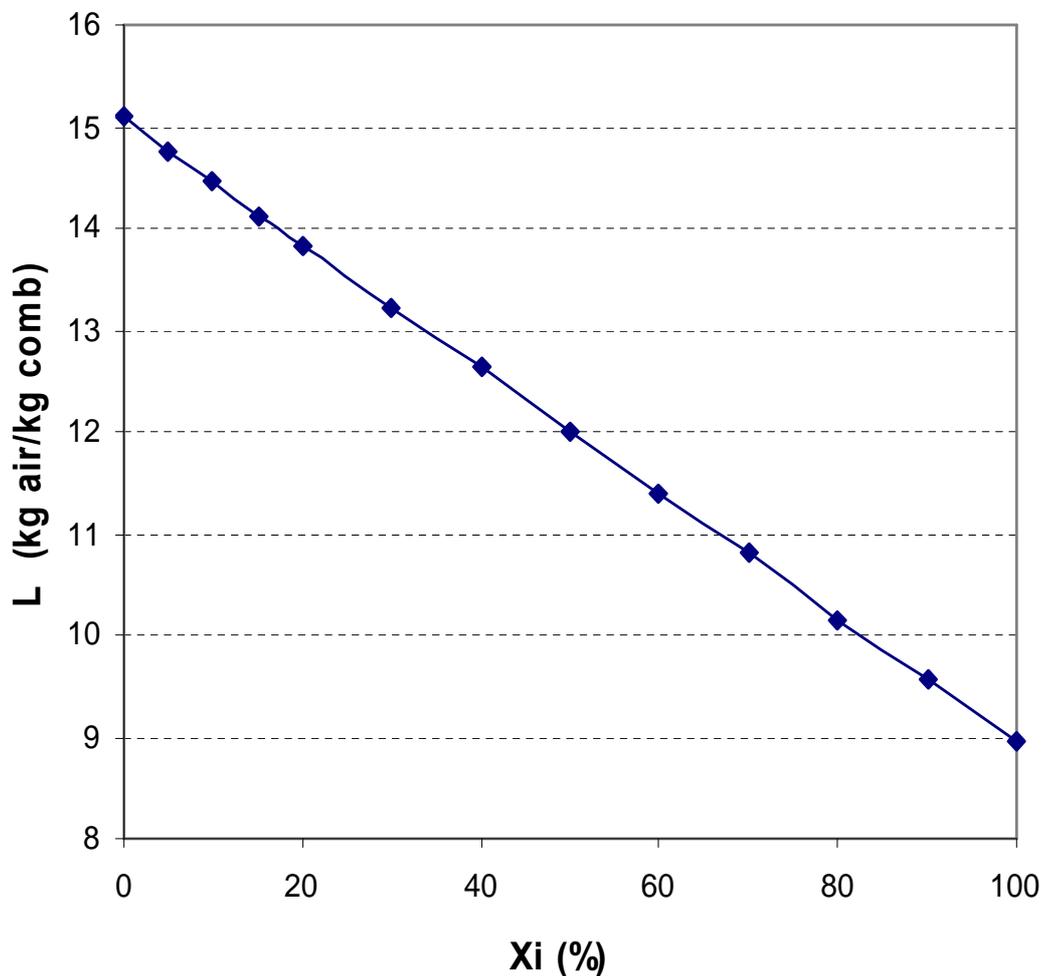
$$L = \frac{\frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot H - O_{cb}}{0,232} \quad (\text{kg d'air/kg comb}) \quad (15)$$

Avec : (0,232) représente le pourcentage d'oxygène dans l'air

Les fractions molaires C, H et O sont données par les équations (3), (4) et (5)

$O_{cb}$  : oxygène contenu dans le combustible

La figure V.9, montre l'effet de l'addition du mélange éthanol-essence sur le rapport air/carburant.



**Figure V.9.** Effet de l'addition d'éthanol sur ( $L$ )

Cette figure montre l'effet d'addition d'éthanol sur le rapport air/carburant, ce dernier diminue avec l'augmentation de  $x_i$  ajouté, ce qui est logique puisqu'il y a une partie de l'oxygène ( $O_{cb}$ ) contenu dans le mélange carburant nécessaire à leur combustion. Les écarts

seront plus importants en cas d'utilisation de mélanges à forte teneur en bioéthanol. Ce qui est donné par la relation (15)

### V.3.2.2. la consommation massique d'air ( $m_a$ )

On a ainsi le coefficient d'excès d'air  $\alpha = \frac{L_r}{L} = \frac{m_a}{m_f \cdot L}$  (16)

Si la quantité d'air nécessaire ( $L$ ) est égale à la quantité réellement disponible ( $L_r$ ) ( $\alpha = 1$ ), on aura ;

