



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement  
International Institute for Water and Environmental Engineering

**ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT DES PROCÉDES DE  
PRODUCTION DES CARBURANTS DU FUTUR :  
LES PROCÉDES D'ESTERIFICATION**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR DE L'EQUIPEMENT RURAL**

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par :

**Joanna. Marie. Delphine LOMPO**

**Travaux dirigés par : Dr. Joël BLIN & Dr. Yao. K AZOUMAH**

UTER Génie Energétique et Industriel GEI

Laboratoire Biomasse Energie Biocarburant (LBEB)

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Yézouma COULIBALY**

Membres et correcteurs : **Yao AZOUMAH**

**Joël BLIN**

**Philippe GIRARD**

**PROMOTION 2007/2008**



## REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire de fin de formation, un seul mot de reconnaissance à l'endroit de tous : « **MERCI** ». Merci à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre n'ont ménagé aucun effort pour l'aboutissement de ce mémoire et pour la réussite de ma formation.

Je voudrais remercier :

- ☞ Monsieur Joël BLIN et Monsieur Yao AZOUMAH, qui en dépit de leurs multiples occupations ont donné le meilleur d'eux mêmes pour mon encadrement et la mise au point de mon rapport de mémoire ainsi que Monsieur Yézouma COULIBALY et Monsieur Philippe GIRARD pour leur apport précieux à ce mémoire ;
- ☞ Monsieur Jean Pierre ESSONE, Monsieur Kouassi KOUAME, Monsieur Frédéric TRAORE pour leur soutien et leurs conseils toujours avisés ainsi que l'ensemble du personnel du 2iE, pour l'enseignement reçu et les efforts déployés pour notre réussite ;
- ☞ Mon père Monsieur Abel LOMPO et ma mère Madame Alice LOMPO, qui m'ont toujours apporté aide, soutien et conseils ; je leur dois mon éducation, ma réussite ; Mon oncle, le Docteur François Xavier DYEMKOUA, qui m'a motivé et qui a fait naître en moi la soif de mieux découvrir les biocarburants;
- ☞ Les familles LOMPO et DYEMKOUA, mes parents, frères et sœurs, amis pour leur soutien, et leur présence à mes cotés ainsi que mon bien aimé Christophe qui m'a toujours épaulée ;
- ☞ Monsieur Valentin DAMIBA, de qui j'ai reçu ma formation scolaire de base ; de même que Sœur Véronique KANKOUAN qui m'a toujours prodiguer conseils et attention ;

La liste est longue et je ne puis l'épuiser. A tous, je réitère ma gratitude et ma reconnaissance pour leur soutien et leur présence.

Je ne saurai terminer sans dire un grand merci à celui qui m'a donné la vie et qui a guidé mes pas sur le chemin de la réussite. Pour tous vos bienfaits SEIGNEUR mon DIEU, mon CREATEUR, mon PROTECTEUR, soyez en remercié.

## DEDICACE

En écrivant ce document, j'ai souvent pensé à mon Grand Père feu **Augustin DYEMKOUMA** à qui je dédie ce mémoire.

Durant toute sa vie, il n'a transmis qu'un seul message : celui de la justice, de la loyauté, de la vertu et de l'espérance.

Je souhaite de tout cœur que ce message soit le slogan de tout Africain.

Ainsi, nous pourrons tout en croyant et en oeuvrant fermement à notre développement, rester humain ;  
Ainsi, nous pourrons avec espérance creuser dans les sillons de la connaissance, pour l'avènement d'une Afrique radieuse et victorieuse.

## LISTE DES ABREVIATIONS

**Biodiesel:** Biocarburant obtenu par estérification de l'huile végétale

**Bioéthanol :** Ethanol obtenu à partir de la biomasse.

**Biométhanol :** Méthanol obtenu à partir de la biomasse.

**BTL:** Biomass To Liquid

**D-Glucose:** Sucre mono saccharidique

**DME:** Di-Méthyl-Ester

**EEHV :** Ester Etylique d'Huiles Végétales

**EMHV :** Ester Méthylique d'Huiles Végétales

**ETBE:** l'éthyl tertio butyl ether

**GES:** Gaz à Effet de Serre

**LBEB :** Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant

### Liste des Figures

<i>Figure 1: Production mondiale de biodiesel en 2005</i> .....	7
<i>Figure 2: Les filières de production de biocarburant</i> .....	9
<i>Figure 3: Opérations d'obtention du biodiesel</i> .....	16
<i>Figure 4: Types d'échangeur thermique</i> .....	27
<i>Figure 5: Optimisation de l'épaisseur e de l'isolant thermique</i> .....	56
<i>Figure 6: Réacteur batch à catalyse homogène du LBEB</i> .....	34

### Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Catalyse homogène et Catalyse hétérogène</i> .....	13
<i>Tableau 2: Modèles de réacteur batch à catalyse homogène: critères de choix</i> .....	28
<i>Tableau 3: Nombre de moles par litre d'huile et d'alcool</i> .....	30

# SOMMAIRE

<i>Remerciements</i> .....	<i>iii</i>
<i>Dédicace</i> .....	<i>iv</i>
<i>liste des abréviations</i> .....	<i>v</i>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>1</b>
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
I.1 Cadre du travail.....	4
I.2 Démarche et organisation du mémoire .....	4
I.3 Travaux déjà réalisés.....	5
<b>II. LES BIOCARBURANTS : ENJEUX ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>6</b>
II.1 Enjeux et perspectives .....	6
II.2 Contexte actuel .....	7
<b>III. FILIERES DE PRODUCTION DES BIOCARBURANTS</b> .....	<b>8</b>
III.1 Biocarburants de première génération.....	8
III.2 Biocarburants de seconde génération.....	8
<b>IV. ETUDE DES DIFFERENTS PROCEDES DE PRODUCTION DE BIODIESEL PAR ESTERIFICATION D’HUILE VEGETALE</b> .....	<b>10</b>
IV.1 Réaction d’estérification .....	10
IV.1.1 La transestérification.....	10
IV.1.2 Les propriétés thermodynamiques .....	11
IV.2 Procédés de production .....	12
IV.2.1 La catalyse.....	12
IV.2.2 Le mode de fonctionnement.....	13
IV.2.3 Différentes opérations de la production du biodiesel.....	14
IV.3 L’Ester Ethylique d’Huiles Végétales (EEHV) .....	17
IV.4 Matières premières à la production du biodiesel .....	18
IV.4.1 Les huiles .....	18
IV.4.2 Les alcools.....	19
IV.4.3 Les catalyseurs .....	20
<b>V. ETUDE DES REACTEURS D’ESTERIFICATION</b> .....	<b>21</b>

V.1 Description et fonctionnement des réacteurs.....	21
V.2 Typologie des réacteurs.....	21
V.2.1 Classification en fonction des phases en présence .....	21
V.2.2 Classification en fonction du mode de fonctionnement .....	22
V.2.3 Classification des réacteurs .....	22
V.3 Choix du type de réacteur du LBEB .....	23
<b>VI. DESIGN DU REACTEUR BATCH DE TRANS-ESTERIFICATION A CATALYSE HOMOGENE DU LBEB .....</b>	<b>24</b>
VI.1 Description du réacteur .....	24
VI.2 Etude des différents éléments du réacteur.....	25
VI.2.1 Agitateur.....	25
VI.2.2 Echangeur thermique .....	25
VI.2.3 Outils de gestion et de contrôle.....	28
VI.3 Modèle du réacteur batch à mettre en place au LBEB.....	28
VI.4 Conditions optimales de fonctionnement.....	29
VI.5 Géométrie du réacteur .....	29
VI.5.1 Volume des réservoirs.....	29
VI.5.2 Dimensions des réservoirs .....	31
<b>VII. CAHIER DE CHARGES .....</b>	<b>32</b>
VII.1 Différentes opérations pour l'obtention du biodiesel .....	32
VII.2 Design de l'installation.....	33
VII.3 Système d'appareillage.....	35
<b>VIII. INDUSTRIE DES REACTEURS D'ESTERIFICATION.....</b>	<b>36</b>
<b>IX. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>37</b>
<b>X. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>38</b>
<b>XI. ANNEXES.....</b>	<b>40</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>72</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>72</b>

## I. INTRODUCTION

Aux journées entreprises du 2iE, les 28 et 29 Mai 2008, un chercheur de son nom Maurice HOULOT, professeur à l' ENSAM disait lors de son exposé sur la problématique actuelle des énergies fossiles : « En 2050, il n'y aurait peut être plus d'énergie d'origine fossile ».

Le 07 Juin 2008, le Directeur Général du 2iE M Paul GINIES lors de la visite dans la province du Kourweogo au Burkina Faso, du champ de Jatropha du Larlé Naaba et d'équipements fonctionnant à l'huile de Jatropha, annonçait : « Hier, le coût du baril de pétrole a dépassé le seuil de 139dollars. »

Il est donc aujourd'hui indéniable que les énergies fossiles se font rares, que le coût du pétrole grimpe. Egalement, la combustion des énergies fossiles entraîne l'augmentation des gaz à effet de serre.

En effet, aujourd'hui nos pays doivent avoir une vision prospective et apprendre à anticiper sur les pénuries des matières premières nécessaires à leur développement.

C'est dans le même esprit que Jean DORST dans son livre intitulé « Avant que Nature Meure » a cité le président Américain Théodore ROOSEVELT qui déclarait en 1908 à la conférence sur la conservation des ressources naturelles. « Nous nous sommes enrichis de l'utilisation prodigue de nos ressources naturelles et nous avons de justes raisons d'être fiers. Mais le temps est venu d'envisager sérieusement ce qui arrivera quand nos forêts ne seront plus, quand le charbon, le fer et le pétrole seront épuisés, quand le sol aura été appauvri et lessivé vers les fleuves, polluant leurs eaux, dénudant les champs et faisant obstacle à la navigation ».

Que se passera t'il de même dans 10 ans, dans 30 ans, dans 50 ans, dans un siècle ? Le désastre ne sera-t-il pas flagrant surtout pour les pays en voie de développement ? Sans doute. Les carburants d'origine végétale ou carburants du futur constituent sans ambages une réponse pertinente à ces questions.

Plusieurs instituts, industries et organismes conscients du danger annoncé, se sont lancés dans la promotion, la recherche et la production des biocarburants. Le 2iE en fait partie et s'intéresse à la recherche sur les biocarburants à travers le laboratoire LBEB.

Le présent mémoire dont les termes de référence définissent bien ces objectifs, trouve pleinement sa justification et son intérêt.

*Voir ces termes de références en Annexe I*

## **I.1 CADRE DU TRAVAIL**

Dans le cadre de notre mémoire, nous avons eu l'honneur et la joie d'être accueillis au laboratoire LBEB dans l'Unité Thématique d'Enseignement et de recherche Génie Energétique et Industriel (UTER GEI) du 2iE du 01 Avril au 18 Juin 2008.

### **o Axes de recherche**

L'UTER GEI via son laboratoire LBEB explore deux axes de recherches que sont la conversion de l'énergie et l'économie d'énergie et d'environnement.

### **o Domaines d'intervention du LBEB**

Le LBEB travaille présentement sur la caractérisation des biomasses locales comme combustibles, l'étude des biocarburants de première génération et des biocarburants de seconde génération, la production des charbons activés et la transformation de produits agro-alimentaires alimentés en biomasse énergie.(1)

## **I.2 DEMARCHE ET ORGANISATION DU MEMOIRE**

Ce mémoire de fin de cycle d'ingénieur de l'eau et de l'environnement s'est déroulé au LBEB sous l'encadrement de M Joël BLIN et de M Yao AZOUMAH.

Il est marqué par une démarche de recherches, d'entretiens et d'échanges. Un important travail bibliographique a donc été fait ; des échanges et entretiens permanents ont eu lieu avec nos maîtres de mémoire, toujours prompts à nous encadrer et à nous corriger malgré leur emploi de temps chargé.

Pour le suivi et le bon déroulement du stage en vue de l'élaboration du mémoire, une noble initiative a été prise par nos encadreurs. Elle consiste en la tenue d'une réunion hebdomadaire regroupant les stagiaires de l'UTER GEI et leurs encadreurs. Au cours de ces réunions, chaque stagiaire expose l'état d'avancement de son travail et les difficultés rencontrées. Des indications lui sont données pour d'éventuelles améliorations.

Pour le présent mémoire, les travaux se sont déroulés suivant la chronologie ci-après :

- o Etude des filières de biocarburants ;
- o Etude des procédés de production du biodiesel ;
- o Etude des réacteurs d'estérification ;
- o Analyse d'un réacteur batch à catalyse homogène ;
- o Cahier de charges pour le LBEB ;

- Industrie des réacteurs.

### **I.3 TRAVAUX DEJA REALISES**

Un grand nombre d'ouvrages et publications traitent des biocarburants dans toute leur diversité, depuis la considération des matières premières jusqu'à la production en passant par l'étude des filières, des procédés d'estérification, des réacteurs d'estérification. Nombreux sont également les instituts et structures surtout les centres de recherches universitaires qui ont mené des recherches et expérimentations sur les biocarburants. Nous évoquons *en Annexe II* quelques uns de ces auteurs de travaux sur les biocarburants ainsi que leurs pôles ou axes de recherche.

## II. LES BIOCARBURANTS : ENJEUX ET PERSPECTIVES

### II.1 ENJEUX ET PERSPECTIVES

Deux problématiques majeures se posent au plan énergétique mondial :

- La consommation accrue d'énergies fossiles entraîne une augmentation des émissions de gaz à effet de serre responsable d'importants changements climatiques sur la planète
- La raréfaction de la principale source d'énergie qu'est le pétrole, d'où la hausse des prix du pétrole et l'accentuation de la dépendance des pays consommateurs vis-à-vis des pays producteurs de pétrole.

Parmi les solutions étudiées, les biocarburants offrent des perspectives face aux enjeux actuels. Une production de biocarburants sur le plan national ou communautaire, à partir de matières premières agricoles peut avoir un impact positif sur la balance commerciale du pays ou de la zone communautaire [1]. Par ailleurs, les biocarburants offrent pour certaines productions un débouché énergétique contribuant à accroître les sources de revenus possibles pour le monde rural et favorisant le maintien de l'emploi en milieu rural.

Toutefois, la prédominance économique des énergies fossiles ne favorise pas l'émancipation de la filière biocarburant. Alexandre PROY dans son projet de fin d'étude 2004-2005 à l'étude Reims Management School TEMA (2) a réalisé une étude comparative sur le prix des biocarburants relatant ces faits :

Un litre équivalent pétrole de biodiesel coûterait 0,67 € contre 0,34 € pour le gazole, tandis qu'un litre équivalent pétrole d'éthanol coûterait 0,61 € contre 0,29 € pour l'essence sans plomb 95.

Cette limite disparaît lorsqu'on y intègre les externalités propres à chaque carburant c'est-à-dire leur coût social tenant compte de la diminution des émissions de gaz à effet de serre, de l'indépendance énergétique du pays, de la création d'emplois et de l'augmentation des recettes fiscales. Ainsi au litre, le prix de revient des biocarburants se trouve même inférieur à ceux des produits pétroliers. Il sera donc de l'ordre de 0,37 € par litre de biodiesel contre 0,40 € pour le gazole, et de 0,32 € pour l'éthanol contre 0,42 € pour l'essence. Cependant, à l'heure actuelle, les revenus tirés de la Taxe Intérieure de Consommation (ex-TIPP) sont relativement conséquents. Et si l'on compare les «coûts» des externalités entre les carburants, en considérant que la TIC est un coût externe, l'avantage réapparaît pour les énergies fossiles.

Les biocarburants sont une réelle perspective pour l’Afrique. Mais comment ferait on pour les produire à un coût inférieur à celui du pétrole, atteindre notre indépendance énergétique tout en évitant une compétition avec l’alimentaire? Une problématique à laquelle chercheurs, décideurs politiques et société civile doivent tous ensemble y réfléchir et prendre des résolutions pour agir et à temps.

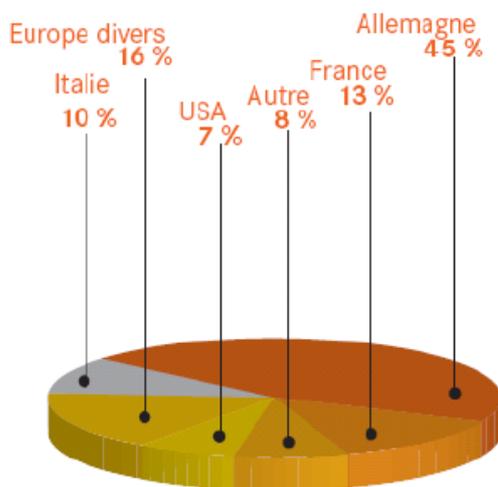
## II.2 CONTEXTE ACTUEL

Plusieurs pays dans le monde s’adonnent ou s’apprêtent à se lancer dans la production des biocarburants. Pour le biodiesel, les plus grands producteurs dans le monde sont l’Allemagne et la France, confère la figure1. Le Brésil et les Etats-Unis sont les deux plus grands producteurs de bioéthanol.

