

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : .....TECHNOLOGIE.....

Département : .....GENIE DES PROCEDES.....

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : .GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie Chimique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Contribution à l'Etude de Conception d'une Unité de  
Production de Biodiesel à Partir des Huiles de Cuisson  
Usagées : Calcul des Bilans de Matière Assisté par  
Simulation**

Présenté par : *CHEMAM Serine*  
*KAHILI Malek*

Encadrant : *FERKOUS Hamza* MCA *Université Badji Mokhtar - Annaba*

### Jury de Soutenance :

KHERRAT Rochdi	Professeur	Université de Annaba	Président
FERKOUS Hamza	MCA	Université de Annaba	Encadrant
SAMAR M El Hadi	Professeur	Université de Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

## Résumé

Le biodiesel est un carburant alternatif qui provient d'une source de lipides renouvelables. Dans ce projet, on choisit les huiles de cuisson usagées (WCO) comme matière première, en soutenant les objectifs de production d'énergie renouvelable. Afin de prévenir la saponification, il est crucial de prétraiter WCO pour réduire sa teneur en acides gras libres, obtenu par estérification. Le procédé de production se divise en deux unités principales : une unité de prétraitement utilisant un catalyseur acide et une unité principale de transestérification utilisant un catalyseur alcalin. Les bilans de matières ont été calculés, avec un taux de production de biodiesel de 10 000 tonnes par an, atteignant une conversion totale de 98% et une pureté de biodiesel de 97% pour satisfaire les normes de l'ASTM. En outre, le processus génère du glycérol comme un sous-produit précieux, atteignant une pureté de 94%. En recyclant le méthanol, on peut réduire le besoin en méthanol frais à environ 70% de l'exigence initiale.

### Mots clés :

Biodiésel, huile de cuisson, Aspen HYSYS, transestérification, estérification

**Abstract:**

Biodiesel is an alternative fuel derived from a renewable lipid feedstock. In this project, waste cooking oil (WCO) is selected as the feedstock, supported with the goals of renewable energy generation. Using WCO requires a crucial pre-treatment step to lower its free fatty acid content to prevent saponification, achieved through esterification. The production process is divided into two primary units: a pre-treatment unit using an acidic catalyst and the main transesterification unit using an alkali catalyst. Material balances were calculated, with a biodiesel production rate of 10,000 tonnes per year, achieving total conversion of 98% and a biodiesel purity of 97% to satisfy the ASTM standards. Additionally, the process generates glycerol as a valuable byproduct, achieving a purity of 94%. The recycling of methanol reduces the need for fresh methanol to about 70% of the initial requirement

**Keywords:**

Biodiesel, Waste Cooking oil, Aspen HYSYS, Transtérification, estérification

**المخلص:**

يعد الديزل الحيوي وقودًا بديلاً عن الوقود الأحفوري، حيث يمكن إنتاجه من مصادر الدهون المتجددة. في هذا المشروع تم اختيار زيت الطبخ المستخدم كمصدر للدهون الليبديية وذلك للمساهمة في الوصول إلى اقتصاد دائري. يتطلب استخدام زيت الطبخ المستخدم معالجة مسبقة لتخفيض منسوب الدهون الحمضية الحرة فيه وذلك لتفادي حصول تفاعل الصبونة. يمكن تقسيم عملية الإنتاج إلى وحدتين أساسيتين: وحدة المعالجة القبلية باستخدام حقاز حمضي، ووحدة التحويل الانتقالي الاستري باستخدام حفاز قاعدي. تضمنت الدراسة حساب الكتل والطاقة المطلوبة لإنتاج 10000 طن من الديزل الحيوي سنويًا، بمعدل تحويل كلي بلغ 98 %، وقد نفذت الحسابات للوصول إلى نقاوة 97 % لتحقيق متطلبات الجمعية الأمريكية لاختبار المواد. بالإضافة إلى ذلك فإن الناتج الثانوي لتفاعل الإنتاج هو الجليسيرول والذي يعتبر مادةً ثمينة وصلت نقاوتها المحسوبة إلى 94 %. كما تم تخفيض كمية الميثانول المطلوبة للتفاعل بنسبة 70 % عن طريق إعادة تدوير الفائض غير المتفاعل.