$$m_a = m_f \cdot L \quad (17)$$

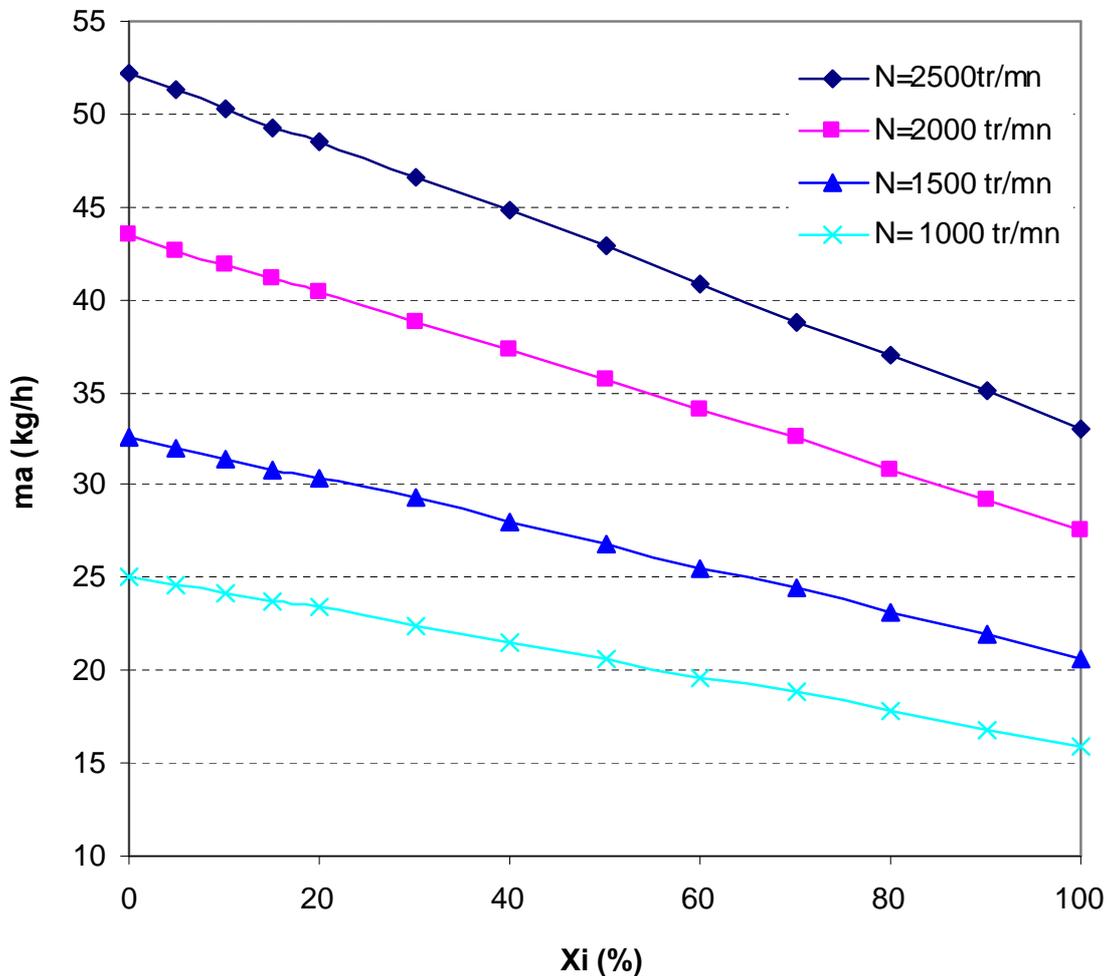


Figure V.10. Effet de l'addition d'éthanol sur ( $m_a$ )

En ajoutant de l'éthanol à l'essence la consommation massique d'air diminue du fait de la densité d'éthanol qui influe négativement sur densité du mélange. La consommation

massique augmente avec l'augmentation de la vitesse du moteur de 1000 tr/mn à 2500 tr/mn ce qui est logique puisque, pour la combustion d'une masse considérable de carburant le processus aura besoin de plus d'air.

**V.3.2.3. Le rendement volumique ( $\eta_v$ )**

La puissance délivrée par un moteur dépend de la charge d'air qu'il peut introduire dans le cylindre. Dans la pratique et à l'admission, le moteur n'aspire pas une pleine cylindrée d'où il convient de définir le rendement volumique comme suit :

$$\eta_v = \frac{L_{r.a}}{L_{th.a}} \tag{18}$$

$L_{r.a}$  : Charge d'air admise réellement est égale à celle consommée ( $m_a$ ) pour,

$L_{th.a}$  : Charge d'air admise théoriquement dans les conditions de  $P_a$  et  $T_a$

Si l'on assimile l'air à un gaz parfait on a :

$$L_{th.a} = \frac{\rho_{air} V_s}{t_{cycle}} \tag{19}$$

Or,  $N \longrightarrow 60 \text{ s} \qquad \qquad \qquad \Rightarrow t_{cycle} = \frac{60.2}{N}$

$1 \text{ cycle} \longrightarrow 2 \text{ tours} \longrightarrow t_{cycle}$

En assimilant le mélange à un gaz parfait  $PV = nRT \Rightarrow \rho_{air} = \frac{P_a}{RT_a}$

D'où  $L_{th.a} = \frac{P_a V_s}{120 RT_a} N \quad (\text{kg/h}) \tag{20}$

$V_s$  : La cylindrée du moteur, égale à 582 cm<sup>3</sup> pour le moteur TD43:

$$L_{th.a} = \frac{582.10^{-6} 10^{-2} .3600 P_a N}{120.287 T_a} = 0.00608 \frac{P_a T_a}{N} \tag{21}$$

D'où  $\eta_v = \frac{L_{r.a} T_a}{0.00608 P_a N} = 164.47 \frac{L_{r.a} T_a}{P_a N} \tag{22}$