En Afrique, la plupart des pays de la sous région ouest africaine ont élaboré ou sont en train de réfléchir à des politiques et stratégies nationales en matière de biocarburants. Christophe GANDONOU (3) du groupe de recherche scientifique sur les énergies renouvelables, dans le journal le GRAIN, évoque la situation des agrocarburants en Afrique de l’Ouest. *Voir en Annexe III*

La production de biodiesel en 2005 se répartit au niveau mondial ainsi que suit :

### Production mondiale de biodiesel : 3,8 Mt en 2005



Source : European Biodiesel Board

**Figure 1: Production mondiale de biodiesel en 2005**

Cette figure donne la proportion de biodiesel produite en 2005 dans le monde avec l’Allemagne en premier suivi de la France.

### **III. FILIERES DE PRODUCTION DES BIOCARBURANTS**

Les biocarburants de première génération sont obtenus à travers deux filières principales que sont la filière bioéthanol et la filière biodiesel.

Les biocarburants de seconde génération sont plus en voie de recherche. Ils comprennent entre autres la filière lignocellulosique-biocombustible, la filière éthanol à partir de déchets de bois sous l'action des termites.

#### **III.1 BIOCARBURANTS DE PREMIERE GENERATION**

Les deux grandes filières de production de biocarburant sont la filière éthanol ou éthanol/ETBE pour les véhicules essence et la filière biodiesel ou des huiles végétales pour les véhicules diesel. (4)

Pour la filière bioéthanol, les différentes ressources utilisées pour la production de l'éthanol sont les matières sucrières et les matières amylacées. La transformation des matières sucrières en éthanol s'effectue par l'action fermentaire des micro-organismes, levures et bactéries. La filière bioéthanol comprend aussi la production du carburant ETBE, l'éthyl tertio butyl éther. Celui-ci a de plus grandes performances techniques et est obtenu par réaction entre l'éthanol et l'isobutène. Le bioéthanol ainsi que l'ETBE peut être mélangé ou substitué à l'essence.

La filière des huiles végétales utilise soit les huiles végétales dans les moteurs, soit le biodiesel. Le biodiesel est le deuxième (2<sup>ème</sup>) biocarburant utilisé dans le monde après l'éthanol. L'on a constaté l'impossibilité d'utiliser les huiles végétales brutes directement avec les nouvelles générations de moteur diesel. Par conséquent, les huiles végétales brutes estérifiées donnent des esters qui ont presque les mêmes caractéristiques physico chimiques et le même comportement que le gazole. Le biodiesel obtenu est mélangé ou substitué au gazole.

#### **III.2 BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION**

L'on distingue deux voies de production de ces biocarburants que sont la voie thermochimique (gazéification) qui aboutit à la synthèse des hydrocarbures tels le BTL (Biomasse To Liquid) et la voie biochimique (hydrolyse enzymatique) à l'éthanol. [2]

La figure suivante récapitule les différentes filières de production des biocarburants.

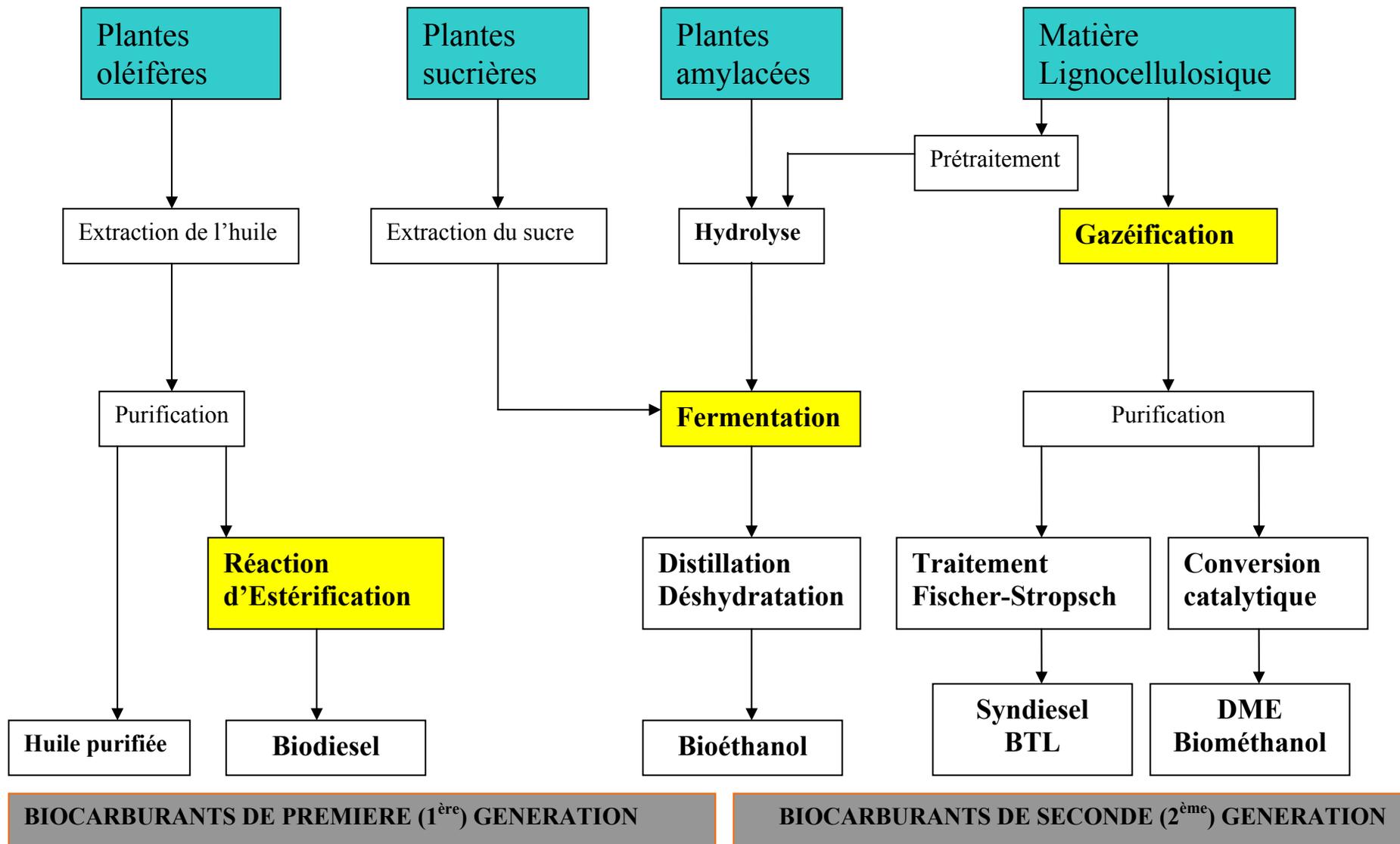
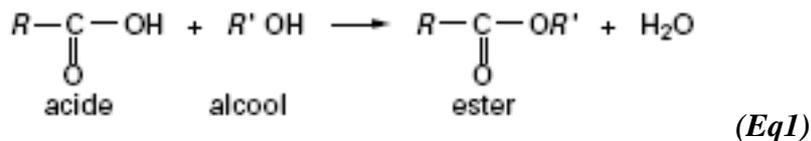


Figure 2: Les filières de production de biocarburant

## IV. ETUDE DES DIFFERENTS PROCEDES DE PRODUCTION DE BIODIESEL PAR ESTERIFICATION D'HUILE VEGETALE

### IV.1 REACTION D'ESTERIFICATION

Communément, l'estérification est une réaction lente entre un acide et un alcool. L'on obtient de l'ester. La réaction d'estérification s'écrit à travers l'équation suivante.



De part les réactifs mis en œuvre et de l'objectif visé, nous distinguons la transestérification et l'interestérification [3]. Voir Annexe IV

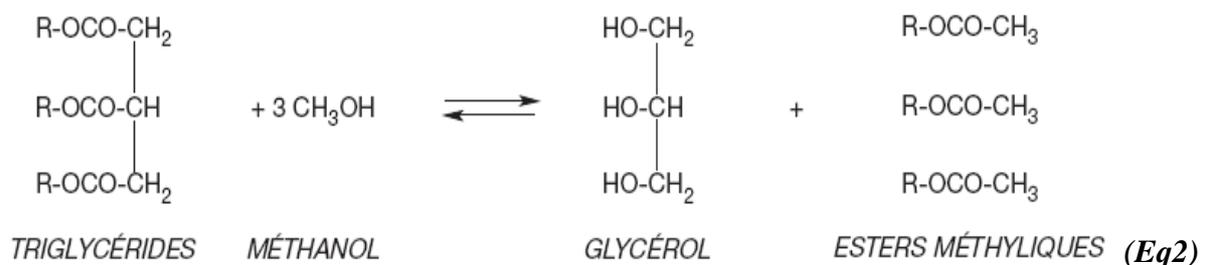
La transestérification fera l'objet de notre étude.

#### IV.1.1 La transestérification

Pour la production du biodiesel, on parle de transestérification. En effet, le biodiesel est obtenu par l'échange ester alcool ou alcoololyse en présence de catalyseur. Cette réaction entre un ester et un alcool conduit à la formation d'un autre ester. Le réactif ester, les triglycérides, sont des esters de glycérol composés de glycérine et d'acides gras R-COOH.

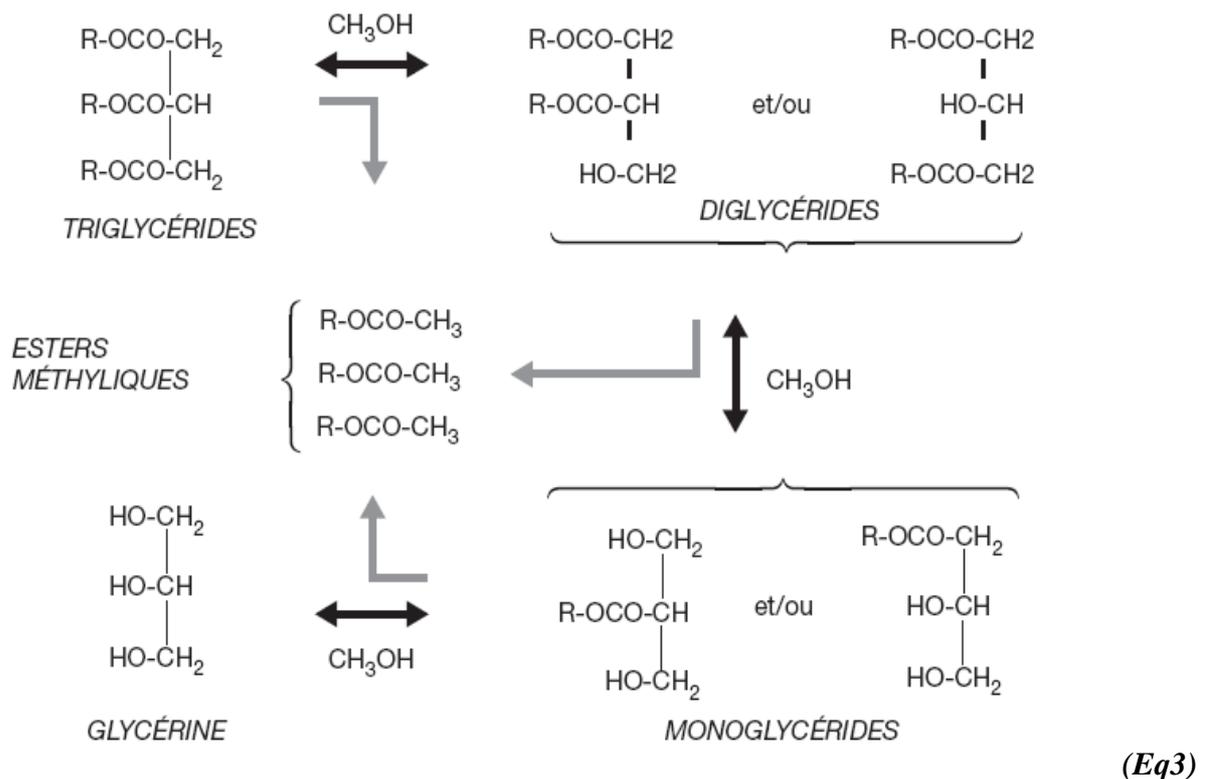
Pour l'obtention des esters éthyliques, les réactifs en œuvre sont les triglycérides des huiles et l'éthanol.

Les esters méthyliques eux sont obtenus par réaction de transestérification des triglycérides avec le méthanol selon la formule suivante :



Il est à noter que la libération du glycérol ou glycérine n'est effective qu'après plusieurs

réactions consécutives de transestérification. En effet, comme démontré par le schéma réactionnel de trans-estérification ci-dessous, les triglycérides se transforment en diglycérides avec formation de la première molécule d'ester méthylique, puis en monoglycérides avec formation de la seconde molécule d'ester méthylique. La glycérine et la troisième molécule d'ester méthylique d'acides gras sont enfin obtenues à la suite de la réaction des monoglycérides avec une molécule de méthanol.



#### IV.1.2 Les propriétés thermodynamiques

L'estérification ou la transestérification est une réaction athermique, équilibrée, réversible et lente.

Elle est catalysée par des acides ou des bases pour l'accélération de la réaction.

Une modification de température ne peut déplacer l'équilibre de la réaction. Pour déplacer l'équilibre, il faut ajouter un excès de réactif. C'est ainsi que l'on emploie généralement une quantité d'alcool supérieure à celle qui est nécessaire. Le ratio molaire huile/alcool recommandé est de fait de 1/6.

## IV.2 PROCÉDES DE PRODUCTION

Les procédés de production du biodiesel par estérification se définissent par rapport à deux éléments clés que sont le mode de catalyse et le fonctionnement du procédé. Deux techniques de catalyse sont utilisées à savoir la catalyse homogène et la catalyse hétérogène. Deux techniques de fonctionnement du réacteur sont possibles, le fonctionnement en discontinu et le fonctionnement en continu. Nous distinguons ainsi donc les procédés de production du biodiesel par estérification à savoir :

- Le procédé par catalyse homogène (discontinu ou continu)
- Le procédé par catalyse hétérogène (discontinu ou continu)

### IV.2.1 La catalyse

La réaction de transestérification s'effectue en présence d'un catalyseur. On parle de catalyse homogène pour des catalyseurs solubles dans le milieu réactionnel et de catalyse hétérogène pour des catalyseurs totalement insolubles dans les réactifs. Il existe aussi la catalyse enzymatique avec un temps de séjour relativement long et le chauffage par micro-ondes avec un temps de catalyse fortement réduit.

- ***La catalyse homogène***

Elle est la technique la plus utilisée et peut être réalisée par des catalyseurs basiques ou acides. Toutefois, les catalyseurs basiques sont les plus utilisés car fournissant une plus grande réactivité et ne causant pas de risques élevés de corrosion des installations industrielles. Les sels basiques contenus dans la glycérine brute et les eaux de lavage provenant du catalyseur sont neutralisés par un acide minéral. Les procédés à catalyse homogène sont dits fonctionnant à catalyseur perdu du fait de la complication des processus de purification des EMHV et de la glycérine et des dépenses en consommables (acide chlorhydrique pour la neutralisation de la glycérine). La catalyse homogène requiert de conditions douces de température et de pression (45 à 85 °C sous une pression absolue maximum de 2,5bar). [4]

○ **La catalyse hétérogène**

Celle-ci est plus en adéquation avec le respect de l'environnement par la pureté des produits obtenus et la réduction de rejet de produits polluants. Les produits de la réaction ne contiennent pas de sels, d'où la réduction des frais de purification et la grande ouverture de débouchés industriels de la glycérine. L'IFP a mis en place un catalyseur ayant une grande stabilité dans le temps et une bonne résistance à l'attrition. Sous forme d'extrudés, ce catalyseur est un aluminat de zinc de type spinelle de formule brute  $ZnAl_2O_4$ .

Le tableau suivant compare les deux types de catalyse pour la transestérification des huiles végétales.

**Tableau 1: Catalyse homogène et Catalyse hétérogène**

	<b>Catalyse Homogène</b>	<b>Catalyse Hétérogène</b>
Conditions de température et de pression	Douces : 45 à 85°C à la pression atmosphérique	Elevées : 180 à 220°C sous 40 à 60 bars
Vitesse de la réaction	Elevée	Faible
Séparation catalyseur/produits	Pas aisée	Facile
Formation de savons, émulsion	Oui	Non
Emission de gaz à effet de serre	Plus importante	Moins importante
Coût du catalyseur	Faible	Moins faible
Durée de vie du catalyseur	Courte	Plus longue
Rendement	98,5 à 99,4%	Peut atteindre 100%

**IV.2.2 Le mode de fonctionnement**

La réaction de transestérification s'opère en discontinu ou en continu, ainsi il existe des procédés en discontinu et des procédés en continu. Les conditions opératoires de température, pression, consommation d'énergie sont sensiblement les mêmes. Les capacités des unités à procédés continus sont des plus grandes, supérieures à 100 000 t/an. Les procédés continus permettent de réduire la taille des équipements et conséquemment des investissements et la diminution du coût de la main d'œuvre.