**الكلمات الرئيسية:**

الديزل الحيوي... زيت الطبخ... أسبن هيسيس... المعاملات... الاسترة.

**Remerciements**

*On tient tout d'abord à remercier ALLAH, le tout puissant qui nous avoir donne a force, la patience, le courage, la volonté pour affronter tous les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin d'études et d'accomplir ce modeste travail.*

*On tient également à exprimer une reconnaissance aux membre de jury : Professeur SAMAR M El Hadi et Professeur KHARRAT Rochdi.*

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr FERKOUS HAMZA.*

*On le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnelle, pour sa patience, sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce Travail.*

## Dédicace

Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère

Est la plus belle chose de ma vie Qu'elle m'a toujours accordé en témoignage de ma reconnaissance envers sa confiance, ses sacrifices et sa tendresse et d'amour pour son soutien tout le long de ma vie scolaire. Que dieu te protège

A Mon chère père,

Qui m'a toujours soutenu et qui a fait tout possible pour m'aider. Que dieu te garde.

A ma chère sœur Rym. Source d'espoir et de motivation

A mes chères frères ( Anis & Mouhamed Reda) pour leurs soutien inestimables

Sans oublier mon binôme ( Serine ),

avec qui j'ai passé l'une des meilleures années durant et les moments de stress et de folie.

A tous membres de familles et mes amis et tous ceux que j'aime pour leurs soutien moral et encouragement.

**Malak**

## Dédicace

Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail:

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon chère père

qui m'a toujours soutenu et qui a fait tout possible pour m'aider. Que dieu te garde.

A mon chère frère Akram.

A ma chère sœur Soundous source de joie et de bonheur.

A tous les membres de la famille et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme (Malak),

merci pour la confiance que vous m'accordé et pour votre accord de réaliser ce mémoire ensemble.

*Serine*

---

## Table des matières

Liste des figures .....	11
Liste des abbreviations : .....	12
Introduction générale .....	13
1.1. Introduction.....	15
1.2. Historique.....	15
1.3. Comparaison entre diesel/biodiesel .....	16
1.4. Les caractéristiques du biodiesel : .....	17
1.4.1. La viscosité : .....	17
1.4.2. Le pouvoir calorifique : .....	17
1.4.3. Le point trouble et le point d'écoulement : .....	18
1.4.4. L'indice de cétane : .....	18
1.4.5. L'oxydation : .....	18
1.4.6. Le pouvoir lubrifiant : .....	18
1.4.7. Glycérine libre : .....	19
1.5. Les applications des biodiesel.....	20
1.5.1. Moteur diesel.....	20
1.5.2. Utilisation des biodiesels dans les moteurs diesel .....	20
1.5.3. L'efficacité énergétique .....	21
1.5.4. Les générateurs .....	21
1.6. Mélanges de Biodiesel .....	21
1.7. L'utilisation de biodiesel .....	22
1.8. Les propriétés physico-chimiques.....	23
1.8.1. Les propriétés chimiques .....	23
1.8.2. Les propriétés physiques : .....	24
1.9. La toxicité de biodiesel .....	24
1.9.1. Sécurité .....	25
1.9.2. Propriétés toxicologiques .....	25
1.10. Comparaison entre les procédés existant de biodiesel .....	25
1.11. Les limites de production (limite contrainte) .....	26
1.11.1. Limites environnementales .....	26
1.11.2. Limites humaines et économiques.....	26
1.11.3. Coût de production .....	27
1.11.4. Concurrence avec l'industrie alimentaire.....	27
1.11.5. Risques et contraintes de production à la ferme .....	27

---

<b>1.12. Les procédés de biodiesel</b> .....	27
<b>Conclusion :</b> .....	28
Problématique .....	33
2.1 Description détaillée du procédé sélectionné.....	33
2.1.1 L'unité d'estérification .....	33
2.1.2 L'unité de transestérification .....	33
2.2 . Analyse des bilans de masse et d'énergie .....	34
2.3 . Hypothèses .....	35
2.4 Conception des équipements.....	42
<b>2.4.1 Conception des principaux équipements</b> .....	<b>42</b>
<b>2.4.2 Le bilan énergétique</b> .....	<b>63</b>