Si la charge d'air admise réellement ( $L_{r.a}$ ) est égale à celle consommée ( $m_a$ ), on aura :

$$\eta_v = 164,47 \frac{m_a T_a}{P_a N} \tag{23}$$

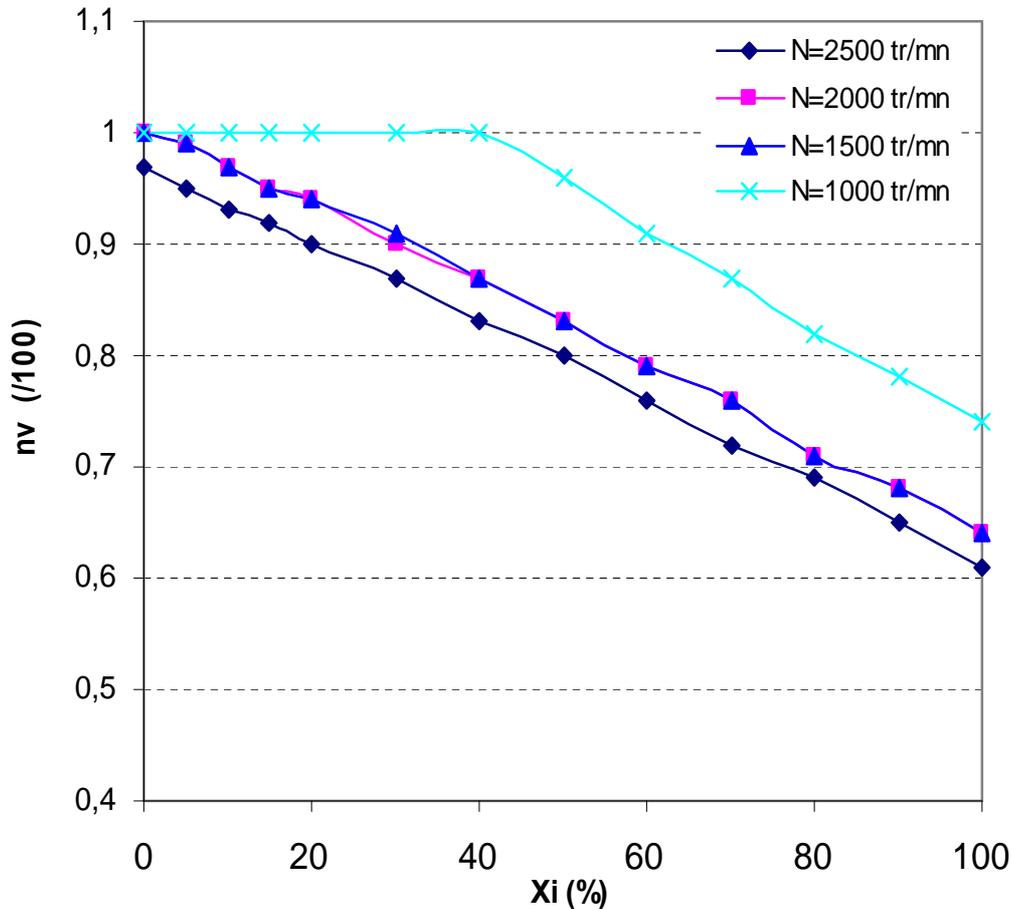
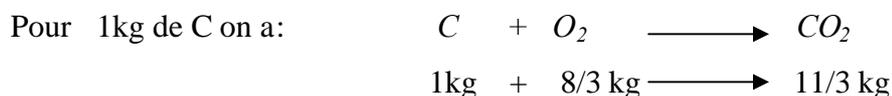


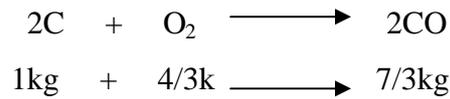
Figure V.11. Effet de l’addition d’éthanol sur ( $\eta_v$ )

Il est clair qu’avec l’augmentation de  $x_i$  le rendement volumique diminuera, ceci est dû à la chute de la consommation massique d’air, il est clair aussi, pour des fractions  $x_i$  nulles, le rendement volumique est égal à l’unité ce qui convient avec l’hypothèse qu’on a pris sur ( $\alpha$ ).