### IV.2.3 Différentes opérations de la production du biodiesel

#### ○ *Introduction des réactifs*

Pour la production du biodiesel, les réactifs mis en jeu sont l'huile, l'alcool (éthanol ou méthanol), le tout en présence de catalyseur pour accélérer la réaction. Ces trois composants peuvent être introduits en même temps dans le réacteur d'estérification. Mais le plus souvent en présence de catalyseur solide, l'alcool et le catalyseur sont introduits dans un réservoir où le mélange est préchauffé pour la dissolution rapide du catalyseur. L'homogénéisation est assurée par un agitateur. Ce mélange alcool/catalyseur est ensuite conduit au réacteur d'estérification ainsi que l'huile.

#### ○ *Réaction d'estérification*

La réaction d'estérification ou de transestérification se produit entre l'huile et l'alcool introduits dans le réacteur pendant un certain temps de séjour. Les conditions de température et de pressions requises sont fonction du type de catalyseur en jeu. Un système de chauffage du réacteur est nécessaire, ainsi qu'un agitateur. La transformation des huiles triglycérides en esters méthyliques ou éthyliques par transestérification permet de réduire la masse moléculaire à un tiers de celle de l'huile, de réduire la viscosité de huit fois et d'accroître la volatilité. La température, le type de catalyseur et sa concentration, le rapport alcool/ester et la vitesse de brassage sont les plus importantes variables qui influent sur le temps de réaction de la transestérification et sur l'efficacité de la transformation. La pureté des agents réactifs, par exemple la présence d'eau, d'acides gras libres et d'autres contaminants qu'on retrouve dans les huiles non raffinées (et autres matières premières) sont aussi des variables très importantes. (5)

La « transestérification » est la technique classique de production de biodiesel. Les rendements massiques en ester méthylique par rapport à l'huile varient de 98,5% à 99,4%. [1]

#### ○ *Phase de décantation*

Après la formation des esters au cours de la transestérification, une étape de décantation du produit est nécessaire pour séparer le biodiesel du glycérol. Le glycérol plus dense que le biodiesel se condense dans la partie basse. La décantation peut s'effectuer dans le réacteur par gravité, ou dans des décanteurs statiques ou par des centrifugeuses pendant deux à trois heures de temps.

○ *Phase de lavage ou purification de l'ester*

Une étape de purification de l'ester consiste à éliminer les impuretés telles que la glycérine résiduelle, l'excès de méthanol, les traces de catalyseurs, savons et sels formés par la catalyse homogène.

Cette opération s'effectue par lavage du biodiesel à l'eau. Une purification poussée des esters est réalisable par passage sur une colonne remplie d'un absorbant sélectif ou un lit de résines échangeuses d'ions. La distillation de type flash sous vide assure également la pureté de l'ester.

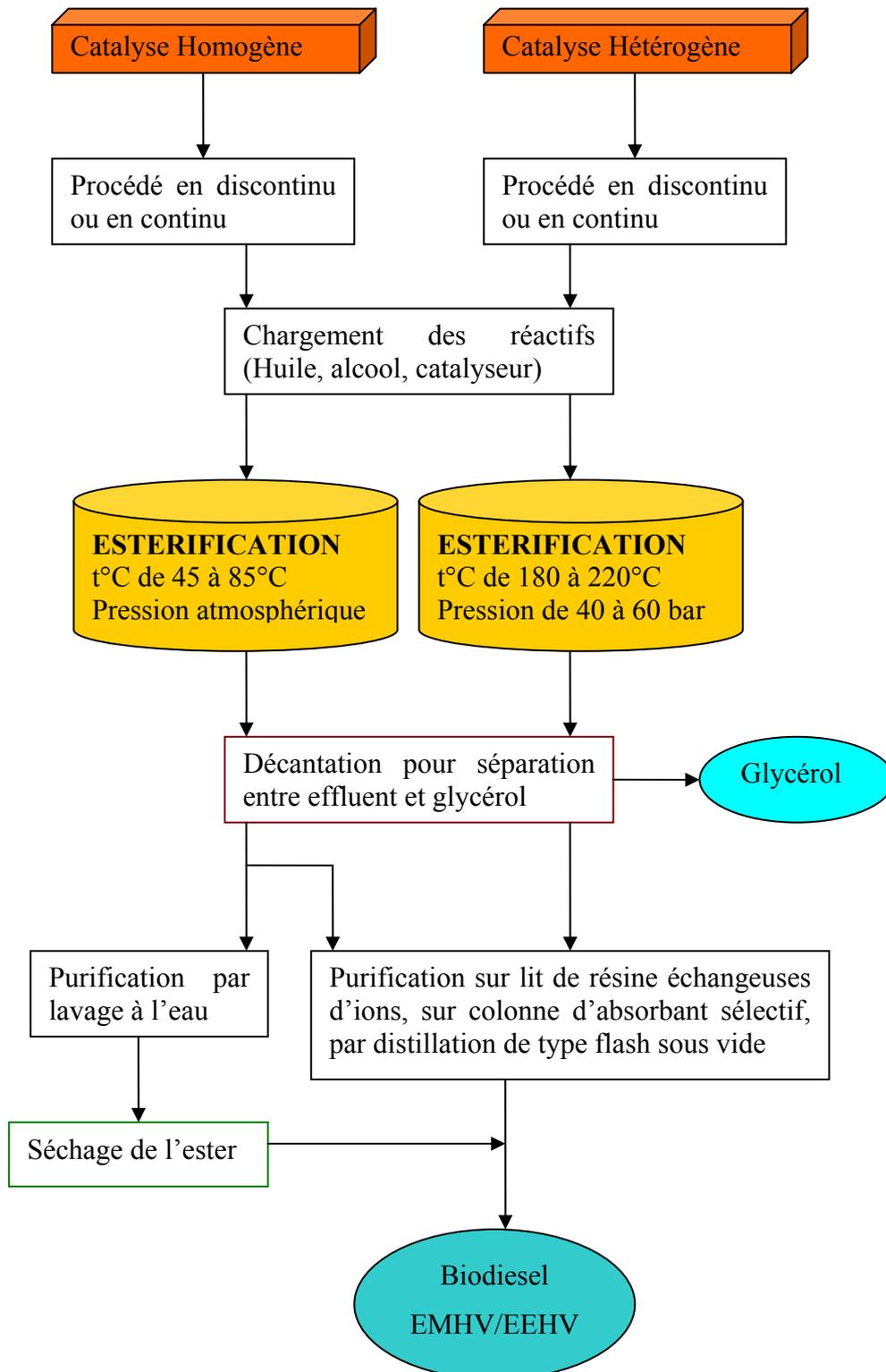
Après lavage du biodiesel à l'eau, l'opération de séchage permet d'évacuer l'eau présente. Elle est le plus souvent réalisée par chauffage à une forte température du biodiesel lavé, la température de séchage pouvant atteindre 140°C en procédé continu par catalyse homogène.

○ *Traitement des sous produits de la réaction*

En catalyse homogène, la fraction glycérine et les eaux de lavage sont neutralisées par un acide minéral. Elles sont reconcentrées par distillation après décantation des acides gras libres au cours de la neutralisation. La glycérine obtenue doit être soumise à divers traitements de purification.

En catalyse hétérogène, l'effluent obtenu est soumis à une évaporation partielle qui élimine l'excès d'alcool. La glycérine obtenue après décantation présente une qualité supérieure à celle obtenue par les procédés fonctionnant à catalyse homogène pouvant être utilisée sans traitement.

La figure suivante résume les étapes de la production du biodiesel selon les procédés existant.



**Figure 3: Opérations d'obtention du biodiesel**

### IV.3 L'ESTER ETHYLIQUE D'HUILES VEGETALES (EEHV)

L'ester méthylique d'huile végétale (EMHV) et l'ester éthylique d'huile végétale (EEHV) sont les deux principaux types de biodiesel, le premier obtenu par la réaction entre huile/méthanol et le second, huile/éthanol.

L'EMHV est le plus connu. La fabrication des EEHV est en cours de développement.

La méthanolyse et l'éthanololyse utilisant la catalyse homogène ou hétérogène ont pour poison commun l'eau, précurseur de la saponification en milieu homogène, inhibiteur de l'activité catalytique en catalyse hétérogène.

La glycérine est totalement soluble dans le milieu réactionnel (huile/éthanol). Elle modifie de ce fait l'équilibre de la solution et ne permet pas d'atteindre en une seule étape des valeurs de conversion élevées. Pour cela, l'on effectue la distillation de l'excès d'alcool pour ensuite réaliser une deuxième étape de transestérification. Cette distillation entraîne la démixtion de la glycérine formée et rend possible sa séparation.

En catalyse homogène, l'opération de distillation est difficile car le catalyseur actif dans le milieu peut favoriser le phénomène de retroréaction avec le glycérol libéré et reformer des glycérides.

On est par contre affranchi de ce problème de retroréaction en catalyse hétérogène.

L'université de Idaho à Moscou, dans son département de l'ingénierie chimique a effectué un grand travail de recherche et d'expérimentation concernant la production des EEHV à partir d'huile de colza [5]. Ces chercheurs donnent des résultats fiables, des conditions optimales pour une bonne production des EEHV sans souci majeur avec une bonne conversion.

La température, le catalyseur, le taux d'agitation, la quantité d'eau dans l'alcool, l'excès d'alcool utilisé sont les éléments principaux jouant sur la réaction de transestérification.

Pour l'EEHV obtenu à partir de l'huile de colza, les conditions optimales obtenues à travers les recherches de l'université de Idaho sont ci après énumérées.

1. Température ambiante
2. Catalyseur : 0,5% de sodium methoxide ou 1% potassium methoxide par rapport au poids de l'huile
3. Agitation vigoureuse pendant la réaction, plus d'agitation après la réaction pour éviter l'émulsion
4. Ethanol exempt d'eau pour une conversion élevée
5. 50% d'excès d'éthanol avec la soude soit un ratio molaire de 4,5 et un ratio volumique

de 3,77 d'huile/alcool; et 100% d'excès d'éthanol avec le potassium signifiant un ratio molaire huile/alcool de 6 et un ratio volumique huile/alcool de 2,83

## **IV.4 MATIERES PREMIERES A LA PRODUCTION DU BIODIESEL**

### **IV.4.1 Les huiles**

L'huile est un corps gras composé principalement de triglycérides à hauteur de 95 à 98%. Sont également présents dans l'huile dans une quantité minime des constituants tels des acides gras libres, des mono et diglycérides, des phospholipides, des tocophérols, des stérols, des colorants naturels et des composés odorants. [1]

Toute huile végétale brute peut être utilisée comme carburant avec modification du moteur diesel ou pour la production du biodiesel. Toutefois, nombreuses de ces huiles sont exclues pour des considérations de prix, de rendement à l'hectare et d'écobilan.

Egalement, peuvent être utilisées pour la production du biodiesel, des matières grasses animales ainsi que des huiles de cuisson recyclées. Ces graisses contenant de grandes quantités d'acides libres, handicap de la transestérification, sont soumises à un prétraitement. Ceci consiste à estérifier ces acides gras avec l'alcool en présence de catalyseurs acides. La réaction de transestérification est complétée en présence de catalyseur alcalin. [6]

Le processus d'obtention des huiles végétales industriellement est assez simple. L'étape primordiale est la pression qui permet d'extraire l'huile des grains. Le nettoyage des grains, l'aplatissage et la cuisson sont des opérations préliminaires à la pression, nécessaires pour certaines plantes oléagineuses.

- ***Le nettoyage***

Cette opération préliminaire de tamisage permet de débarrasser les grains de corps étrangers pouvant détériorer le matériel et nuire à la qualité des produits.

- ***L'aplatissage***

La, les grains sont passés à travers des cylindres pour en sortir sous forme de flocons.

- ***La cuisson***

Elle consiste au chauffage à environ 80°C des flocons, ceci dans le but de faciliter l'extraction de l'huile des flocons au cours de la pression.

- ***La pression***

La pression consiste en l'extraction de l'huile des grains. Les flocons séchés ou les grains

passent dans des presses ; l'huile s'écoule tandis que les tourteaux gras sont recueillis à la sortie. Pour obtenir l'huile pure, cette huile végétale brute subit les opérations de décantation, de filtration et de dénaturation.

Les huiles à transestérifier doivent respecter les spécifications ci-dessous énumérées selon que l'on se trouve en catalyse homogène ou hétérogène. [1]

- ***Catalyse homogène***

Indice d'acide IA < 1 mg KOH/g

Teneur en phosphore < 10 ppm

Teneur en eau (% poids) < 0.1

- ***Catalyse hétérogène***

Indice d'acide IA < 10 mg KOH/g

Teneur en phosphore < 10 ppm

Teneur en eau (% poids) < 0.1

#### **IV.4.2 Les alcools**

Les alcools utilisés pour la production du biodiesel sont l'éthanol, le méthanol. Le butanol est quelque peu utilisé.

- ***L'éthanol***

L'éthanol ou le bioéthanol ou l'alcool éthylique a les mêmes caractéristiques que l'alcool de bouche. De formule chimique  $C_2H_6O$ , il est obtenu généralement à partir de la fermentation des plantes amylacées et sucrières et de la matière lignocellulosique. Quatre étapes sont nécessaires à savoir l'extraction du sucre ou de l'amidon, sa fermentation, distillation et déshydratation. La pyrolyse avant la fermentation est réalisée pour les plantes amylacées.

Après l'extraction de l'amidon, l'on effectue la pyrolyse, procédé permettant de réduire l'amidon en D-glucose sous l'action d'une enzyme qu'est l'amylase.

Les D-glucoses sont obtenus pour les plantes amylacées par pyrolyse de l'amidon et pour les plantes sucrières de l'extraction des sucres.

La fermentation, quant à elle transforme les D-glucoses en éthanol. L'opération de distillation vient après la fermentation et a pour rôle de séparer le distillat ou fraction légère de la fraction lourde ou résidu par ébullition. Elle sépare donc l'éthanol des autres substances qui se trouvent dans le produit de la fermentation. La déshydratation est la dernière étape. Elle consiste en la perte d'eau de l'éthanol.

### ○ *Le méthanol*

De formule chimique  $\text{CH}_4\text{O}$ , le méthanol est l'alcool le plus utilisé pour la production du biodiesel. Essentiellement fabriqué à partir de gaz de synthèse  $\text{CO}+\text{H}_2$  obtenu par gazéification des hydrocarbures lourds, il est obtenu aussi à partir de conversion thermochimique de la biomasse.

La valorisation de la biomasse pour l'obtention du méthanol est un avantage pour les pays non producteurs de pétrole qui ne disposent pas de réserves de méthanol. Ainsi, l'obtention du méthanol à partir de la matière cellulosique passe par la gazéification suivie de la conversion catalytique, la gazéification étant une transformation thermique d'un solide combustible en un mélange gazeux combustible en présence d'un composé gazeux. Ce procédé requiert des conditions de température et de pression élevées, 240 à 270 °C sous 50 à 100 bar.

Il serait donc plus adéquat pour les pays non producteurs de travailler à partir d'éthanol obtenu par biomasse pour obtenir un carburant à 100% d'origine biomasse.

#### **IV.4.3 Les catalyseurs**

Les catalyseurs acides sont moins réactifs et sont corrosifs. C'est l'acide sulfurique et l'acide sulfonique qui sont couramment utilisés. (6)

Les catalyseurs basiques sont préférés pour la production du biodiesel. Ils sont moins chers et moins dangereux que les catalyseurs acides; donc recommandables aux zones locales africaines. Les plus couramment utilisés sont l'hydroxyde de soude  $\text{NaOH}$ , l'hydroxyde de potassium  $\text{KOH}$  et le sodium methoxide  $\text{MeONa}$  ou  $\text{CH}_3\text{ONa}$ . [7]

## **V. ETUDE DES REACTEURS D'ESTERIFICATION**

### **V.1 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DES REACTEURS**

Le réacteur de transestérification est un appareil dans lequel s'opère la réaction de transestérification, opération qui aboutit à la production du biodiesel. Comme tout réacteur chimique, « il consiste en un récipient dans lequel les réactifs sont introduits au début de l'opération ; après mise en conditions de température et de pression, la réaction se déroule jusqu'au taux de transformation désiré, ensuite les conditions opératoires sont modifiées et les produits soutirés » [8].

Réservoir cylindrique vertical le plus souvent, sa dimension dépend de la capacité de l'installation. Construit en acier, le réacteur d'estérification comporte un système de chauffage pour faciliter la réaction en présence d'un catalyseur et est muni d'un agitateur homogénéisant le mélange.