---

Tableau 1.1. Comparaison de diesel/biodiesel	16
Tableau 1.2. Tableau 1.1. Propriétés physico-chimiques	18
Tableau 1.3. Données de sécurité	19
Tableau 1.4. Les mélanges de biodiesel	19
Tableau 1.5. Comparaison entre les procédés existant de biodiesel	25
Tableau 2.1 Propriétés physico-chimiques des composés employés	37
Tableau 2.2. Liste des abréviations des composants	38
Tableau 2.3. Récapitulatif des courants de matière de l'unité d'estérification (prétraitement) et de transestérification (par simulation)	42
Tableau 2.4. Récapitulatif du bilan de matière de R-102	52
Tableau 2.5. Récapitulatif du bilan de matière de S-101	54

---

**Liste des figures**

Figure II.1. Schéma du R-101	42
Figure II.2. Schéma de la colonne de distillation D-101	44
Figure II.3. Schéma de la pompe P-104	44
Figure II.4. Schéma de la pompe P-103	45
Figure II.5. Schéma du mélangeur M-101	45
Figure II.6. Schéma de l'échangeur de chaleur HE-101	46
Figure II.7. schéma de la pompe P-102	47
Figure II.8. Schéma de l'échangeur de chaleur HE-101	47
Figure II.9. Schéma de la pompe P-105	48
Figure II.10. schéma de le réacteur de transestérification R-102	48
Figure II.11. schéma de décanteur S-101	50
Figure II.12. schéma de la tour de lavage W-102	52
Figure II.13. schéma de mélangeur M-103	54
Figure II.14. schéma de la pompe P-107	55
Figure II.15. schéma de réacteur de neutralisation R-103	56
Figure II.16. schéma de décanteur S-102	57
Figure II.17. schéma de la colonne de distillation D-103	58
Figure II.18. schéma de la colonne de distillation D-104	59
Figure II.19. schéma de la pompe P-108	60
Figure II.20. schéma de mélangeur M-102	60
Figure II.21. schéma de la pompe P-106	61
Figure II.22. schéma de la séparateur X-101	61
Figure II.23. schéma de la pompe P-109	62
Figure II.24. schéma de la tour de lavage de glycerol W-101	62

**Liste des abréviations :**

**FAME:** fatty acid methyl esters

**ASTM:** American society for testing and materials

**CDF:** cumulative distribution function

**WCO:** waste cooking oil

**Pe :** point éclair

**PT :** point de trouble

**PE :** point d'écoulement

**Ic :** indice de cétane

**EMHV :** Ester Méthylique de l'huile végétale

**EEHV :** Ester Ethylique de l'huile végétale

**II :** Indice d'iode

**IP :** Indice de pyroxyde

**Pa. s :** Pascal seconde

**St :** stocke

**CSt :** centistoke cumulative distribution function

**cP :** centipoise

**p :** poise

**IA :** L'indice d'acide

**Is :** L'indice de saponification

**IE :** L'indice d'ester

## Introduction générale

L'environnement est l'espace dans lequel vivent tous les organismes vivants et non vivants (les être- humains, les animaux, les plantes, l'air, l'eau, le sol), Les problèmes environnementaux et les problèmes énergétiques sont étroitement liés, chaque production d'énergie ayant un impact sur l'environnement. Où on peut distinguer, l'effet négatif des combustibles fossiles qui est considéré comme un principal élément de génération d'énergies dans les usines. Les énormes quantités de gaz nocifs émis en permanence par les stations et les centres industriels, entraînant pollution de l'air, pollution de l'eau (les pluies acides se forment principalement à partir de ces gaz, qui affectent également les sols, les ressources d'eau ouvertes, etc.)

L'industrie et les transports évoluent constamment, ce qui entraîne une augmentation des besoins en énergie. Étant donné que les ressources actuellement utilisées (diesel et combustibles fossiles) pour la production d'énergie ne sont pas des ressources renouvelables, elles finiront tôt ou tard avec le développement et la nécessité de les consommer en permanence, pour remédier à cet obstacle, les chercheurs ont découvert une source d'énergie renouvelable appelée biodiesel.