### V.3.3. Effet du mélange éthanol-essence sur les produits de combustion ( $CO_2$ ), ( $CO$ )

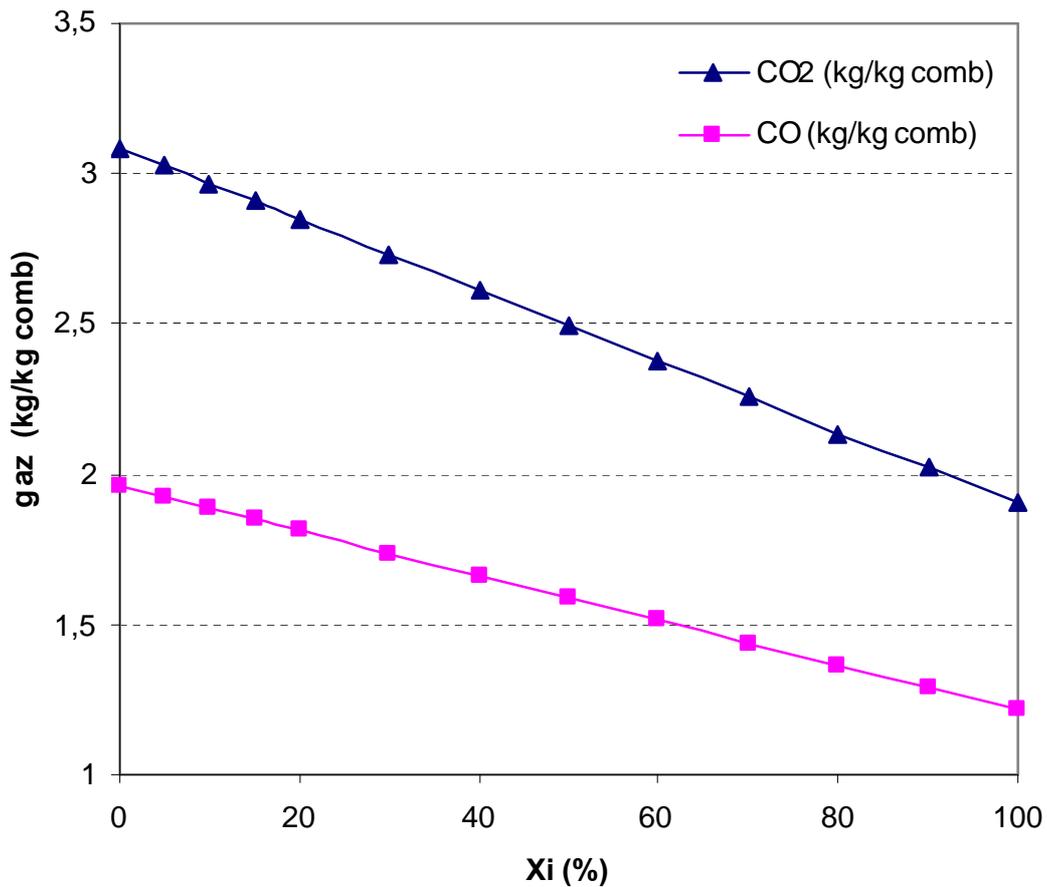
Le coefficient d’excès d’air influe de façon notable sur la vitesse de combustion et la combustion complète qui est due à l’insuffisance de la quantité d’oxygène (ou d’air,  $\alpha < 1$ ). Ainsi par défaut d’air, nous avons une combustion incomplète. Nous supposons que l’hydrogène est un élément actif et brûle complètement jusqu’au  $H_2O$  et le carbone brûle partiellement jusqu’au  $CO_2$  et partiellement jusqu’au  $CO$ .





Le calcul de la quantité des produits de combustion d'un kilogramme de combustible s'effectue par les équations de réaction de combustion.

Les résultats sont sous forme de tableau (voir annexes) et représentés par le graphe de la figure.V.12, la fraction C est déterminée par l'équation (3).



**Figure V.12.** Effet de l'addition d'éthanol sur l'émission de CO<sub>2</sub> et CO

Cette figure montre que les produits de combustion diminuent avec l'augmentation du pourcentage d'éthanol dans le mélange carburant, ceci peut être expliqué par la diminution de la fraction C de l'effet d'éthanol qui est un produit oxygéné et l'amélioration du processus de combustion.

Cette figure montre aussi, que la quantité du CO<sub>2</sub> produite est plus grande que celle du CO, ce qui est logique parce que c'est le C qui brûle tout d'abord pour donner le CO<sub>2</sub> ensuite le CO.

**Conclusion**

Les résultats présentés par les figures ci-dessus permettent de montrer que :

En ajoutant du biodiesel et du DME aux gazoles d'origine fossile on augmente la limite d'inflammabilité du mélange, mais on diminue le pouvoir calorifique ce qui engendre plus de consommation de carburant.

Le rajout des biocarburants aux carburants d'origine fossile permet d'augmenter le nombre d'octane du mélange ce qui améliore la qualité de combustion et d'éviter l'effet des cliquetés dans le moteur.

En ajoutant du bioéthanol à l'essence d'origine fossile les conclusions suivantes peuvent être déduites :

1. L'emploi d'éthanol comme additif au carburant d'essence engendre une amélioration des performances du moteur et une diminution des émissions d'échappement pour toutes les vitesses de moteur.
2. L'addition d'éthanol a pour conséquence l'augmentation du rendement global, de la consommation de carburant, la consommation spécifique de carburant et le rapport d'équivalence d'air-carburant diminué.

# Conclusion générale et perspective

## Conclusion générale

Le sujet de PFE qui nous a été confié est relatif en premier lieu, on a essayé de donner une idée sur les différents types de biocarburants, les itinéraires de conversion de la biomasse ainsi que les intérêts qu'ils présentent.

A travers cette étude on a conclu aussi que les biocarburants ont des avantages dans plusieurs domaines. L'utilisation des biocarburants comme additifs permet d'améliorer la capacité lubrifiante des carburants, leurs caractéristiques physiques et chimiques, elle permet aussi de réduire les émissions des gaz à effet de serre.

Le biodiesel peut être ajouté au gazole d'origine fossile à des petites proportions jusqu'à 20% [30] sans porter aucune modification sur le moteur, mais leur application à l'état pur, le moteur doit être adapté ainsi que le réservoir de stockage, la tuyauterie, les injecteurs et les métaux de la cylindrée.

Le bioéthanol peut être ajouté jusqu'à 25% [27] sans aucune modification du moteur. Pour l'application à l'état pur, le bioéthanol montre une agressivité envers certains matériaux comme les plastiques, les caoutchoucs ainsi que l'acier ; donc le moteur doit être adapté.

L'investissement dans le domaine des biocarburants permet de créer des micro-industries en zones rurales pour assurer l'autonomie énergétique sur les sites isolés comme il assure la sécurité d'approvisionnement des pays consommateurs d'énergie.

Vu ces divers avantages, il existe quelques contraintes qui empêchent l'utilisation et le développement de cette filière, le développement massif des biocarburants entraînera une concurrence avec les filières alimentaires à l'usage des terres, le coût de production qui est beaucoup plus que celui d'exploitation des énergies fossiles.