Certes, cet appareil ne constitue qu'un élément de l'installation mais il est le cœur de l'installation. Il est généralement entouré d'appareillages placés en amont et en aval permettant des traitements physiques des matières premières et des produits de la réaction.

### **V.2 TYPOLOGIE DES REACTEURS**

Il existe plusieurs types de réacteurs. Les critères de classification reposent sur la catalyse employée, les phases en présence, le mode de fonctionnement du réacteur et la capacité de production du réacteur.

#### **V.2.1 Classification en fonction des phases en présence**

Le nombre et la nature des phases en présence dans la transformation chimique sont les caractéristiques de base de la classification des réacteurs. L'on distingue alors les systèmes monophasiques en présence d'une seule phase des systèmes polyphasiques ou hétérogènes [8].

- *Systèmes monophasiques*

Tout réacteur est dit monophasique quant son milieu réactionnel comprend une seule phase ; une phase gazeuse ou une phase liquide.

Le réacteur d'estérification à catalyse homogène est monophasique puisque la réaction est

constituée d'une seule phase liquide homogène.

- ***Systèmes polyphasiques***

Là, le milieu réactionnel se compose de plusieurs phases. Plusieurs combinaisons gaz, liquide, solide en deux ou trois phases y sont rencontrées. Le réacteur d'estérification à catalyse hétérogène comprend une phase liquide et une phase solide catalytique. Il est donc de type polyphasique.

## **V.2.2 Classification en fonction du mode de fonctionnement**

Cette classification basée sur la présence ou non du flux de matière entrant ou sortant du système nous donne le choix entre un mode de fonctionnement discontinu, un autre en semi-continu et une opération en continu.

- ***Réacteur discontinu (batch)***

Là, les réactifs sont chargés dans le réacteur et la réaction d'estérification se déroule en fonction du temps sans flux de matière entrant ou sortant du système.

- ***Réacteur semi continu***

C'est une variante du système discontinu. La seule différence avec le réacteur discontinu se trouve dans le fait qu'il y'a flux de matière soit à l'entrée soit à la sortie du système. L'on peut avoir une partie des réactifs introduite tout au long de l'opération et le déchargement fait à la fin.

- ***Réacteur continu***

Il est un système ouvert dans lequel il y'a écoulement interne permanent, donc flux entrant et sortant. Il est conçu pour travailler en régime stationnaire à la différence des systèmes discontinus qui sont en régime non-stationnaire.

## **V.2.3 Classification des réacteurs**

Nous pouvons avoir des réacteurs monophasiques pour la catalyse homogène et polyphasiques pour la catalyse hétérogène. Le monophasique ou le polyphasique peut fonctionner en discontinu ou en continu. Selon la quantité à produire, nous pouvons avoir de microréacteurs, des réacteurs pilotes et de grandes unités qui sont les réacteurs industriels.

### **V.3 CHOIX DU TYPE DE REACTEUR DU LBEB**

Les principaux critères de choix du type de réacteur à installer au LBEB se résument aux objectifs de production attendue donc la quantité de biodiesel pouvant être produite, aux objectifs d'utilité de l'installation à mettre en place ce qui peut être la recherche, le commerce, aux limites de la poche financière.

Le LBEB aimerait mettre en place une unité pilote d'estérification dont l'objectif est la recherche de conditions optimales de production du biodiesel pour les pays africains à partir des matières premières disponibles en Afrique. Cette installation devant être simple à réaliser pour les populations locales, souples d'utilisation pour celles-ci, d'une capacité de production inférieure à 100 litres. Ainsi, l'on a choisit le réacteur batch à catalyse homogène qui n'exige pas de pression et température élevées.

## **VI. DESIGN DU REACTEUR BATCH DE TRANS-ESTERIFICATION A CATALYSE HOMOGENE DU LBEB**

Le réacteur batch à catalyse homogène, système choisi pour le LBEB fait l'objet de la présente étude. Des technologies existantes sont détaillées et un cahier de charges est proposé pour la conception de ce réacteur.

### **VI.1 DESCRIPTION DU REACTEUR**

Le réacteur batch à catalyse homogène permet de réaliser la réaction de transestérification en fonctionnement discontinu, en présence d'un catalyseur soluble dans la réaction sous l'action d'un agitateur.

Dans le réacteur discontinu, on peut identifier cinq étapes successives plus ou moins distinctes que sont :

- le chargement des réactifs dans le réacteur ;
- la mise en conditions de température et de pression ;
- la réaction proprement dite ;
- le retour aux conditions normales de pression et de température ;
- le vidange du réacteur.

L'appareillage nécessaire pour la réalisation de cette réaction est relativement simple. Toutefois, il doit comporter certains éléments cités ci après:

- un récipient ayant au moins la capacité du volume à traiter, c'est le réacteur ;
- des tubulures pour remplissage et vidange à l'entrée et à la sortie du récipient ;
- un agitateur rotatif ;
- un équipement de chauffage qui peut lui être interne ou externe ;
- des appareils de gestion et de contrôle (thermocouple, vannes, débitmètres, ...).

Le réacteur lui même a une forme souvent cylindrique avec fond elliptique. Sa construction est tel qu'il résiste au vide et/ou à une pression interne. Plusieurs matériaux peuvent être utilisés, mais l'acier vitrifié est le plus intéressant du fait de sa résistance à la porosité et de la facilité du nettoyage.

Les réacteurs sont souvent caractérisés sur le marché en fonction de la capacité utile, du

diamètre, du poids total, de la surface d'échange, de la pression de service et du matériau.

## **VI.2 ETUDE DES DIFFERENTS ELEMENTS DU REACTEUR**

Là, nous présentons chaque élément avec sa typologie.

### **VI.2.1 Agitateur**

Le système d'agitation permet de mélanger les réactifs et de favoriser le transfert de chaleur avec les parois prévues à cet effet. L'agitateur rotatif comprend un moteur qui par l'intermédiaire d'un arbre transmet un mouvement de rotation à un mobile d'agitation qui brasse le fluide à agiter. Différentes formes de mobiles sont utilisées tenant compte de la circulation du fluide et de la viscosité du fluide [8] à savoir :

- les agitateurs du type hélices ;
- les agitateurs du type turbines à pales ;
- les agitateurs à grand rayon d'action ;
- les vis d'Archimède.

Les trois derniers modèles ne sont pas adaptés pour l'agitation à mettre en place dans le réacteur discontinu. Les turbines sont utilisées pour fragmenter un fluide en bulles. Les agitateurs à grand rayon, à ancre par exemple adaptés au brassage des produits visqueux à proximité des parois produisent un flux périphérique, tangentiel.

Pour la réaction de trans-estérification, **les agitateurs du type hélice** sont recommandés. En effet, les hélices provoquent un mouvement essentiellement axial et homogénéisent les milieux fluides. C'est de ce dispositif dont on a besoin pour le réacteur batch d'estérification à catalyse homogène.

### **VI.2.2 Echangeur thermique**

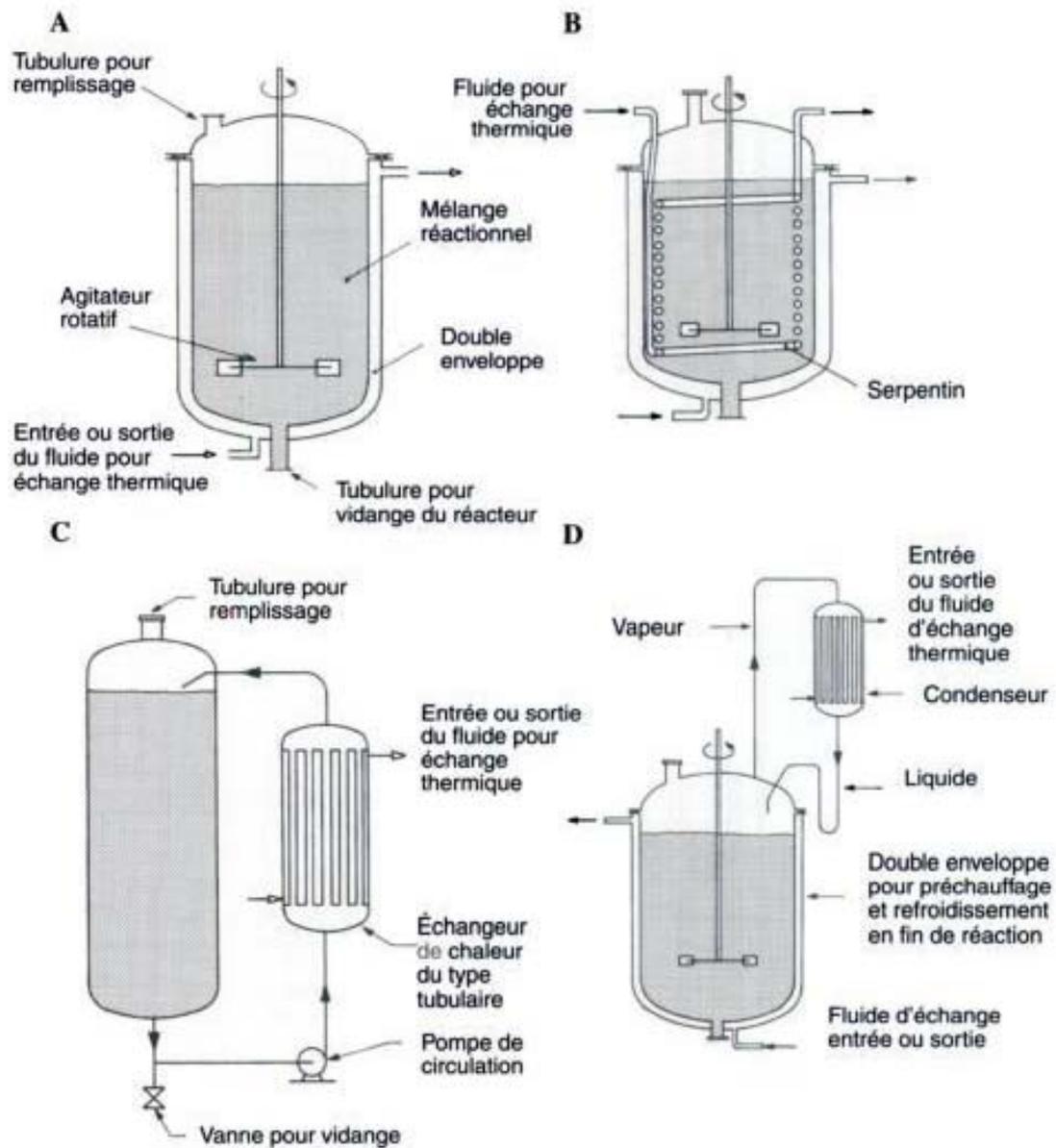
Dans un échangeur thermique, un fluide chaud fournit sa chaleur à un fluide froid sans se mélanger à lui. Pour les systèmes de chauffage pouvant être mis en place dans les réacteurs d'estérification, la surface d'échange peut être localisée à l'intérieur du réacteur (serpentin, plaques) ou contourner la paroi du réacteur (double enveloppe).

A l'extérieur du réacteur, peut être placé un échangeur classique sur la phase liquide ou un condenseur sur la phase vapeur. Le rôle du condenseur, lui est de distiller la vapeur créée au

cours de la réaction de transestérification (alcool vaporisé) pour la transformer en liquide réutilisable (alcool liquide).

Diverses technologies existent pour réaliser l'échange thermique. Notre étude s'intéressera à quatre systèmes thermiques rencontrés le plus souvent en pratique [8]. Ce sont la double enveloppe, le serpentin interne, l'échangeur externe sur boucle de circulation et le condenseur de la phase vapeur. Il est à noter que pour la mise en place de la double enveloppe et du serpentin interne, un groupe de production d'eau chaude est nécessaire. La figure ci après résume ces différents types d'échangeur. *Voir plus en détails en Annexe V.*

Pour le LBEB, nous choisissons de mettre en place des résistances chauffantes allant de 45 à 100°C. Un condenseur est prévu pour transformer l'alcool vapeur en alcool liquide.



**Figure 4: Types d'échangeur thermique**

**A. Double enveloppe**

**B. Double enveloppe et serpentin interne**

**C. Echangeur externe sur boucle de circulation**

**D. Refroidissement par condensation de la phase vapeur**

### VI.2.3 Outils de gestion et de contrôle

Pour le bon fonctionnement, le contrôle et la gestion de la production du biodiesel, un système d'appareillage de gestion et de contrôle est indispensable. Ces outils de gestion et de contrôle sont entre autres, les vannes, les régulateurs de pression, les débitmètres, les verres indicateurs du niveau du décantât, les thermocouples, les sondes.

### VI.3 MODELE DU REACTEUR BATCH A METTRE EN PLACE AU LBEB

Plusieurs critères ont conduit à ce système défini largement dans le cahier de charges. Le tableau suivant compare trois types de réacteurs batch à catalyse homogène à savoir le modèle Fuelpod (7), le modèle Fuelmeister (8) et le modèle de l'UNALM [9].

*Voir les équipements de ces réacteurs en Annexe VI*

**Tableau 2: Modèles de réacteur batch à catalyse homogène: critères de choix**

	Avantages	Inconvénients
<p><b><u>réacteur FuelPod2</u></b></p> 	Système automatique	Entretien et manutention personnelle difficile
	Purification performante	Coût relativement élevé
	Contrôle et gestion efficiente	Système peu souple
<p><b><u>processeur Fuelmeister</u></b></p> 	Bon système de filtration Adaptable pour PME	Entretien et manutention personnelle un peu difficile
	Bon système de purification	Pas trop souple
	Système simple	Utilisation de deux réacteurs
<p><b><u>Réacteur pilote de l'université de l'UNALM</u></b></p> 	Système simple et souple, Adaptable pour PME	Introduction difficile des réactifs
	Equipement local/entretien facile	Purification moyenne
	Facilité pour la recherche/ Recommandée en zone rurale	Système non automatique

De ce tableau de comparaison de ces trois systèmes, il apparaît clairement que le système adaptable en laboratoire et PME est le modèle de l'université de l'UNALM. Toutefois, il présente certaines limites pouvant être comblées par les deux autres modèles.

Ainsi, nous prévoyons pour le LBEB un modèle comprenant :

1. un réservoir alcool/catalyseur et un réacteur d'estérification comme celui de l'UNALM,
2. Des pompes à alcool et à huile comme le processeur Fuelmeister pour l'acheminement facile des réactifs
3. Un système de filtration à la sortie du réservoir et du réacteur pour améliorer la purification
4. Un système de contrôle pour le contrôle et la gestion de la production du biodiesel

La conception de ce modèle a été effectuée dans le cahier de charges proposé au chapitre V.

## **VI.4 CONDITIONS OPTIMALES DE FONCTIONNEMENT**

Les conditions optimales de fonctionnement du réacteur batch d'estérification à catalyse homogène ont été étudiées par Edem N'TSOUKPOE dans son mémoire de stage [10]. Ce sont ces spécifications qui ont été prises en compte pour la conception de l'unité pilote d'estérification du LBEB. Elles guideront beaucoup les expérimentations au laboratoire. Toutefois, il est à préciser que le but de cette installation étant la recherche, plusieurs expérimentations seront faites en deçà et au dessus de ces conditions opératoires pour valider expérimentalement les conditions optimales obtenues ou proposées par Edem N'TSOUKPOE.

Ratio molaire Huile/Alcool de 6

Ratio massique catalyseur (KOH) / Huile : 0.5%

Température de la réaction 60°C

Rendement de 85%

## **VI.5 GEOMETRIE DU REACTEUR**

### **VI.5.1 Volume des réservoirs**

Le petit réservoir à savoir le réservoir alcool/catalyseur et le grand réservoir qui est le réacteur d'estérification ont leur capacité utile qui est fonction de trois éléments clés que sont :

- l'estérification méthanolique et ethanologique ;
- la quantité de production maximale de biodiesel de 60litres ;

- le ratio molaire huile/alcool de 6.

Le calcul du nombre de moles par litre de l'huile et de l'alcool (éthanol, méthanol), la détermination du ratio volumique huile/alcool sont les étapes préliminaires à la détermination de la capacité des réservoirs.

- **Nombre de moles par litre d'huile et d'alcool (n)**

Soit  $\rho$  la masse volumique du corps et  $M$ , sa masse molaire. Le nombre de moles par litre du corps est donné par la formule suivante:

$$n = \frac{\rho}{M}$$

avec  $\rho$  en g/l et  $M$  en g/mol

Après calcul nous obtenons les résultats de  $n$  ci après :

**Tableau 3: Nombre de moles par litre d'huile et d'alcool**

		$\rho$ (g/l)	$M$ (g/mol)	$n$ (mol/l)
Alcool	Méthanol	790	32	<b>24</b>
	Ethanol	791	46	<b>17</b>
Huile végétale		900	880	<b>1</b>

- **Ratio volumique huile/alcool**

Le ratio molaire ( $r_m$ ) huile/alcool optimal étant de 6, le ratio volumique ( $r_v$ ) est obtenu par la fraction du nombre de moles ( $n$ ) par le ratio molaire ( $r_m$ ).

$$r_v = n / r_m$$

Ainsi :

**Le ratio volumique huile/méthanol est de 4**

**Le ratio volumique huile/éthanol est de 2.83**

- **Capacité des réservoirs**

Le rendement de la réaction peut atteindre 100%. Nous allons supposer que 60 litres d'huile transésterifiés donnent à peu près 60 litres de biodiesel.