Les propriétés du biodiesel sont similaires à celles du carburant diesel, mais le biodiesel est renouvelable et provient principalement d'huiles végétales ou de graisses animales, il est considéré comme un ami de la nature, car il est exempt de toute substance toxique et se décompose rapidement. Si on le compare aux effets négatifs du diesel, les effets du biodiesel sur la nature sont limités (peu).Le biodiesel est un carburant formé initialement par une réaction chimique appelée transestérification, où les réactifs initiaux sont : l'huile (végétale ou animale) et un alcool (méthanol ou éthanol) en présence d'un catalyseur (homogène ou hétérogène) afin d'obtenir un mélange d'esters (biodiesel) et glycérol.

Ce mémoire formé de deux chapitres suivants :

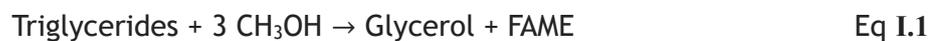
Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, qui englobe : généralités sur les biocarburants, généralités sur le biodiesel, ces utilisations, ces caractéristiques, et ces propriétés, et la réaction de transestérification.

Le deuxième chapitre est consacré aux calculs des bilans matière des différents équipements du procédé. C'est la description détaillée du procédé qui contient 2 unités, une unité d'estérification et l'autre de transestérification, considérée comme l'unité principale responsable de la production de biodiesel à partir de l'huile de cuisson par la réaction de transestérification. Nous terminons notre travail par une conclusion.



## 1.1. Introduction

Des efforts importants ont été réalisés ces dernières décennies sur la chimie des biocarburants. Parmi eux, le biodiesel a particulièrement attiré l'attention du monde entier en tant qu'alternative impressionnante au carburant diesel conventionnel (CDF). Il s'agit d'esters monoalkyliques d'acides gras à longue chaîne (FAME) dérivés d'huiles végétales et de graisses animales. Cette matière première est principalement composée d'impuretés telles que des triglycérides et des acides gras libres (FFA), des phospholipides, de l'humidité, des sédiments végétaux et des gommages à haute viscosité et à pression de vapeur extrêmement faible, elle ne peut donc pas être utilisée comme carburant idéal pour les moteurs CI [1]. Converti en FAME (ayant du carbone et une viscosité comparable au CDF) par une réaction chimiquement réversible appelée Transestérification [1, 2], il convient pour remplacer le CDF et est donc appelé biodiesel. La réaction de Transestérification est une étape cruciale Procédé de mélange pour traiter les huiles végétales (triglycérides) avec des alcools à chaîne courte. Le méthanol, en présence d'un catalyseur (acide/base), à température et temps de réaction appropriés, génère l'EMAG correspondant selon la réaction brute (1). Il est renouvelable, biodégradable, présente des caractéristiques d'émission relativement faibles, une viscosité autorisée, un point d'éclair et un indice de cétane élevé [3]



Bien qu'il soit relativement facile de synthétiser l'EMAG à partir d'huiles végétales, sa rentabilité est difficile. Les principaux inconvénients du procédé composite comprennent principalement des matières premières coûteuses, une faible efficacité d'extraction de l'huile de graines, une purification complexe du pétrole brut et des produits, des paramètres de réaction de Trans estérification élevés, une faible efficacité de séparation des produits et une perte de catalyseur homogène. Les difficultés de l'étape de purification des FAME comprennent l'utilisation de grandes quantités d'eau douce, de petites quantités de produit perdues avec l'eau et le traitement ultérieur des eaux usées.

## 1.2. Historique

L'histoire du développement du biodiesel remonte au milieu du XIXe siècle. En 1853, Patrick Duffy a découvert le biodiesel. 30 ans plus tard, Rudolf Diesel [5,6] a établi un modèle utilisant l'huile d'arachide comme carburant. Dès lors, l'intérêt de la production de biodiesel a commencé à augmenter à l'échelle mondiale. Le développement mondial du biodiesel est assez rapide, atteignant 20 millions de tonnes en 2012 [4], mais l'industrie chinoise du biodiesel commencé tard. Selon le rapport de la US Energy Information

Administration, la production de biodiesel de Chinees en 2014 était de 991000 tonnes métriques, ce qui est beaucoup plus faible que celle du Brésil et des États-Unis [7,8].