Les biocarburant ont un PCI faible ce qui augmente la consommation du carburant pour une même quantité d'énergie, mais comme ils ont un nombre d'octane élevé on peut augmenter le rapport de compression du moteur afin de réduire cette consommation, on peut même aller à une exécution plus élevée du moteur.

Enfin la biomasse et le meilleur capteur d'énergie solaire, qui, pourtant n'en récupère qu'une faible partie. Des progrès sont possibles par la mise au point des technologies de récolte et de transformation plus performantes. Ainsi, s'ouvre un vaste champ de recherches.

## **Perspective**

Il est clair que les biocarburants ont des perspectives d'avenir prometteuses malgré le coût de production élevé, pour des grandes quantités ; pour les petites quantités, certains biocarburants peuvent jouer le rôle des énergies domestiques, ce qui va permettre à chaque individu de couvrir ses besoins énergétiques. Les biocarburants seront les dominants dans la prochaine décennie, tant que les technologies alternatives de biocarburants sont toujours dans l'étape de développement.

Plusieurs biocarburants peuvent être testés sur le banc d'essai TD43 mais comme il n'est pas adapté pour les biocarburants à l'état pur, nous conseillons les utilisateurs de respecter les limites de dosage :

« biodiesel-gazole fossile jusqu'à 20% »,

« bioéthanol-essence fossile jusqu'à 25% »,

« biométhanol-essence fossile jusqu'à 15% ».

# Annexes

**Tableau V.1.** Le pouvoir calorifique pour différents (%) du biocarburant

Fraction $x_i$ du biocarburant(%)	PCI du mélange (MJ/kg)			
	PCI avec (éthanol)	PCI avec (méthanol)	PCI avec (ETBU)	PCI avec (MTBE)
0	44.65	44.65	44.65	44.65
5	43.68	43.36	43.99	44.04
10	42.84	42.03	43.43	43.57
15	41.91	40.91	42.87	43.10
20	41.08	39.66	42.35	42.62
30	39.31	37.21	41.23	41.78
40	37.65	34.81	40.14	40.74
50	35.80	32.36	39.08	39.80
60	34.10	29.82	37.84	38.82
70	32.45	27.41	36.76	37.88
80	30.67	24.96	35.65	36.93
90	28.90	22.52	34.56	35.99
100	27.23	20.11	33.47	35.04

**Tableau V.2.** Le pouvoir calorifique pour différents (%) du biocarburant

$x_i$ (%)	(PCI) <sub>b</sub> du mélange (MJ/kg)	
	PCI du mélange biodiesel	PCI du mélange télémètre radar
0	44.10	44.10
5	43.72	43.42
10	43.34	42.40
15	42.97	41.53
20	42.73	40.7
30	41.98	39
40	41.37	37.30
50	40.65	35.60
60	40.01	33.90
70	39.29	32.20
80	38.64	30.26
90	37.92	28.80
100	37.35	27.23

**Tableau V.4.** le  $(RON)_b$  et  $(MON)_b$  du mélange pour différents (%) du biocarburant

$x_i$ (%)	Mélange de l'éthanol		Mélange de ETBE		Mélange de méthanol		Mélange de MTBE	
	$RON_b$	$MON_b$	$RON_b$	$MON_b$	$RON_b$	$MON_b$	$RON_b$	$MON_b$
0	97	86	97	86	97	86	97	86
5	98.65	86.85	98.25	86.80	98.90	86.95	98	86.75
10	100.30	87.70	99.50	87.60	100.80	87.90	99	87.50
15	101.95	88.55	100.75	88.40	102.70	88.85	100	88.25
20	103.60	89.40	102	89.20	104.60	89.80	101	89
30	106.90	91.10	104.50	90.80	108.40	91.60	103	90.50
40	110.20	92.80	107	92.40	112.20	93.60	105	92
50	113.50	94.50	109.50	94	116	95.50	107	93.50
60	116.80	96.20	112	95.60	119.80	97.40	109	95
70	120.10	97.20	114.50	97.20	123.60	99.30	111	96.50
80	123.40	99.6	117	98.80	127.40	101.20	113	98
90	126.70	101.30	119.50	100.40	131.20	103.10	115	99.50
100	130	103	122	102	135	105	117	101

**Tableau V.6.** La limite d'inflammabilité  $L_{ib}$  des mélanges biocarburants

La teneur volumique $x_j$ (%)	$L_{ib}$ éthanol (% vol)	$L_{ib}$ méthanol (% vol)
0	1	1
5	1.03	1.04
10	1.07	1.09
15	1.11	1.14
20	1.16	1.20
30	1.26	1.34
40	1.38	1.51
50	1.53	1.74
60	1.71	2.04
70	1.95	2.47
80	2.26	3.13
90	2.68	4.26
100	3.30	6.70

**Tableau V.7.** Propriétés et conditions auxquelles les performances du moteur sont calculées

Propriétés	Essence	Ethanol
Formule chimique, (liquide)	$C_8H_{18}$	$C_2H_6O$
Masse moléculaire, (kg/kmol)	114	46
Densité, (kg/L)	0,75	0,80
Le pouvoir calorifique, (Mj/kg)	44.65	27,23
Température, ( $^{\circ}C$ )	15	
Pression, (atm)	1	