Pour une production optimale de biodiesel, si l'on utilise 60 litres d'huile, l'on devrait utiliser 15 litres de méthanol ou 21 litres d'éthanol selon le ratio volumique optimal huile/alcool.

Nous choisissons donc du fait de ces résultats de mettre en place :

**un réservoir de 30 litres pour l'alcool ;**

**un réacteur d'estérification de 100 litres.**

Il est à préciser que l'unité pilote à installer au LBEB a un but de recherche. Ainsi, plusieurs plages de ratio seront employées pour une quantité de production pouvant être différente des 60 litres.

### **VI.5.2 Dimensions des réservoirs**

Un exemple de dimensionnement possible du réacteur batch du LBEB est proposé en *annexe VII*.

## **VII. CAHIER DE CHARGES**

Le présent cahier de charges présente le design d'un réacteur d'estérification discontinu à catalyse homogène, pour le LBEB, le Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburants de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Il fait mention de tout l'appareillage nécessaire pour une bonne réaction d'estérification et pour une bonne production du biodiesel ainsi que des procédures administratives en la matière. Cette partie donne l'essentiel du cahier de charges.

*Voir Cahier de charges complet en Annexe VIII.*

Le cahier de charges proposé a pour objet de décrire les caractéristiques d'un réacteur discontinu d'estérification à catalyse homogène pour la production de 60 litres de biodiesel au LBEB du 2iE.

Les critères de base sont comme suit :

Réacteur batch d'estérification à catalyse homogène

Catalyseurs basique ou acide

Possibilité de l'utiliser aussi bien avec le méthanol que l'éthanol

Capacité de production d'environ 60l de biodiesel

### **VII.1 DIFFERENTES OPERATIONS POUR L'OBTENTION DU BIODIESEL**

L'équipement recherché a pour objectif la production du biodiesel encore appelé ester d'huiles végétales. L'avantage des esters d'huiles végétales est qu'ils peuvent se substituer au gasoil sans aucun problème pour le moteur. Ceci se justifie du fait que le biodiesel et le gasoil ont des caractéristiques physico-chimiques similaires. La réaction de transestérification entre l'huile et l'alcool en présence d'un catalyseur acide ou basique (la soude le plus souvent) génère un ester et de la glycérine. La phase de décantation servira à séparer ces produits obtenus. Les esters sont ensuite lavés, séchés et filtrés pour être débarrassés des restes de glycérine, de l'excès d'alcool et de catalyseur. Le carburant « biodiesel » ou « diester » est ainsi prêt à être utilisé.

Les étapes de transestérification, de décantation et de lavage sont effectuées dans un unique réacteur. En plus du réacteur d'estérification, le cœur de la production, il ne doit pas être omis l'appareillage amont et aval nécessaire pour une production efficiente. Voir ci-dessus :

1 - Huile dans le réacteur d'estérification équipé d'un agitateur à une température de 60°C à la pression atmosphérique

2 - Mélange alcool + catalyseur préchauffé dans le réservoir à alcool et homogénéisé par un agitateur

3 - Ajout de la solution alcool + catalyseur dans le réacteur d'estérification

4 - Temps de séjour pour atteindre l'équilibre thermodynamique de la réaction d'estérification (réactifs huile et alcool ; produits biodiesel et glycérine) est d'environ 1h à 60°C pour un ratio molaire alcool/huile de 1/6.

5 - Séparation des esters et de la glycérine dans le réacteur d'estérification ; la glycérine sera évacuée en bas du réacteur par une vanne. Le réacteur est équipé d'un système qui permet de suivre visuellement l'évolution de la limite entre les deux phases

6 - Lavage à l'eau de l'ester pour éliminer les sels et la glycérine résiduelle dans le réacteur d'estérification

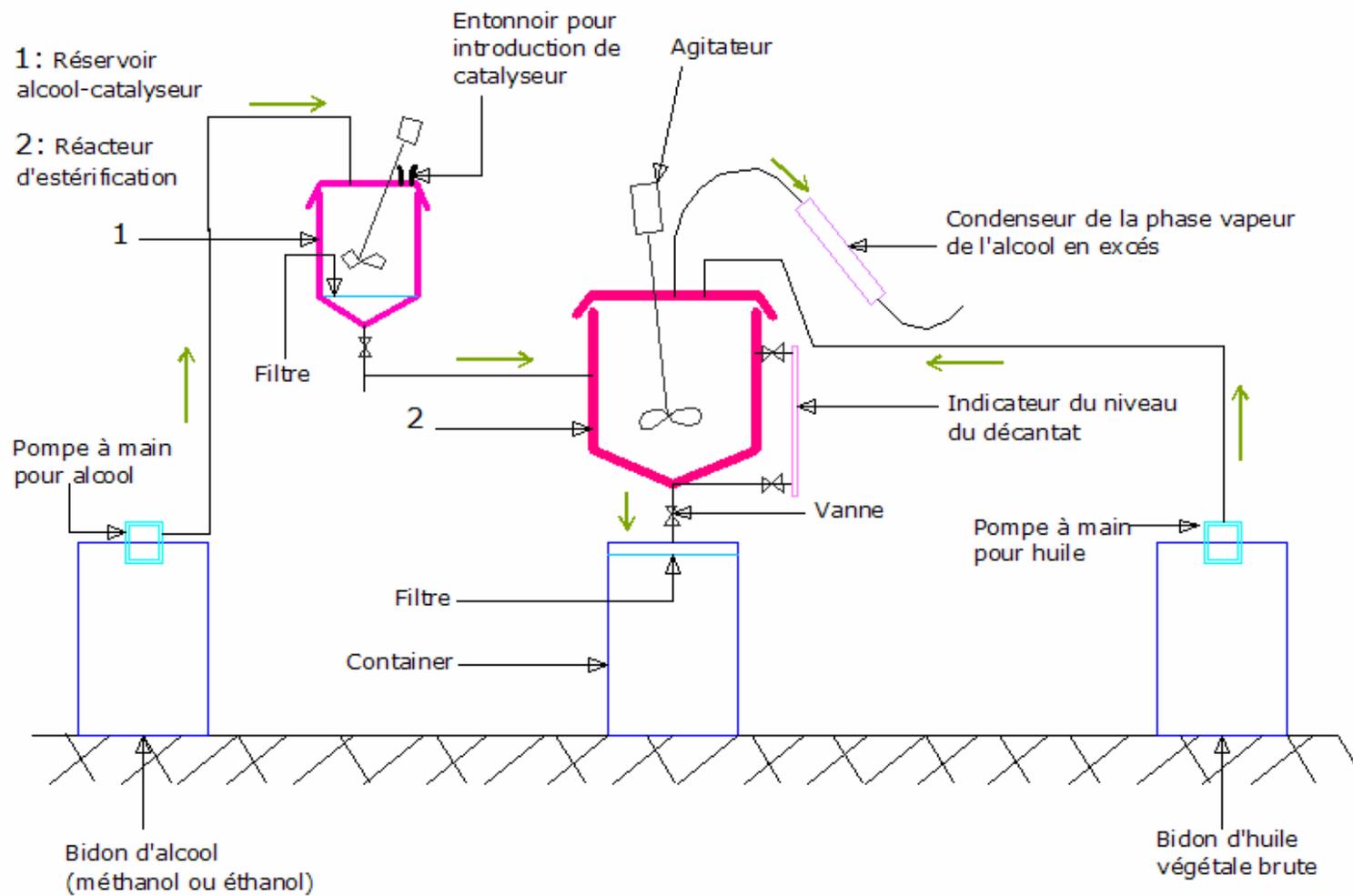
7 - Séchage à 90°C sous agitation pour éliminer les traces de méthanol et d'eau encore contenues dans l'ester dans le réacteur d'estérification

8 - Filtration sur filtre de 10 microns

9 - Obtention d'un biodiesel ou un ester méthylique ou éthylique d'huile végétale dont les rendements massiques par rapport à l'huile varient de 98,5 à 99,4%.

## **VII.2 DESIGN DE L'INSTALLATION**

Le schéma de l'unité pilote pour la production du biodiesel du LBEB proposé se présente comme suit :



**Figure 5: Réacteur batch à catalyse homogène du LBEB**

### VII.3 SYSTEME D'APPAREILLAGE

Le schéma ci-dessus proposé comporte un système d'appareillage comprenant :

- *Le réservoir à méthanol ou à éthanol*

Il est muni d'un agitateur à hélices, d'une résistance chauffante, d'une grille de filtrage et est d'un volume de 30l.

- *Le réacteur d'estérification*

Réacteur cylindrique de 100l, il comprend une résistance chauffante de 50 à 100°C, d'un agitateur à hélices, d'un indicateur du niveau du décantât, d'un condenseur de la phase vapeur de l'alcool.

- *Système de filtration*

Il est constitué d'un container de 80 litres sur lequel est disposé un filtre permettant de filtrer les esters qui coulent par gravité depuis le réacteur d'estérification.

- *Système de contrôle*

Ce sont l'indicateur de niveau du décantât, les vannes d'entrée et de sortie, les thermocouples.

- *Support métallique de l'installation*

L'ensemble de l'installation devra être maintenu sur un support métallique.

Le système d'appareillage complet avec toutes les spécifications utiles est donné en *Annexe VII*.

## VIII. INDUSTRIE DES REACTEURS D'ESTERIFICATION

Un travail en parallèle a consisté en l'identification des fabricants et fournisseurs de réacteurs d'estérification, donc aussi de réacteurs batch d'estérification à catalyse homogène.

Une gamme de devis des réacteurs batch à catalyse homogène produisant 50 à 60 litres de biodiesel a été obtenue grâce à ces fabricants ou fournisseurs.

Il est à noter que l'on ne peut dénombrer les industriels ou sociétés d'ingénierie à même de fournir l'installation pour la réaction d'estérification, la décantation, le lavage/séchage, bref le processus de production du biodiesel par estérification dont la réaction d'estérification donc le réacteur en est le cœur, tellement ils sont nombreux. La plupart des bonnes chaudronneries peuvent fabriquer le réacteur.

Nous avons donc retenu quelques sociétés d'ingénieries spécialisées qui sont à même de fabriquer et de fournir ce matériel.

*Voir en Annexe IX..*

## IX. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au terme de ce mémoire, force est de reconnaître que le cadre de travail plaisant a été pour nous un moment d'étude, d'observation et d'analyse des biocarburants.

Deux filières existent pour la production des biocarburants. Ce sont les filières de première et deuxième génération. Nos études ont porté également sur les procédés de production du biodiesel par estérification, le biodiesel étant une des filières de première génération. Des procédés discontinus et continus d'estérification par catalyse homogène ou hétérogène, il a été retenu le procédé discontinu à catalyse homogène pour le LBEB. Ce procédé dont la mise en œuvre est possible à petite échelle est bien indiqué dans les zones locales africaines. Un cahier de charges mentionnant la conception d'un réacteur batch à catalyse homogène pour le LBEB a été rédigé et transmis aux chaudronneries locales pour une réalisation de l'installation au Burkina Faso même. Pour la fabrication d'unités de production de biodiesel, toute bonne chaudronnerie en est capable.

L'Afrique est aujourd'hui encore plus que dépendante sur le plan énergétique. Il est impératif et salutaire que les décideurs politiques africains optent pour les biocarburants et mettent en place des programmes et stratégies pour les développer. Et c'est pour cela que nous pensons que les études et recherches sur les biocarburants apporteront beaucoup à la construction d'une Afrique indépendante et émergente.

Nous sommes convaincue que les biocarburants sans entrer dans une compétition néfaste contre les besoins alimentaires des populations peuvent fournir à nos pays une énergie maîtrisable pour leur développement et apporter un plus à la lutte contre la pauvreté.

Nous sommes également convaincue que nous n'avons pas épuisé ce domaine de recherche et que des approfondissements et améliorations sont toujours possibles.

Le mémoire s'est déroulé sans difficulté notable. Plus qu'un apport à nos connaissances en matière énergétique, ce travail nous a permis de connaître et de comprendre la production du biodiesel par estérification et a fait naître en nous le désir de contribuer à l'effectivité d'une réelle indépendance énergétique des pays africains.

## X. BIBLIOGRAPHIE

### Ouvrages et articles

- [1] **Daniel Ballerini, Nathalie Alazard-Toux**, *Les biocarburants, Etat des lieux, Perspectives et enjeux du développement*. IFP Publications. Editions Technip, Paris, Jan.2006.
- [2] **Jean-François Gruson, Frédéric Monot**, *Les biocarburants de seconde génération : Etat de l'art et perspectives*. Conférence au Salon International du Machinisme Agricole, Villepinte. 7 Mars 2007
- [3] **Roger Lamartine, Jean-Pierre Scharff**, *Estérification*. Techniques de l'ingénieur, traité génie des procédés, dossier J 5 800. 1998
- [4] **F. Figueras, M.G. Carneiro Rocha, P.G Pries de Oliveira, W.De Araujo Gonzalez**, *Production de biodiesel par catalyse hétérogène*. 18<sup>th</sup> North American Catalysis Society Meeting, Mexico. June 1-6, 2003.
- [5] **Roger A. Korus, Dwight S. Hoffman, Narendra Bam, Charles L. Peterson, David C.Drown**, *Transesterification process to manufacture ethyl ester of rape oil*. Department of chemical Engineering, University of Idaho, Moscow. Proceedings of first biomass conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture and Industry, Vol. II, pp. 876-890 (1993).
- [6] **Mahacine Amrani**, *Producing biodiesel from greases with high fatty acids*. Département de génie chimique, Faculté des Sciences et Techniques, Maroc. Physics, Chemistry and Technology Vol.5, n°1, 2007, pp. 61-67
- [7] **D.Darnoko, Munir Cheryan**, *Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor*. Journal of the American Oil Chemists Society, Vol. 77, n°12 : 1263-1267, 2000.
- [8] **Pierre Trambouze, Jean-Paul Euzen**, *Les Réacteurs Chimiques : de la conception à la mise en œuvre*. Publications de l'IFP. Editions Technip, 2002.
- [9] **PhD José Luis Calle Maraví, Javier Coello Guevara, Paula Castro Pareja, Mirtha Nazario Ramírez**, *Opciones Para La Producción De Biodiesel A Pequeña Escala En El Perú*. UNALM University, 2004.
- [10] **Edem N'tsoupon**, *Modélisation phénoménologique d'un réacteur de transesterification pour la production du biodiesel*. Mémoire de Master. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). 2008.

[11] **Marzena Dzida, Piotr Prusakiewicz**, *The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel*. Fuel 87 (2008) 1941-1948, University of Silesia, Institute of Chemistry.

### **Sites Internet**

- (1) [http://www.2ie-edu.org/IMG/pdf/LBEB\\_V3\\_Final.pdf](http://www.2ie-edu.org/IMG/pdf/LBEB_V3_Final.pdf)
- (2) <http://www.econologie.com/mobile/ar-1735.html>
- (3) <http://www.riiad.net/spip.php?article950> ou <http://www.grain.org/semences/?id=67>
- (4) <http://fr.wikipedia.org/wiki/Biocarburant> »
- (5) <http://www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/>
- (6) <http://www.freepatentsonline.com/EP0694524>
- (7) <http://presseahuile.com>
- (8) <http://www.greenfuels.co.uk>
- (9) <http://www.mousse-decoupe.com/ccm.html>
- (10) <http://www.librecours.org/documents/8/899.pdf>

## **XI. ANNEXES**

### **Liste des annexes**

Annexe I: Termes de Références .....	41
Annexe II: Travaux déjà réalisés.....	42
Annexe III: Situation des Agrocarburants en Afrique de l'Ouest.....	45
Annexe IV: La transestérification et l'interestérification .....	46
Annexe V: Types d'échangeurs thermiques .....	47
Annexe VI: Modèles de réacteurs batch à catalyse homogène .....	49
Annexe VII: Dimensions du réacteur.....	51
Annexe VIII: Cahier de Charges.....	58
Annexe IX: Industrie des réacteurs .....	68

## **Annexe I: Termes de Références**

### **Analyse et dimensionnement des procédés de production des carburants du futur : les procédés d'estérification**

#### **Description du sujet :**

Les pays Africains s'intéressent de plus en plus aux biocarburants pour le transport et la production d'énergie décentralisée. Ces biocarburants permettraient aux pays de limiter leur dépendance vis à vis des importations des produits pétroliers et d'avoir accès à une source d'énergie à moindre coup. Les biocarburants apparaissent aujourd'hui comme l'une des clefs du développement futur de l'économie africaine.