A l'heure actuelle, la demande pour les carburants liquides de transport, continue à augmenter vue les préoccupations du changement climatique, ainsi que la pollution de l'air et la destruction des écosystèmes, qui sont liés directement à la production et la combustion de pétrole [9]. Selon Saipolbarin Ramli et all [9], la notion de biodiesel est parmi les faits scientifiques trouvés dans le Coran dans le verset YASSEEN 80, qui traite du concept des sources d'énergie comme le biodiesel et qui a été démontré par les scientifiques modernes qui ont trouvés des résultats dans le domaine du biodiesel avec une interprétation liée à la notion de biodiesel trouvé dans le Coran. Cette interprétation analysera l'opinion des savants arabo-islamiques dans l'interprétation de ce verset du point de vue islamique et lexicographie arabe.

### 1.3. Comparaison entre diesel/biodiesel

Diesel	Biodiesel
<p>Un liquide inflammable qui est utilisé comme carburant pour moteurs diesel</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▫ Il est souvent fabriqué à partir de fractions de pétrole brut moins volatiles que celles utilisées dans l'essence ou plus lourdes que l'essence (Britannica, 2018)</li> <li>▫ est produit par distillation fractionnée de pétrole brut entre 200 et 350 oC (392 et 662 oF) à la pression atmosphérique, ce qui donne une combinaison de chaînes de carbone avec entre 9 et 25 atomes de carbone par molécule (Interstate Technology &amp; Regulatory Council, 2014).</li> <li>▫ Il est plus inflammable</li> <li>▫ A un point d'éclair plus a 52 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▫ est défini comme un type de carburant diesel fabriqué à partir d'esters d'acides gras à longue chaîne obtenus à partir de plantes ou d'animaux (Deborah O'Connell, 2007)</li> <li>▫ La transestérification de l'huile végétale ou de la matière grasse animale est un moyen typique de fabriquer du biodiesel (Maria del Remedio Hernández, 2010)</li> <li>▫ a une faible énergie par rapport au diesel, ce qui entraînera une augmentation du biodiesel nécessaire pour émettre la même énergie que le diesel, et en ce qui concerne la sécurité alimentaire</li> <li>▫ dans sa forme pure et non prête cause beaucoup moins de dommages que le carburant à base de pétrole</li> <li>▫ Il est moins inflammable</li> <li>▫ a un point d'éclair de plus de 130 °C</li> <li>. il issafer pour la manipulation et le stockage du biodiesel par rapport au diesel conventionnel.</li> </ul>

Tableau I.2. Comparaison de diesel/biodiesel

Fuel Property	Diesel	Biodiesel
	ASTM D975	ASTM D6751
Lower Heating value, BTU/gal	129.050	118.170
Kinematic Viscosity @40°C.,cSt	1.3-4.1	4.0-6.0
Specific Gravity @60°C.,g/cm <sup>3</sup>	0.85	0.88
Carbon, wt %	87	77
Hydrogen, wt %	13	123
Oxygen, by dif.wt %	0	11
Sulfur, ppm	500	0
Boiling Point,°C	180 to 340	315 to 350
Flash Point,°C	60 to 80	100 to 170
Cloud Point,°C	~15 to 5	~3 to 12
Cetane Number	~35 to~15	~15 to 10
Lubricity(HFRR),µm	40-50	48-65
	300-600	<300

#### 1.4. Les caractéristiques du biodiesel :

Les propriétés physicochimiques du biodiesel présentant le plus grand intérêt sont le point éclair (Pe; flash point), le point de trouble (PT; Cloud point), le point d'écoulement (PE; pour point), la viscosité cinématique, l'indice de cétane (IC), l'indice d'acide, la teneur en cendres Sulfatées, les résidus de carbone, les teneurs en eau ainsi qu'en sédiments, le glycérol libre et le glycérol total, la température limite de filtrabilité, la corrosion à la lame de cuivre, la stabilité à l'oxydation et la masse volumique[10].

##### 1.4.1. La viscosité :

Comme indice de cétane, la viscosité augmente avec le nombre de carbone et diminue avec le degré d'insaturation [11]. Une plus grande viscosité cinématique créerait des problèmes comme des dépôts dans le moteur, [12]. La transestérification favorise donc une diminution de la viscosité de huile à des valeurs généralement comprises entre 4 à 6 mm<sup>2</sup> /s. [13]

##### 1.4.2. Le pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique indique si un biodiesel est adapté à brûler dans un moteur diesel. Le pouvoir calorifique augmente avec la longueur de la chaîne carbonée [12]. En utilisant des lipides extraits de microalgues hétérotrophes, en présence de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans le méthanol. [14]

ont obtenu un biodiesel avec un pouvoir calorifique de 41MJ/kg, valeur se trouvant dans la gamme du carburant diesel (40-45 MJ/kg).