**Tableau V.8.** Effet du mélange éthanol-essence sur  $(m_f)$ ,  $(Sfc)$ ,  $(\eta_g)$  pour  $N=2500$  tr/mn

<i>Pour : <math>N=2500</math> tr/mn, <math>V=32</math>ml, <math>t=25</math>s, <math>\varepsilon = 6</math> et <math>P_f=4,2</math> kw</i>					
$x_i$	$(PCI)_b$ (Mj/kg)	$\rho_b$ (kg/l)	$m_f$ (kg/h)	$Sfc$ (kg/kwh)	$\eta_g$ (%)
0	44,65	0,750	3,456	0,822	0,097
5	43,68	0,752	3,465	0,825	0,099
10	42,84	0,755	3,479	0,828	0,101
15	41,91	0,757	3,488	0,830	0,103
20	41,08	0,760	3,502	0,833	0,105
30	39,31	0,765	3,525	0,839	0,109
40	37,65	0,770	3,548	0,844	0,113
50	35,80	0,775	3,571	0,850	0,118
60	34,10	0,780	3,594	0,855	0,123
70	32,45	0,785	3,617	0,861	0,128
80	30,67	0,790	3,640	0,866	0,135
90	28,90	0,795	3,663	0,872	0,142
100	27,23	0,800	3,685	0,877	0,150

**Tableau V.9.** Effet du mélange éthanol-essence sur  $(m_f)$ ,  $(Sfc)$ ,  $(\eta_g)$  Pour  $N=2000$  tr/mn,

<i>Pour : <math>N=2000</math> tr/mn, <math>V=32</math>ml, <math>t=30</math> s, <math>\varepsilon = 6</math> et <math>P_f=4,4</math> kw</i>					
$x_i$	$(PCI)_b$ (Mj/kg)	$\rho_b$ (kg/l)	$m_f$ (kg/h)	$Sfc$ (kg/kwh)	$\eta_g$ (%)
0	44,65	0,750	2,88	0,654	0,123
5	43,68	0,752	2,887	0,656	0,125
10	42,84	0,755	2,898	0,658	0,127
15	41,91	0,757	2,905	0,660	0,130
20	41,08	0,760	2,916	0,662	0,132
30	39,31	0,765	2,937	0,667	0,137
40	37,65	0,770	2,955	0,671	0,142
50	35,80	0,775	2,973	0,675	0,148
60	34,10	0,780	2,995	0,680	0,155
70	32,45	0,785	3,013	0,684	0,162
80	30,67	0,790	3,031	0,688	0,170
90	28,90	0,795	3,052	0,693	0,179
100	27,23	0,800	3,070	0,697	0,189

**Tableau V.10.** Effet du mélange éthanol-essence sur  $(m_f)$ ,  $(Sfc)$ ,  $(\eta_g)$  Pour  $N=1500\text{tr/mn}$ ,

*Pour :  $N=1500\text{ tr/mn}$ ,  $V=32\text{ml}$ ,  $t=40\text{s}$ ,  $\varepsilon = 6$  et  $P_f=4,1\text{ kw}$*

$x_i$	$(PCI)_b$ (Mj/kg)	$\rho_b$ (kg/l)	$m_f$ (kg/h)	$Sfc$ (kg/kwh)	$\eta_g$ (%)
0	44,65	0,750	2,160	0,526	0,153
5	43,68	0,752	2,165	0,528	0,156
10	42,84	0,755	2,174	0,530	0,158
15	41,91	0,757	2,180	0,531	0,161
20	41,08	0,760	2,188	0,533	0,164
30	39,31	0,765	2,203	0,537	0,170
40	37,65	0,770	2,217	0,540	0,177
50	35,80	0,775	2,232	0,544	0,184
60	34,10	0,780	2,246	0,547	0,193
70	32,45	0,785	2,260	0,551	0,201
80	30,67	0,790	2,275	0,554	0,211
90	28,90	0,795	2,289	0,558	0,223
100	27,23	0,800	2,304	0,561	0,235

**Tableau V.11.** Effet du mélange éthanol-essence sur  $(m_f)$ ,  $(Sfc)$ ,  $(\eta_g)$  Pour  $N=1000\text{ tr/mn}$ 

*Pour :  $N=1000\text{ tr/mn}$ ,  $V=32\text{ml}$ ,  $t=52\text{s}$ ,  $\varepsilon = 6$  et  $P_f=2,5\text{ kw}$*

$x_i$	$(PCI)_b$ (Mj/kg)	$\rho_b$ (kg/l)	$m_f$ (kg/h)	$Sfc$ (kg/kwh)	$\eta_g$ (%)
0	44,65	0,750	1,728	0,691	0,116
5	43,68	0,752	1,732	0,692	0,119
10	42,84	0,755	1,739	0,695	0,120
15	41,91	0,757	1,744	0,697	0,123
20	41,08	0,760	1,751	0,700	0,125
30	39,31	0,765	1,762	0,705	0,129
40	37,65	0,770	1,774	0,709	0,134
50	35,80	0,775	1,785	0,714	0,140
60	34,10	0,780	1,797	0,718	0,147
70	32,45	0,785	1,808	0,723	0,153
80	30,67	0,790	1,820	0,728	0,161
90	28,90	0,795	1,831	0,732	0,170
100	27,23	0,800	1,843	0,737	0,179