L'utilisation d'huiles végétales brutes directement comme carburant dans des moteurs diesels classiques nécessitent quelques modifications sur le moteur. Par contre ces huiles ne peuvent pas être utilisées avec les nouvelles générations de moteur diesel (HDI, DCI, JTD, CDI, TDCI, CRDI, CTDI, CRD, DID, XDI, TDI, etc ). Ces huiles doivent être estérifiées pour donner des esters qui ont quasiment les mêmes caractéristiques physico chimiques et le même comportement que le gazole.

La majeure partie des travaux qui ont été menés pour estérifier les huiles végétales ont été faits à partir de méthanol, qui est un sous produit d'activités pétrolières. Cependant, aujourd'hui ce qui intéresse les pays non producteurs de pétrole et qui ne disposent pas de réserves de méthanol, c'est de travailler à partir d'éthanol obtenu par fermentation de biomasse, ce qui permet d'obtenir un carburant à 100% d'origine biomasse.

Le stage proposé consistera dans un premier temps à faire une étude bibliographique sur les différentes filières de production de biodiesel par estérification d'huiles végétales. L'étudiant s'intéressera à identifier les différentes voix catalytiques existantes et les procédés utilisés, pour en sélectionner un ou deux simples et permettant d'obtenir de bons rendements et adaptables au contexte africain.

Dans un second temps sur la base du travail bibliographique, l'étudiant procédera au dimensionnement d'un réacteur pilote d'estérification à partir d'éthanol pour un cas d'école au Burkina Faso.

## **Annexe II: Travaux déjà réalisés**

### **1. Daniel BALLERINI**

Titre : *LES BIOCARBURANTS*

*Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement*

Il évoque la place des biocarburants dans le contexte énergétique mondial, l'éthanol et l'ETBE, les esters d'huiles végétales, les ressources en biomasse lignocellulosique, la transformation de la biomasse lignocellulosique par voie thermochimique et biochimique, les bilans économiques et environnementaux des filières de production de biocarburants.

### **2. Pierre TRAMBOUZE et Jean-Paul EUZEN**

Titre : *LES REACTEURS CHIMIQUES*

*de la conception à la mise en œuvre*

Il a étudié les réacteurs dans leur typologie, leur fonctionnement, leur conception et leur mise en œuvre.

### **3. Mahacine AMRANI**

Titre: *Producing biodiesel from greases with high fatty acids*

A travers son ouvrage "Simulation du procédé de fabrication du biodiesel à partir des graisses jaunes", l'auteur étudie les procédés d'obtention du biodiesel. De ces études, il ressort que les graisses jaunes contiennent de grandes quantités d'acides libres qui forment des savons en présence de catalyseur alcalin. Pour éviter la formation de savons, un prétraitement de la matière première avec des catalyseurs acides s'avèrent donc nécessaire.

**4. Christian HARDTKE**- Professeur au Département de biologie moléculaire végétale à l'université de Lausanne

Titre : *Oui aux biocarburants !- Mais auxquels*

Ces travaux portent sur les problématiques énergétiques posées et les perspectives qu'offrent les biocarburants. Il a également étudié les filières de production de biocarburants à savoir celle du biodiesel et de l'éthanol.

**5. Roger LAMARTINE** – Professeur à l'université Claude Bernard de Lyon &

**Jean-Pierre SCHARFF**- Professeur à l'université Claude Bernard de Lyon et à l'Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique de Lyon

*Titre : ESTERIFICATION*

Ces auteurs ont travaillé sur les réactions d'estérification, la mise en œuvre industrielle par les méthodes d'obtention des esters.

**6. F. Figueras ; M.G. Carneiro Rocha ; P.G Pries de Oliveira ; W.De Araujo Gonzalez**

*Titre : HETEROPOLYACIDES*

*Catalyseurs potentiels de transestérification des huiles végétales en conditions douces.*

Ces chercheurs du Centre National de la Recherche Scientifique CNRS et de l'Institut de Recherche sur la Catalyse ont effectué d'énormes travaux sur les catalyseurs de transestérification, allant de la catalyse homogène à la catalyse hétérogène et des catalyseurs basiques aux catalyseurs acides.

**7. José CALLE ; Javier COELLO ; Paula CASTRO**

*Titre : Opciones para la produccion de biodiesel en el Peru*

*Options for biodiesel production in Peru*

Le groupe technologique ITGD en collaboration avec l'université UNALM ont développé ce projet de recherche en vue d'explorer les options de production du biodiesel au Pérou. Ils ont donc à leur actif deux unités de production de biodiesel.

**8. Roger A. KORUS; Dwight S. HOFFMAN; Narendra BAM; Charles L. PETERSON and David C. DROWN** – Department of chemical Engineering, University of Idaho, Moscow

*Titre: Transesterification process to manufacture ethyl ester of rape oil*

Leurs études ont porté sur la réaction de transestérification entre l'huile de Colza et l'éthanol donnant l'ester éthylique d'huile de Colza. Les expériences menées ont permis de déterminer les conditions optimales de la production de l'EEHV : température, pression, catalyse, taux d'agitation, la quantité d'eau dans l'alcool utilisé.

**9. Jean-François GRUSON & Frédéric MONOT** – IFP

*Titre : Les biocarburants de seconde génération : Etat de l'art et perspectives*

Ces chercheurs de l'IFP ont travaillé sur les filières de production des biocarburants. Ils

montrent les enjeux et défis des nouvelles filières que sont les biocarburants de deuxième (2<sup>ème</sup>) génération et étudient divers procédés de la production de l'éthanol lignocellulosique.

#### **10. D.Darnoko & Munir Cheryan**

*Titre: Kinetics of oil transesterification in a batch reactor*

Ce travail a consisté en l'étude des paramètres d'une réaction de transestérification dans un réacteur batch pour la production de l'EMHV.

### **Annexe III: Situation des Agrocarburants en Afrique de l'Ouest**

Le Sénégal, le Ghana et le Nigeria possèdent des stratégies nationales de promotion des biocarburants. Ces stratégies ont pour but de créer un cadre législatif et réglementaire incitatif pour la production et l'utilisation des biocarburants et de développer dans les court et moyen termes des filières bioalcool et biodiesel.

Au Bénin, dans le cadre du Projet de Fourniture des Services d'Energie (PFSE) de la Direction Générale de l'Energie, il est envisagé, la production locale de bioéthanol et de biodiesel.

Au Burkina Faso, au Niger et en Côte d'Ivoire, les gouvernements ont exprimé clairement leur souhait de développer la production des biocarburants. Mais ce sont les opérateurs privés qui se sont lancés les premiers dans le développement de projet visant à produire des biocarburants.

Ainsi, au Burkina Faso, les sociétés DAGRIS et SN CITEC ont élaboré un projet de production du biodiesel à partir de l'huile de coton destiné à être incorporé au gazole et/ou pour carburant dans les groupes électrogènes utilisés pour la production d'électricité dans le pays. La fondation 2iE compte produire du biodiesel courant année 2008-2009 pour la recherche dans ce domaine. Au cours de ses journées entreprises qui se sont tenues du 28 au 29 Mai 2008, elle a organisé une table ronde autour de la question des énergies renouvelables ou étaient présents d'éminents chercheurs dans ce domaine.

Au Mali, la culture du Jatropha est déjà assez avancée. Source de revenus en particulier pour les femmes, l'huile pure de Jatropha peut faire fonctionner les moteurs de type Lister qui sont utilisés dans les zones rurales pour faire tourner les moulins à grains et les pompes à eau. Certaines études ont même envisagé la substitution du pétrole par l'huile pure de jatropha pour les lampes et les cuisinières.

## **Annexe IV: La transestérification et l'interestérification**

La transestérification et l'interestérification aboutissent toutes à la formation d'ester. Trois voies de transestérification sont connues. Ce sont l'échange ester-alcool ou alcoolyse, l'échange ester-acide ou acidolyse et l'échange ester-ester.

Pour la production du biodiesel, c'est le procédé ester-alcool qui est employé.

L'interestérification, elle consiste à modifier la structure glycéridique des graisses naturelles. Elle est catalysée par l'éthylate de sodium (0,1 à 2% en masse par rapport à l'huile, T=100 à 200°C). Le produit fini présente un comportement à la fusion différent (plus faible) de celui de la graisse d'origine sans que les autres propriétés sans que les autres propriétés en soient changées. L'interestérification est surtout utilisée dans l'industrie agro-alimentaire car elle permet de modifier pour une utilisation précise les propriétés rhéologiques d'un corps gras.

## **Annexe V: Types d'échangeurs thermiques**

### **○ *La double enveloppe***

Sa réalisation est relativement simple. Le réacteur discontinu à double enveloppe est muni d'un système de chauffage-refroidissement par monofluide qui circule à débit constant dans une boucle en circuit fermé. Il est prévu pour la double enveloppe entrée et sortie du fluide pour échange thermique. Signalons que ce système recouvre la surface occupée par les réactifs à chauffer et n'est donc pas présent sur le couvercle du réacteur qui est généralement détachable du corps du réacteur (cylindre).

Ce système est limité en surface d'échange. Son coefficient global de transfert de chaleur est relativement faible puisque variant de 60 à 350 W/m<sup>2</sup>.K, ce qui l'amène à être remplacé souvent par le serpentin interne qui a un plus grand coefficient de transfert.

### **○ *Le serpentin interne***

Le serpentin est constitué par un demi-tube enroulé à l'extérieur à spires jointives et soudé sur la paroi du réacteur. Ceci permet d'élever le coefficient de transfert externe ; 700 à 800 W/m<sup>2</sup>.K qui sont de bons coefficients de transfert de chaleur. L'entrée et une sortie du fluide pour l'échange thermique correspondent aux extrémités du tube.

Ce système présente deux principaux obstacles que sont la surface d'échange limitée et le mauvais déroulement de l'action de l'agitateur et des opérations de nettoyage du à la gêne que peut créer la présence du serpentin.

Le double serpentin peut être mis en place simultanément avec la double enveloppe. Ce système est nommé système double enveloppe et serpentin interne. La surface d'échange augmente par rapport à chaque système pris individuellement et le coefficient de transfert de chaleur est plus grand.

### **○ *L'échangeur externe sur boucle de circulation du liquide***

Là, le liquide est pompé du réacteur à l'échangeur externe qui est un échangeur de chaleur de type tubulaire. Et de là, le liquide réchauffé repart dans le réacteur et ainsi de suite. On parle de boucle de circulation. L'utilisation de ce système garantit une surface d'échange élevée.

### **○ *Condenseur de la phase vapeur***

Il prend aussi le nom d'échangeur externe et opère en tant que condenseur sur la phase vapeur. Dans les réactions d'estérification en discontinu, son utilisation est d'une grande rentabilité puisqu'elle permet de réutiliser l'alcool qui n'a pas servi à la réaction. Le principe est le suivant : l'alcool sous forme de vapeur est acheminé à l'extérieur dans le condenseur qui le transforme en alcool liquide réinjecté dans le réacteur.

Pour le système de chauffage des réactifs et de refroidissement en fin de production du biodiesel, la mise en place de la double enveloppe s'avère être opportun.

## **Annexe VI: Modèles de réacteurs batch à catalyse homogène**

### **Design du réacteur FuelPod2**

#### 1. Réservoir d'huile

La première opération est le remplissage du réservoir d'huile qui se fait manuellement : renverser l'huile contenue dans un bidon dans le réservoir. L'huile est ensuite réchauffée, le thermostat du réchauffeur d'huile est réglé à 60°C.

#### 2. Réservoir pré-mix pour le mélange de l'alcool et du catalyseur

L'alcool et le catalyseur sont introduits dans un réservoir pré-mix où se fait le mélange. Le pré-mix est ainsi connecté au réservoir d'huile à l'aide de raccords automatiques.

Pour démarrer la réaction, l'on règle la minuterie puis le pré-mix est injecté automatiquement. Après la réaction, la décantation est effectuée, et l'on élimine la glycérine dans un bidon à travers une vanne. Le chauffage est assuré par un système de chauffage industriel par ceinture couplée à un thermostat. Le thermostat est réglé entre 55 et 62°C. Pour la mise en route du chauffage, l'on branche la prise de la ceinture chauffante sur la prise 240V.

#### 6. Système de purification

A l'aide du bouton « purification », l'on a les étapes de purification du biodiesel simplifiées, le lavage à l'eau étant définitivement supprimé. Ceci désigne l'Amberlite™ système de purification. Après le retrait de la glycérine, la résine (par échange d'ion) Amberlite TM est utilisée. Le système, combiné à une circulation lente, élimine les savons et tous les excès de méthanol d'où un excellent nettoyage du biodiesel meilleur au standart. Quatre heures plus tard, la vanne Fill Car est réglée, le carburant est consommable directement.

#### 8. Système de régulation et de contrôle

Il est muni d'un thermomètre infra rouge pour le contrôle de la température, d'une pompe pneumatique qui fait tout : Achemine l'huile vers le processeur, homogénéise l'huile, mélange le pré-mix à l'huile, fait fonctionner la colonne TM et envoie le biodiesel vers le stockage et une pompe à alcool

### **Design du processeur Fuelmeister avec colonne de purification**

Le processus d'estérification a lieu dans le processeur, la dissolution du catalyseur dans le mélangeur catalyseur/alcool et le lavage dans le réservoir lavage.

Les différentes étapes sont comme suit dans le système d'appareillage suivant:

1. Les bidons d'huiles et d'alcool munies de pompe à main
2. Le réservoir alcool/catalyseur ou mélangeur catalyseur

Là, la quantité de soude est introduite par un entonnoir au sommet du mélangeur catalyseur. On y ajoute lentement avec la pompe à main, le méthanol.

3. Le processeur

L'huile est chauffée entre 50 et 60°C dans le bidon métallique à huile à l'aide d'une ceinture chauffante avant d'être acheminée dans le processeur par une pompe de brassage. Le mélange alcool/catalyseur sera également conduit au processeur par un tuyau.

La réaction d'estérification a donc lieu dans le processeur et il en résulte un mélange de glycérol et de biodiesel. Après décantation, la glycérine est extraite à travers une vanne.

4. Système de filtration

Le biodiesel brut ainsi obtenu passe par une colonne contenant des résines. A la sortie, il est limpide et prêt à l'emploi.

### **Design du réacteur pilote de l'université de l'UNALM**

Il comprend comme équipements principaux le réservoir alcool/catalyseur et le réacteur d'estérification.

1. Le réservoir d'alcool

Il contient le mélange catalyseur et l'alcool préchauffé à 60°C sous agitation de 150rpm pour une bonne dissolution du catalyseur et une rapide réaction dans le réacteur.

2. Le réacteur d'estérification

Il comprend un agitateur, un indicateur du niveau du décantât, un condenseur de la phase vapeur de l'alcool.

L'huile y est introduite grâce à un entonnoir. Le mélange alcool/catalyseur s'y joint et la réaction d'estérification commence. Elle s'effectue à 60°C. Un système de chauffage grâce aux résistances chauffantes est prévu. Après vient l'étape de décantation au sortir de laquelle la glycérine est évacuée à travers la vanne de sortie. Ensuite le lavage à l'eau et enfin le séchage sous température de 90°C.

Le biodiesel recueilli est prêt à l'emploi.

## Annexe VII: Dimensions du réacteur

Nous fixons le diamètre du réservoir alcool à 30 cm et le diamètre du réacteur à 45cm. La hauteur des réservoirs est donc déduite de ces valeurs. Signalons que les réservoirs sont constitués d'une partie cylindrique se terminant dans la partie basse en forme conique. Il sera donc spécifié la hauteur  $H_1$  de la partie cylindrique et la hauteur  $H_2$  de la partie conique pour la hauteur totale  $H$  du réservoir.

### ○ *Diamètres des réservoirs*

**Diamètre du réservoir d'alcool de 30 cm**

**Diamètre du réacteur d'estérification de 45 cm**

### ○ *Hauteur des réservoirs*

Supposons  $V_1$  et  $V_2$ , les volumes respectifs en  $m^3$  de la partie cylindrique et de la partie conique des réservoirs ;

$S_1$  et  $S_0$ , les surfaces respectives en  $m^2$  de la section inférieure de la partie cylindrique et de la partie conique des réservoirs ;

$H_1$  et  $H_2$ , les hauteurs respectives en m de la partie cylindrique et de la partie conique des réservoirs.

$$(a) \quad V_1 = \frac{\pi * D_1^2 * H_1}{4} \quad \text{Avec} \quad H_1 = \frac{3}{4} H_T$$

$$V_2 = \frac{(S_0 + S_1) * H_2}{2} \quad \text{Avec } S_0 \text{ supposé nulle ;}$$

$$(b) \quad V_2 = \frac{\pi * D_1^2 * H_2}{8} \quad \text{Avec} \quad H_2 = \frac{1}{4} H_T$$

$$(c) \quad V_T = V_1 + V_2$$

Des équations (a), (b) et (c), nous obtenons :

$$V_T = \frac{31 * \pi * D_1^2 * H_T}{144}$$

D'où, la hauteur totale  $H_T$  obtenue à travers l'équation suivante :

$$H_T = \frac{144 * V_T}{31 * \pi * D_1^2}$$

Les résultats des éléments de géométrie des réservoirs sont résumés dans le tableau ci-après :

**Tableau 1: Diamètre et hauteur des réservoirs**

	Volume du réservoir V(l)	Diamètre intérieur D(cm)	Hauteur totale Ht (cm)
Réservoir à alcool	30	30	50
Réacteur d'estérification	100	45	75

○ **Epaisseur du réacteur**

Pour la transestérification et le séchage du biodiesel, Le mélange réactionnel devant être chauffé, il est nécessaire de prévoir une épaisseur du réacteur avec un bon système d'isolation.

○ **Hypothèses de base**

Le réacteur ne doit pas être brûlant de l'extérieur, température de 30°C.

La température à la paroi intérieure du réacteur est de 60°C.

Seule la partie cylindrique du réacteur n'est pas adiabatique.

○ **Chaleur générée par la réaction**

Le flux de chaleur  $\phi$  représente la quantité de chaleur transmise sur une surface S par unité de temps. Dans le cas d'une réaction chimique en l'occurrence l'estérification, il correspond donc à la chaleur dégagée par la réaction par unité de temps sur la surface du réacteur.

La chaleur massique  $C_p$  est la quantité de chaleur nécessaire pour accroître la température d'un degré Celsius sur une unité de masse de 1kg.

La quantité de chaleur  $\phi$  dégagée par la réaction est ainsi formulée :

$$\varphi = \varphi_{alcool} + \varphi_{huile}$$

$$\varphi_{alcool} = \frac{m_{alc}}{T} * C_{p_{alc}} * \Delta T_{alc}$$

Avec  $m_{alc}$ , la masse d'alcool en kg

$C_{p_{alc}}$ , la chaleur massique de l'alcool en W/kg/K

T, le temps de réaction est de 1h

$\Delta T_{alc}$ , la différence de température entre

$$\varphi_{huile} = \frac{m_{hl}}{T} * C_{p_{hl}} * \Delta T_{hl}$$

Avec  $m_{hl}$ , la masse d'huile en kg

$C_{p_{hl}}$ , la chaleur massique de l'huile en W/kg/K

T, le temps de réaction est de 1h

$\Delta T_{hl}$ , l'élévation de température de l'huile pour atteindre le point d'estérification

Le tableau suivant donne les résultats du calcul de la chaleur dégagée par la réaction.

**Tableau 2: Chaleur dégagée par la réaction de transestérification**

		V (l)	M (kg)	Cp (J/kg.K)	Te (°C)	Tr (°C)	ΔT	φ en W
Alcool	Méthanol	15	11.85	2510	30	60	30	247.86
	Ethanol	21	16.61	2840	30	60	30	393.10
Huile végétale		60	54	1800	30	60	30	810.00
<b>Méthanol+Huile</b>								<b>1057.86</b>
<b>Ethanol+Huile</b>								<b>1203.10</b>

○ **Chaleur générée par le chauffage du biodiesel**

$$\varphi_{biodiesel} = \frac{m_{bio}}{T} * C_{p_{bio}} * \Delta T_{bio}$$

Avec  $m_{bio}$ , la masse de biodiesel en kg

$C_{p_{bio}}$ , la chaleur massique du biodiesel en W/kg/K

T, le temps de séchage est de 1h

$\Delta T_{alc}$ , l'élévation de température du biodiesel

Les caractéristiques physico chimiques du biodiesel utilisées (la masse volumique  $\rho$  du

biodiesel à 90°C ainsi que sa chaleur massique Cp) ont été données par l'institut de chimie de l'université de Silésie. [11]

Le tableau suivant donne les résultats du calcul de la chaleur dégagée par le séchage du biodiesel.

**Tableau 3: Chaleur dégagée par le séchage du biodiesel**

	V (l)	P (Kg/m3)	m (kg)	Cp (J/kg/K)	Te (°C)	Ts (°C)	ΔT	Φ (W)
<b>Biodiesel</b>	60	829	49.74	2166	30	90	60	<b>1795.61</b>

Des tableaux 5 et 6 nous nous rendons compte que le séchage du biodiesel dégage plus de chaleur que la réaction.

Nous considérerons donc la quantité de chaleur dégagée pendant le séchage du biodiesel pour la détermination de l'épaisseur du réacteur soit **1796W**.

#### ○ Epaisseur du réacteur

Le réacteur est en acier inoxydable. Nous lui fixons une épaisseur de **5 mm** et nous calculons l'épaisseur d'isolation e nécessaire. L'optimisation économique a permis de choisir l'épaisseur optimale d'isolant. L'isolant employé est le polyuréthane pour son efficacité d'isolation et sa mise en œuvre facile.

Yves Jeannot dans son livre « Transfert thermique » indique la démarche de détermination de l'épaisseur d'une paroi ou d'un isolant. (10)

$$\varphi_p = \frac{T_1 - T_2}{R},$$

R étant la résistance

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * \lambda_1 * L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * \lambda_2 * L}$$

Avec :

$\varphi_p$ , le flux de chaleur perdu

$\lambda_1$ , le coefficient de conductivité thermique de l'acier inoxydable

$\lambda_2$ , le coefficient de conductivité thermique du polyuréthane

L, la longueur du cylindre

$r_1$ , le rayon intérieur du réacteur

$r_2$ , le rayon extérieur du réacteur ou intérieur de l'isolant

$r_3$ , le rayon extérieur de l'isolant

$$r_3 = r_2 + e$$

$$\varphi_p = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi\lambda_2 L}} \quad \text{ou} \quad \varphi_p = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda_1 L} + \frac{\ln\left(1 + \frac{e}{r_2}\right)}{2\pi\lambda_2 L}}$$

De cette équation, l'on tire :

$$e = r_2 * (\exp(X) - 1)$$

avec :

$$X = \frac{2\pi\lambda_1\lambda_2 L(T_1 - T_2) - \varphi_p\lambda_2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\varphi_p\lambda_1}$$

L'optimisation consiste à choisir l'épaisseur optimale d'isolant correspondant au flux de chaleur et au coût optimum.

Dans la formule précédente, le flux perdu et l'épaisseur de l'isolant sont des variables. Pour pouvoir choisir l'épaisseur optimale de l'isolant, nous faisons une petite simulation entre les variables flux perdu et épaisseur d'isolant et les variables coût de l'isolant et épaisseur de l'isolant.

Le Comptoir Commercial Méditerranéen (CCM) (9) donne le prix TTC en Euros de la mousse de polyuréthane, type Bultex, densité de 35Kg/m<sup>3</sup>. Pour la longueur et la largeur de l'isolant de notre réacteur, le prix suit une loi linéaire en fonction de l'épaisseur :

$$P = 5.32 * e$$

Les données du problème ainsi que les résultats de la simulation sont comme suit :

**Tableau 4: Optimisation de l'épaisseur e de l'isolant**

$\phi$	1796
T1(°C)	90
T2(°C)	30
r1 (m)	0.225
r2 (m)	0.23
L(m)	0.56
$\lambda 1(W/m/°C)$	15
$\lambda 2(W/m/°C)$	0.03

% $\phi$	$\Phi_p$	X	e (m)	e (cm)	Prix TTC en Euros
0.5	8.98	0.7052	0.2356	23.56	125.34
1	17.96	0.3526	0.0972	9.72	51.73
2	35.92	0.1763	0.0443	4.43	23.59
3	53.88	0.1175	0.0287	2.87	15.26
4	71.84	0.0881	0.0212	2.12	11.27
<b>4.2</b>	<b>75.432</b>	<b>0.0839</b>	<b>0.0201</b>	<b>2.01</b>	<b>10.71</b>
5	89.8	0.0705	0.0168	1.68	8.94
6	107.76	0.0587	0.0139	1.39	7.40
<b>6.9</b>	<b>123.924</b>	<b>0.0511</b>	<b>0.0120</b>	<b>1.20</b>	<b>6.41</b>
10	179.6	0.0352	0.0082	0.82	4.39
20	359.2	0.0176	0.0041	0.41	2.17
30	538.8	0.0117	0.0027	0.27	1.44
50	898	0.0070	0.0016	0.16	0.86

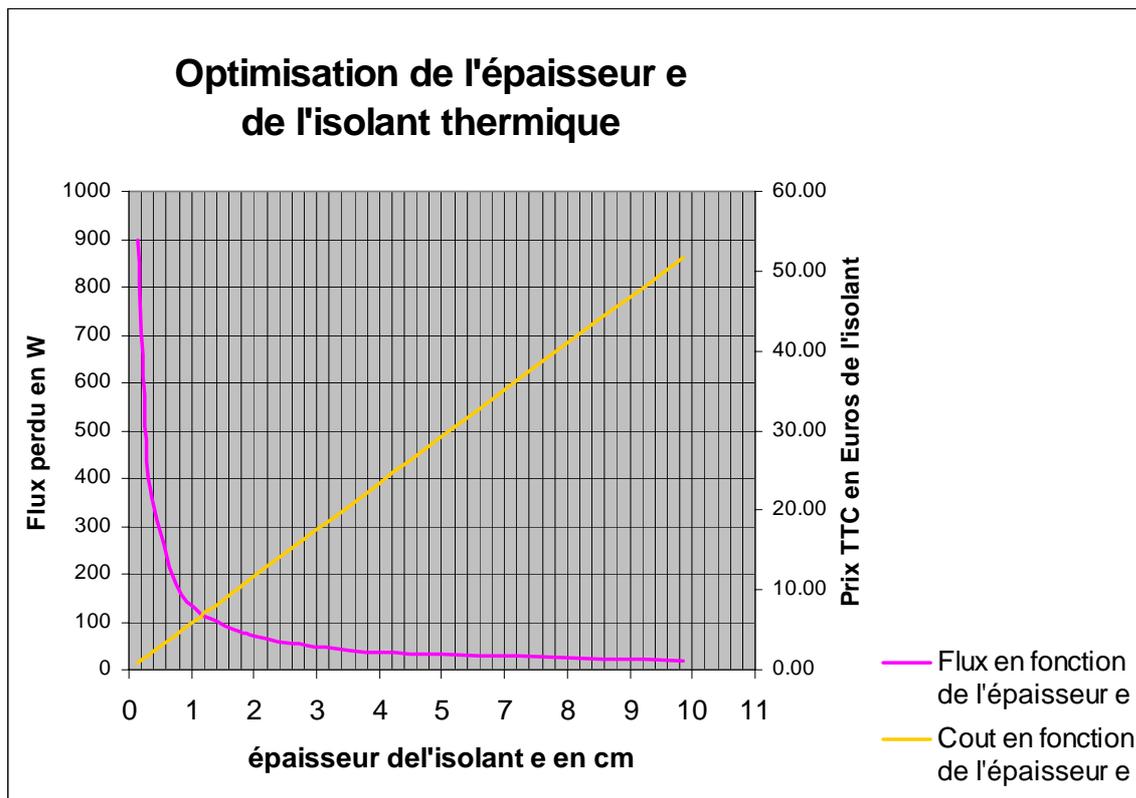


Figure 6: Optimisation de l'épaisseur e de l'isolant thermique

La détermination optimale de l'épaisseur de l'isolant a pris en compte deux éléments que sont

la quantité de flux de chaleur perdu et le coût. Elle nous donne une épaisseur de 1,2cm soit 12mm pour un flux de chaleur perdu de 6,9% environ soit 124W pour un coût de 6,41 Euros. Toutefois tenant compte des paramètres de disponibilité en épaisseur et de mise en œuvre, nous prendrons une épaisseur de **2cm de polyuréthane** pour l'isolation du réacteur, ceci avec moins de flux perdu soit 75W (4.2% de la chaleur dégagée par le chauffage) mais avec un coût plus élevé de 10,71Euros. D'où un gain d'énergie de 49W, pour un surplus de coût de 4.3Euros.

## **Annexe VIII: Cahier de Charges**

### **1- Objet :**

Le présent document a pour objet de décrire les caractéristiques de :

Un réacteur discontinu d'estérification à catalyse homogène pour la production de 60 litres de biodiesel

### **2- Objectifs :**

#### ***2-1 Objectifs de délais :***

- Réponses fournisseurs : Dans les plus brefs délais, c'est-à-dire 2 à 4 semaines après l'envoi du cahier de charge
- Choix fournisseur : Immédiatement après la réponse des fournisseurs. C'est sur la base du modèle et du devis du réacteur et de l'installation souhaitée qu'il sera choisi le fournisseur du matériel.

#### ***2-2 Objectifs de productivité :***

- Le LBEB, le Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie) compte installer un réacteur discontinu d'estérification à catalyse homogène avec tout l'appareillage amont et aval nécessaire pour la production effective de 60 litres de biodiesel.

### **3- Conditions d'exploitation :**

Les conditions d'exploitation sont les suivantes :

- Nombre de jours travaillés par semaine : 5
- Nombre de postes par jour : 1
- Nombre d'heures travaillées par poste : 5
- Nombre de jour travaillés par an : 240

La conduite des installations est assurée par :

Dr Joël BLIN et Dr Yao AZOUMAH, Chercheurs en biomasse énergie et en génie énergétique au LBEB du 2iE

#### **4- Conditions de maintenance :**

Le 2iE dispose d'une organisation de maintenance basée sur la mise en place de contrats auprès d'entreprises spécialisées, et intervenant dans les domaines du curatif et du préventif.

Le fournisseur indiquera dans son offre les conditions techniques, organisationnelles et commerciales de mise en place d'un contrat de maintenance.

Il est prévu une fois par semaine la maintenance du système.

#### **5- Energies disponibles :**

- Electricité
- Eau : L'eau est acheminée au laboratoire et y est utilisée au moyen de robinets.

#### **6- Caractéristiques techniques :**

##### ***6-1 Caractéristiques générales :***

- Réacteur batch d'estérification à catalyse homogène
- Catalyseurs basique ou acide
- Possibilité de l'utiliser aussi bien avec le méthanol que l'éthanol
- Capacité de production d'environ 60l de biodiesel

##### ***6-2 Différentes opérations***

L'équipement recherché a pour objectif la production du biodiesel encore appelé ester d'huiles végétales. L'avantage des esters d'huiles végétales est qu'ils peuvent se substituer au gasoil sans aucun problème pour le moteur. Ceci se justifie du fait que le biodiesel et le gasoil ont des caractéristiques physico-chimiques similaires. La réaction de transestérification entre l'huile et l'alcool en présence d'un catalyseur acide ou basique (la soude le plus souvent) génère un ester et de la glycérine. La phase de décantation servira à séparer ces produits obtenus. Les esters sont ensuite lavés, séchés et filtrés pour être débarrassés des restes de glycérine, de l'excès d'alcool et de catalyseur. Le carburant « biodiesel » ou « diester » est ainsi prêt à être utilisé.

Les étapes de transestérification, de décantation et de lavage sont effectuées dans un unique réacteur. En plus du réacteur d'estérification, le cœur de la production, il ne doit pas être omis l'appareillage amont et aval nécessaire pour une production efficiente. Voir ci-dessus :

1 - Huile dans le réacteur d'estérification équipé d'un agitateur à une température de 60°C à la

pression atmosphérique

2 - Mélange alcool + catalyseur préchauffé dans le réservoir à alcool et homogénéisé par un agitateur

3 - Ajout de la solution alcool + catalyseur dans le réacteur d'estérification

4 - Temps de séjour pour atteindre l'équilibre thermodynamique de la réaction d'estérification (réactifs huile et alcool ; produits biodiesel et glycérine) est d'environ 1h environ pour un ratio molaire alcool/huile de 1/6.

5 - Séparation des esters et de la glycérine dans le réacteur d'estérification ; la glycérine sera évacuée en bas du réacteur par une vanne. Le réacteur est équipé d'un système qui permet de suivre visuellement l'évolution de la limite entre les deux phases

6 - Lavage à l'eau de l'ester pour éliminer les sels et la glycérine résiduelle dans le réacteur d'estérification

7 - Séchage à 90°C sous agitation pour éliminer les traces de méthanol et d'eau encore contenues dans l'ester dans le réacteur d'estérification

8 - Filtration sur filtre de 10 microns

9 - Obtention d'un biodiesel ou un ester méthylique ou éthylique d'huile végétale dont les rendements massiques par rapport à l'huile varient de 98,5 à 99,4%.