**Tableau V.12.** Effet du mélange éthanol essence sur ( $L$ ), ( $m_a$ ) et ( $\eta_v$ ) pour  $N=2500$  tr/mn

$N=2500\text{tr/mn}, T=15^\circ\text{C}, P=1\text{ atm}$				
$x_i$	L	$m_f$	$m_a$	$\eta_v$
0	15,09	3,456	52,15	0,97
5	14,75	3,465	51,30	0,95
10	14,46	3,479	50,30	0,93
15	14,13	3,488	49,28	0,92
20	13,84	3,502	48,46	0,90
30	13,21	3,525	46,56	0,87
40	12,63	3,548	44,81	0,83
50	12,01	3,571	42,89	0,80
60	11,38	3,594	40,90	0,76
70	10,80	3,617	38,81	0,72
80	10,15	3,640	36,94	0,69
90	9,56	3,663	35,02	0,65
100	8,97	3,685	33,06	0,61

**Tableau V.13.** Effet du mélange éthanol essence sur ( $L$ ), ( $m_a$ ) et ( $\eta_v$ ) pour  $N=2000$  tr/mn

$N=2000\text{tr/mn}, T=15^\circ\text{C}, P=1\text{ atm}$				
$x_i$	L	$m_f$	$m_a$	$\eta_v$
0	15,09	2,880	43,45	1
5	14,75	2,887	42,59	0,99
10	14,46	2,898	41,92	0,97
15	14,13	2,905	41,07	0,95
20	13,84	2,916	40,39	0,94
30	13,21	2,937	38,80	0,90
40	12,63	2,955	37,34	0,87
50	12,01	2,973	35,74	0,83
60	11,38	2,995	34,08	0,79
70	10,80	3,013	32,55	0,76
80	10,15	3,031	30,79	0,71
90	9,56	3,052	29,18	0,68
100	8,97	3,070	27,55	0,64

**Tableau V.14.** Effet du mélange éthanol essence sur ( $L$ ), ( $m_a$ ) et ( $\eta_v$ ) pour  $N=1500$  tr/mn

$N=1500$ tr/mn $T=15^\circ\text{C}$ $P=1$ atm				
$x_i$	L	$m_f$	$m_a$	$\eta_v$
0	15,09	2,160	32,59	1
5	14,75	2,165	31,94	0,99
10	14,46	2,174	31,44	0,97
15	14,13	2,180	30,80	0,95
20	13,84	2,188	30,29	0,94
30	13,21	2,203	29,29	0,91
40	12,63	2,217	28,00	0,87
50	12,01	2,232	26,80	0,83
60	11,38	2,246	25,56	0,79
70	10,80	2,260	24,41	0,76
80	10,15	2,275	23,09	0,71
90	9,56	2,289	21,88	0,68
100	8,97	2,309	20,66	0,64

**Tableau V.15.** Effet du mélange éthanol essence sur ( $L$ ), ( $m_a$ ) et ( $\eta_v$ ) pour  $N=1000$  tr/mn

$N=1000$ tr/mn $T=15^\circ\text{C}$ $P=1$ atm				
$x_i$	L	$m_f$	$m_a$	$\eta_v$
0	15,09	1,728	25,07	1
5	14,75	1,732	24,57	1
10	14,46	1,739	24,18	1
15	14,13	1,744	23,69	1
20	13,84	1,751	23,45	1
30	13,21	1,762	22,38	1
40	12,63	1,774	21,54	1
50	12,01	1,785	20,62	0,96
60	11,38	1,797	19,66	0,91
70	10,80	1,808	18,78	0,87
80	10,15	1,820	17,76	0,82
90	9,56	1,831	16,83	0,78
100	8,97	1,843	15,89	0,74

**Tableau V.16.** Effet du mélange éthanol essence sur ( $CO_2$ ) et (CO)

$x_i$ (%)	$C$ (kg /kg comb)	$CO_2$ (kg/kg comb)	$CO$ (kg/kg comb)
0	0,842	3,087	1,960
5	0,825	3,025	1,925
10	0,809	2,966	1,887
15	0,793	2,907	1,850
20	0,777	2,849	1,813
30	0,745	2,731	1,738
40	0,713	2,614	1,663
50	0,681	2,497	1,589
60	0,649	2,379	1,514
70	0,617	2,262	1,439
80	0,582	2,134	1,358
90	0,553	2,027	1,290
100	0,521	1,910	1,215

**Tableau .17.** Présente une vue d'ensemble des charges, de placement et de production à court terme et à long terme

Biocarburant	Coûts d'investissement court terme (€/kw <sub>th</sub> )	Coûts d'investissement long terme (€/kw <sub>th</sub> )	Coûts Production court terme (€/litre)	Coûts Production long terme (€/litre)	Coûts Production court terme (€/GJ)	Coûts Production long terme (€/GJ)
RME	150	110	0.50	0.20	15	6
Ethanol (corps à sucres)	290	170	0.32-0.54		15-25	
Ethanol (bois)	350	180	0.11-0.32		5-15	
Méthanol	700	530	0.14-0.20	0.10	9-13	7
DME			0.27		14	
Gazole de Fisher-tropsch	720-770	500-540	0.31-0.45		9-13	
Huile de pyrolyse	1000	790	0.06-0.25		4-18	
HTU diesel	535	400	0.16-0.24		5-7	