- Le réacteur d'estérification

- Volume de 100l (Capacité en huile de 60 l, Capacité utile maximale d'alcool de 21l, Capacité utile du réacteur de 81l)
- Réacteur cylindrique en acier inoxydable, conique dans la partie basse pour permettre de transférer par gravité tous les produits et sous-produits dans des bidons de 100 litres et l'ester dans un container de 80litres
- Résistance thermique pour le chauffage du réacteur avec système d'automatisation (sonde) pour une température de consigne dont la plage est comprise entre 45 et 100°C :  
Température dans le réacteur pendant la réaction d'estérification est de 60°C,  
Température dans le réacteur pendant la phase de séchage du biodiesel est de 90°C
- Agitateur à hélices de 150rpm, moteur électrique
- Indicateur en verre du niveau de la décantation sur toute la longueur du réacteur, équipé de deux vannes a chaque extrémité qui sont fermées lors de l'étape d'estérification et seulement ouverte lors de la décantation
- Couverture du réacteur démontable plus alimentation en eau à l'aide d'une douche pour lavage
- Vanne à la sortie
- Condenseur de la phase vapeur de l'alcool
- Pompe à main au niveau du bidon à huile pour ravitailler le réacteur en huile

- Système de filtration

- Un container de 80 litres sur lequel est disposé un filtre (filtration à 10 microns) permettant de filtrer les esters qui coule par gravité depuis le réacteur d'estérification.

- Système de contrôle

- Indicateur de niveau du décantât
- Vannes d'entrée et de sortie
- Thermocouple dans le réservoir d'alcool et le réacteur d'estérification

- Support métallique de l'installation

L'ensemble de l'installation devra être maintenu sur un support métallique.

Idéalement la vanne de sortie du réacteur d'estérification devra être située a 90 cm du sol et

l'installation ne devra pas dépasser 180 cm de hauteur.

#### **6-5 Contraintes marques matériels :**

*Conformité aux décrets et normes :* Les équipements et installations seront conformes à toutes les dispositions légales en vigueur à la date d'entrée en vigueur des contrats d'achats. A la livraison, le fournisseur remettra au LBEB du 2iE, les certificats de conformité aux règlements.

#### **7- Conditions de formation :**

Compte tenu de la nature du projet, la formation du personnel opérateur sera directement assurée par le LBEB du 2iE, toutefois, le fournisseur transmettra aux opérateurs, durant la période d'essais les informations nécessaires à la bonne conduite des installations.

Le fournisseur assurera une formation à la maintenance, notamment en ce qui concerne le préventif courant et le dépannage.

#### **8- Conditions de garantie :**

##### **8-1 : *Objet de la garantie :***

Le fournisseur garantit au LBEB du 2iE une fourniture conforme aux exigences techniques et en particulier :

- Conservation des caractéristiques.
- Absence de tout vice provenant d'un défaut apparent ou caché pouvant compromettre les performances et la durée de vie attendue.
- Absence de toute erreur de conception, de fabrication, de construction ou de montage.

A ce titre il aura à sa charge tous les frais découlant de son obligation de garantie. La garantie ne s'applique pas pour les incidents trouvant leur origine dans une mauvaise utilisation ou des négligences dans l'application du plan d'exploitation de l'équipement établi par le fournisseur, de même pour les pièces d'usures.

##### **8-2 : *Durée de la garantie :***

- Point de départ : La réception
- Durée : 1 an. En option il sera proposé une durée de 2 ans.

Cette limitation de durée ne s'applique pas à la garantie des vices cachés.

### **8-3 : Obligations pendant le délai de garantie :**

- En cas d'anomalie notifiée par le LBEB du 2iE, le fournisseur exécutera toutes mises au point, réglages ou modifications reconnus nécessaires et remplacera toutes pièces ou ensemble de pièces qui seraient reconnus défectueux.
- Compte tenu des exigences de l'exploitation, la mise en œuvre de mesures provisoires peut s'avérer nécessaire. Dans ce cas, le fournisseur, devra intervenir sans délai, notamment si la sécurité des personnes est en cause.
- En cas d'apparition d'anomalies répétables, le fournisseur devra procéder aux modifications de conception ou fabrication à l'origine de l'anomalie. Les éléments similaires faisant partie de la fourniture devront également être remplacés ou modifiés.

Si après plusieurs remplacements successifs d'éléments défectueux, les anomalies subsistaient, le LBEB du 2iE pourra exiger la reprise de la fourniture avec remboursement des sommes perçues par le fournisseur.

### **8-4 : Fin de garantie :**

- La fin de la période de garantie interviendra à l'issue de la durée prévue, dans la mesure où il a été remédié de façon définitive aux anomalies constatées.

### **8-5 : Pièces de rechange :**

- La garantie s'applique également aux pièces et sous-ensemble qui seraient remplacés pendant la période de garantie.
- Le délai de garantie de la pièce de rechange débute à la mise en exploitation de celle-ci.

## **9- Documentation technique :**

### **9-1 : Généralités :**

- Le fournisseur est tenu de fournir l'ensemble des plans, schémas et documents nécessaires à l'exploitation industrielle de la fourniture.

- Le fournisseur est tenu de vérifier les indications et informations portées sur les documents transmis par le LBEB du 2iE, et de signaler par écrit toute anomalie, sous peine d'en subir seul toutes les conséquences.

**9-2 : Envoi des documents :**

Tous les courriers et documents techniques sont à adresser à :

**Dr. Joël BLIN**

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

Laboratoire Biomasse Energie Biocarburant (LBEB)

UTER Génie Energétique et Industriel (GEI),

2iE/CIRAD

Rue de la Science, 01 BP 594, Ouagadougou 01, Burkina Faso

Tel : (226) 50 49 28 62/ 50 49 28 95

Cel : (226) 76 16 75 59

Fax : (226) 50 49 28 01/ 50 49 28 07

Courriel : joel.blin@cirad.fr

[www.2ie-edu.org/www.cirad.fr](http://www.2ie-edu.org/www.cirad.fr)

**9-3 : Fourniture de plans et documents :**

- En cours de réalisation du projet, tous les plans et documents seront transmis au LBEB du 2iE pour d'éventuels commentaires. En l'absence de réponse dans un délai de 15 jours ceux-ci seront considérés comme n'appelant pas de commentaires.
  - Les notes de calcul justificatives
  - Les plans d'ensembles et sous-ensembles permettant la compréhension de la conception de l'équipement et le suivi
  - La liste des pièces de rechange et d'usure
  - Les notices préliminaires de fonctionnement, de montage et d'entretien.
  - Le manuel d'exploitation.
  - Le plan de maintenance.
  - L'ensemble des plans et schémas

#### **9-4 : Manuel d'exploitation et de maintenance :**

##### *9-4-1 Manuel d'exploitation :*

- Fonctions et caractéristiques.
- Capacités des équipements.
- Procédure de mise en et hors service.
- Notice générale de fonctionnement.
- Notice de sécurité.

##### *9-4-2 Manuel de maintenance :*

- Caractéristiques et performances.
- Nomenclature des pièces
- La liste des pièces d'usure et leur durée de vie prévisionnelle.
- Modes opératoires d'intervention.

#### **10- Conditions de livraison :**

- Toutes les expéditions doivent faire l'objet d'un bordereau d'expédition en 2 exemplaires, l'un adressé par la poste le jour même, l'autre accompagnant le matériel. Le bordereau devra impérativement préciser le numéro de la commande ou du contrat ainsi que la nomenclature complète de la livraison.
- Lieu de livraison : Site de Kamboinsé du 2iE

#### **11- Pièces d'usure :**

- Ces pièces sont celles qui subissent une usure prévisible du fait de l'exploitation de la fourniture.
- Le fournisseur établira, dans un délai compatible avec leur approvisionnement, la liste de ces pièces en mentionnant :
  - Désignation.
  - Prix
  - Délai d'approvisionnement
  - Durée de vie

#### **12- Conditions d'installations sur le site :**

***12-1 : Livraison :***

- Elle sera effective lorsque l'ensemble de la fourniture aura été livré et amené à pied d'œuvre.

***12-2 : Fin de montage :***

- Elle sera effective lorsque l'ensemble de la fourniture sera monté, branchements réalisés, et prêt pour la mise en marche.

**13- Contenu de l'offre :**

L'offre du fournisseur sera accompagnée de l'ensemble des documents techniques permettant son appréciation, et notamment :

- Plan d'ensemble de l'installation
- Description technique détaillée.
- Listes prévisionnelles des pièces de rechange et d'usures
- Conditions techniques de sécurité et de maintenance

Les prix seront décomposés comme suit :

- Prix des détails du matériel
- Devis global de le l'équipement
- Conditions et frais de livraison

## Annexe IX: Industrie des réacteurs

### 1. Fabricants et fournisseurs

Dix sociétés ont été identifiées. Leurs spécificités et leur contact ont été mentionnés ci-dessous.

#### ○ *Chaudronneries locales*

- EERI-BF : Elle conçoit et fabrique des équipements industriels.
- SRC : La SRC, la Société de Recherche et de Conception est une société de mécanique générale, orientée dans la recherche, la conception et la réalisation des équipements pour les différents secteurs d'activités. Elle a son actifs plusieurs équipements fonctionnant à l'huile végétale de Jatropha.

Contact : 01 BP 3126 Ouagadougou 01 Burkina Faso

Tel./+226 50 34 36 60

Email: srcko@hotmail.com

srcko@fasonet.bf

#### ○ *L'entreprise TECHNIP*

Elle a beaucoup travaillé dans le domaine de la technologie des réacteurs à catalyse hétérogène pour la production du biodiesel. Sur demande, Technip nous a confirmé par mail qu'elle construisait uniquement des unités industrielles de capacités de production supérieures à 100 000 t/an.

Contact :

#### **Technip**

*Tour Technip*

*6-8 allée de l'Arche*

*92973 Paris La Défense Cedex*

*France*

*Phone : +33 (0)1 47 78 21 21*

*Fax : +33 (0)1 47 78 33 40*

*www.technip.com*

*Biodiesel*

*Gilles QUEINNEC*

*Phone : +33 (0)1 47 78 53 76*

*Email : gqueinnec@technip.com*

○ ***L'entreprise AXENS***

Cette société s'occupe beaucoup plus de la mise au point des catalyseurs et notamment ceux utilisés pour la réaction trans-estérification de la production du biodiesel. Elle nous a signifié qu'elle n'emploie que la catalyse hétérogène. Dans le domaine du biodiesel, leur offre débute à une capacité de 50 000 t/an soit 6.25 t/h.

Contact :

Email : [catalysts@axens.net](mailto:catalysts@axens.net)

[www.axens.net](http://www.axens.net)

[Michel.Bloch@axens.net](mailto:Michel.Bloch@axens.net)

○ ***L'organisme IFP « Innovation Energie Environnement »***

Cet organisme public reconnu internationalement fait de la recherche et de la formation dans le domaine des énergies du transport. Il a beaucoup œuvré à l'optimisation des technologies de production du biodiesel en mettant au point la technologie Esterfip-H<sup>TM</sup> qui est commercialisée par Axens. Ceci concerne les réacteurs d'estérification à catalyse hétérogène.

Contacts :

*IFP (siège social)*

*1 et 4, avenue de Bois-Préau-92852 Rueil-Malmaison Cedex France*

*Tel : +33 1 47 52 70 00*

*[www.ifp.fr](http://www.ifp.fr)*

○ ***GREEN FUELS***

Ils ont mis au point un réacteur batch d'estérification à catalyse homogène (FuelPod2) pouvant produire 50 litres de biodiesel. Voir image ci-après.

Contact :

*Tel : 0845 603 93387*

*[www.greenfuels.co.uk](http://www.greenfuels.co.uk)*

○ ***STIMEL***

Cette société fabrique et distribue des réacteurs d'estérification pour la production du biodiesel.

Contact : [www.presseahuile](http://www.presseahuile)

○ **CEDS**

CEDS est une société internationale importatrice exclusive des produits STIMEL et GREENFUELS. C'est eux qui nous ont envoyé les designs des modèles de réacteurs FUELPOD (FP) et FUELMEISTER ainsi que les devis y afférant : Fuelpod 2 / 50 Litres à 3600 € HT, FP 2 / 100 Litres à 4700 € HT.

Contact

mail:cedsint@yahoo.fr

Tél: 06 07 71 31 57 Fax: 05 46 32 26 96

○ **ENERGEA**

Cette société met au point des réacteurs de trans-estérification à catalyse hétérogène (procédés continus).

Contact :

Tel.+43224326960

Fax+4322432696040

mail@energea.at

http://www.energea.at

○ **BIOFUL Systems**

Ils offrent les équipements des procédés de production du biodiesel.

Contact :

General enquiries: *info@biofuelsystems.com*

Consultancy: *consultancy@biofuelsystems.com*

Biodiesel additives: *wintron@biofuelsystems.com*

By Post:

Biofuel Systems Group Limited **8 Leighton Road**

Neston, Cheshire

ENGLAND, CH64 3SD

○ ***Société DE DIETRICK à Niederbronn-les Bains en Alsace***

Elle est une grande société basée en Allemagne. Spécialisée dans la construction de matériel en acier et acier inox, Dietrich construit les réacteurs.

Contact :

21 Rue De Bitche, Niederbronn Les Bains, Bas-Rhin 67110

tel: (03) 8880 2800

<http://www.ddt.dedietrich.com>

## 2 Devis

Tableau de prix des processeurs de biodiesel de la société Green Fuels :



**THE GREEN FUELS RANGE OF PROCESSORS** green fuels

Description	Model No/Part No	Batch Size	Capacity/ 12 hours	Price
Fuel Pod	FuelPod 40 / 0400	40 litres	40 litres	£995.00
Fuel Pod 2	FuelPod2 50 / 0402	50 litres	50 litres	£2,500.00
FuelMeister	150LE / 0150	150 litres	150 litres	£2,800.00
	300LE / 0300	150 litres	300 litres	£3,500.00
	450LE / 0450	150 litres	450 litres	£4,200.00
	600LE / 0600	150 litres	600 litres	£4,800.00
Optional Extra to Automate Chemical Dosing				£1,500.00
FuelMeister Auto	300 Auto System	150 litres	300 litres	£7,275.00
	600 Auto System	150 litres	600 litres	£8,470.00
	1000 Auto System	150 litres	1050 litres	£9,920.00
	2000 Auto System (2000 Inc Manual GS)	150 litres	2100 litres	£24,500.00
FuelMatic	FuelMatic Single Semi FuelMatic Twin Semi	250-500 litres	6000-8000 litres 12-16,000 litres (per 24 hour day)	EPOA
	FuelMatic Single Auto FuelMatic Twin Auto	250-500 Litres	6000-8000 litres 12-16,000 litres (per 24 hour day)	
FuelSonic	FuelSonic Auto	Continuous Flow	From 48,000 (per 24 hour day)	
Upgrades	Part No			Price
Automatic methanol and methylate dosing	0462			£1,500.00
Automatic methanol & methylate dosing (Other system upgrade)	0462 + 0463			£2,750.00
Glycerine separator	0230			£5,900.00
Auto glycerine separa- tor (Recommended)	0232			£7,700.00
1400 litres per day purification column	0244			£3,250.00
2800 litres per day twin purification column	0246			£5,250.00
10800 litres per day purification column, heated buffer, controls	0240			£10,750.00
21600 litres per day purification column, c/w heated buffer, controls	0242			£18,500.00
All prices are ex. works and excluding V.A.T. All orders subject to our conditions of sale. Registered in England and Wales: 4755217 See our processors working: Demonstrations held every other Wednesday Contact us to book your place (Limited places available)				

Price List

www.greenfuels.co.uk

Green Fuels Ltd, Green Fuels House, Unit 21, Oldends Industrial Estate, Stonehouse, GL10 3RQ Tel: 0845 603 9338

## **RESUME**

Le biodiesel est obtenu à travers la réaction d'estérification des huiles végétales en présence d'alcool. Pour sa production, deux grands types de procédés existent. Ce sont les procédés à catalyse homogène et les procédés à catalyse hétérogène. Chaque procédé peut fonctionner en discontinu ou en continu.

Du fait de sa souplesse et simplicité d'utilisation, de sa capacité, le réacteur d'estérification discontinu à catalyse homogène à travers le design proposé dans le cahier de charge a été adopté pour le LBEB.

Les biocarburants offrent de réelles voies de développement à nos pays.

## **MOTS CLES**

Biodiesel

Catalyse homogène

Catalyse hétérogène

Cahier de charges

Réacteur d'estérification

## **SUMMARY**

Biodiesel is obtained through the reaction of esterification of oil vegetable in presence of alcohol. For its production, two types of processes exist. They are the process with homogeneous catalysis and the process with heterogeneous catalysis. Each process can work in a single batch or monstop production.

Because of its flexibility, its ease of use, its capacity, the batch reactor of esterification in homogeneous catalysis as described in "design of batch reactor in homogeneous catalysis for LBEB" was adopted for the LBEB.

Biofuels offer viable option for development in our countries.

## **KEY WORDS**

Biodiesel

Homogeneous catalysis

Heterogeneous catalysis

Reactor of esterification