## Abbreviations

- RON** : (*research octane number*) nombre d'octane recherché
- MON** : (*motor octane number*) nombre d'octane moteur
- RME** : (*Rapeased Méthylic Ester*) ester méthylique des grains de colza
- HTU** : (*Hydro Thermal Upgrade*)
- GPL** : Gaz du pétrole liquéfié
- DME** : Diméthylether
- MTBE** : Ether Butylique tertiaire méthylique
- ETBE** : Ethylbutylether
- GNC** : Gaz naturel comprimé
- GNL** : Gaz naturel liquéfié
- EMHV** : Ester méthylique d'huile végétale
- HVB** : Huile végétale brute
- AEI** : Agence d'énergie internationale
- OPEP** : Organisation des pays exportateurs du pétrole
- GES** : Gaz à effet de serre
-

## Références bibliographiques

## Références bibliographique et sources d'Internet

- [1] **E.van Thuijl, C.J.Roos, L.W.M.Beurskens:** An overview of biofuel Technologies, markets and policies in Europe.2003
  - [2] **J-C.GUIBET:** Carburants et Moteurs. Editions Technip 1997, Paris
  - [3] **Stéphane His:** Les biocarburants dans le monde. Manuscrit remis en 2004. EFP-Lyon
  - [4] Article sur les biocarburants, Le journal quotidien d'El WATAN économique
  - [6] (IEA) International Energy Agency, Automotive fuels survey1, Raw materials and conversion. Innas, Breda 1996.
  - [8] **Faaij A. and C. Hamelinck:** Future prospects of methanol and hydrogen from biomass. University of Utrecht, Copernicus Institute, Department of Science, Technology and Society. The Netherlands 2001.
  - [9] **Commission of the European Communities:** Proposal for a Council directive amending Directive 92/81/EEC with regard to the possibility of applying a reduced rate of excise duty on certain mineral oils containing biofuels and on biofuels. Brussels (November 2001).
  - [11] **Reith, J:** Co-production of bio-ethanol, electricity and heat from biomass wastes: potential and R&D issues. ECN, Petten ; Nedalco, Bergen op Zoom; ATO, Wageningen. The Netherlands. Article in Biocycle (October 2001).
  - [15] **Tornevall, H:** Alternative fuels, a compilation of facts and the view Volvo Truck Corporation takes on some types of fuel. Volvo Truck Corporation, Göteborg, Sweden 1998.
  - [16] Analysis and evaluation of climate neutral gaseous and liquid fuel chains. (GAVE-report 9921), Utrecht. The Netherlands (November, 1999).
  - [17] **Norton, P. et al:** Emissions from trucks using Fischer-Tropsch diesel fuel. The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space International, Warrendale, PA, USA. SAE technical paper series (1998).
  - [18] **May, M:** Development of truck engine technologies for use with Fischer-Tropsch fuels. Society of Automotive Engineers 2001.
  - [19] **Boerrigter, H., H. den Uil and H.P. Calis:** Green diesel from biomass via Fischer-Tropsch synthesis: new insights in gas cleaning and process design. ECN, Petten; Shell Global Solutions, The Hague. Paper and accompanying slides presented at Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, Expert Meeting, 30 September - 1 October
  - [20] Séminaire Franco-Brésilien sur les biocarburants, ASPEF. Sao Paulo 4 juillet 2005
-

- [21] **Uil, H. den:** Coproductie van vloeibare brandstoffen en elektriciteit uit biomassa met een BV-FT-STEG systeem: technische en economie haalbaarheid (inclusief sheets presentation voor Raad van Deelnemers SDE). Samenwerkingsverband Duurzame Energie (SDE), Amsterdam. The Netherlands. Confidential ECN report 2001. 2002, Strasbourg, France.
- [22] **Gérard Claude:** La gazéification à la vapeur en réacteur à lit fluidisé, direction d'énergie nucléaire CEA/ Grenoble
- [24] **Specht, M:** Synthesis of methanol from biomass/CO<sub>2</sub> resources. Centre for Solar Energy and Hydrogen Research (ZSW), Stuttgart, Germany; Environment Institute, Joint Research Centre, Ispra, Italy; Hydrogen Association Hamburg, Germany. In Greenhouse Gas Control Technologies, Pergamon, Amsterdam. The Netherlands 1999.
- [26] Manuel d'utilisation du banc d'essai moteur TD43.
- [27] **M. Al-Hasan-Hasan :** effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission, Department of Mechanical Engineering, Amman College for Engineering Technology, Balqa Applied University, Octobre 2001.
- [28] **A.BAGHDADI:** Etude d'un banc d'essai pour moteur à taux de compression variable (version essence). Mémoire du projet de fin d'étude, ENP juin 1987
- [29] **Van.Tiggelen :** Oxydation et combustion. Edition Technip 1968.
- [30] **Pierre JOYEE:** en route pour les biocarburants, Projet de recherche Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux 03 février 2004

### Sources d'Internet

- [5] [www.aboutdme.org](http://www.aboutdme.org) (International DME Association, IDA)
- [7] [www.biodiesel.org](http://www.biodiesel.org)
- [10] [www.dabney.com/ecogenics/digest.html/](http://www.dabney.com/ecogenics/digest.html/)
- [12] [www.btgworld.com](http://www.btgworld.com) (biomass Technology group, BTG)
- [13] [www.dynamotive.com/biooil/productdevelopment](http://www.dynamotive.com/biooil/productdevelopment)
- [14] [www.dct.tudelft.nl/ttf/biomass.htm](http://www.dct.tudelft.nl/ttf/biomass.htm)
- [23] [www.wws.princeton.edu](http://www.wws.princeton.edu)
- [25] [www.energy.ca.gov/pier/renew/ethanol/ethanol.html](http://www.energy.ca.gov/pier/renew/ethanol/ethanol.html) (California Energy Commission)
-