#### **1.4.3. Le point trouble et le point d'écoulement :**

Les propriétés d'écoulement à froid sont des paramètres importants lors de la production de biodiesel pour les pays nordiques comme le Canada et pourraient être évaluées par le point trouble et le point d'écoulement. La diminution de la température pourrait conduire à la formation de cristaux visibles ( $d > 0,5 \text{ pm}$ ) dans le biodiesel à une limite de température appelée point trouble [11]. La température du point trouble diminue avec la fraction molaire de composés non saturés et augmente légèrement avec la longueur de la chaîne carbonée [15]. Le point d'écoulement est défini comme la température à laquelle le biodiesel ne coule plus. Habituellement, les points de trouble et d'écoulement augmentent en fonction du rapport volumique de biodiesel dans le carburant pétro-diesel [13]. Un niveau élevé de composés polyinsaturés dans le biodiesel de microalgues pourrait être un avantage en termes de propriétés à froid pour un mélange de biodiesel microalgues / pétrodiesel dans des climats froids.

#### **1.4.4. L'indice de cétane :**

L'indice de cétane est un indicateur de qualité de rallumage d'un carburant qui augmente avec le nombre de carbone et diminue avec le nombre de liaisons de carbone insaturées [16]. Par conséquent, un biodiesel avec une insaturation élevée comme le biodiesel issu des microalgues aurait un indice de cétane plus faible que celui du biodiesel saturé. Selon nos connaissances, aucune mesure de l'indice de cétane du biodiesel des microalgues n'a été effectuée. Cependant, certaines études ont estimé l'indice de cétane de nombreuses espèces de microalgues en fonction de leur teneur en FAME et ont trouvé des valeurs variant de 39 à 54 [17], tandis que l'indice de cétane du carburant pétrodiesel se situe entre 47 et 51.

#### **1.4.5. L'oxydation :**

L'oxydation du biodiesel pourrait se produire lorsque les FAME sont en contact avec l'oxygène et sont transformés en hydrogénéperoxydes, aldéhydes, acides et autres composés oxygénés, ce qui pourrait former des dépôts dans le moteur [11]. L'oxydation du biodiesel augmente en fonction du degré d'insaturation [16]. La stabilité à l'oxydation des lipides de microalgues est un réel problème [17] qui peut être surmonté par l'ajout d'antioxydants si le mélange de biodiesel est stocké plus de quelques mois [13].

#### **1.4.6. Le pouvoir lubrifiant :**

La définition de la lubricité du diesel est influencée par sa viscosité, son acidité, sa teneur en eau et les composés soufrés [18]. Même avec des additifs, le frottement mesuré (pas d'unité déclarée) du biodiesel (0,114 et 0,117) est inférieur à celui du diesel (0,238 et 0,210) pour les températures de 25 et 60°C [11]. Par conséquent, un avantage de l'ajout de biodiesel ayant une faible teneur en soufre dans du pétro-diesel conventionnel est d'améliorer sa lubrification.

#### 1.4.7. Glycérine libre :

Le glycérol libre désigne la quantité de glycérol restant dans le biodiesel fini. Le glycérol est essentiellement insoluble dans le biodiesel, de sorte que presque tout le glycérol est facilement éliminé par décantation ou centrifugation. Le glycérol libre peut rester soit sous la forme de gouttelettes en suspension, soit sous forme de la très petite quantité dissoute dans le biodiesel. L'alcool peut agir comme co-solvant pour augmenter la solubilité du glycérol dans le biodiesel. La plupart de ce glycérol doit être éliminé pendant le processus de purification. Le carburant lavé à l'eau est généralement très faible en glycérine libre, surtout si l'eau chaude est utilisée pour le lavage.

Tableau 1.1. Propriétés physico-chimiques

Component	Molecular Formula	Molecular Weight (g/mol)	Viscosity (cP)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Boiling Point (°C)	Heat of Combustion (KJ/mole)	Heat of Vaporization (KJ/mole)	Heat of formulation (KJ/mole)
Triolein	C <sub>57</sub> H <sub>104</sub> O <sub>6</sub>	885.432	4.23	0.915 at(15°C)	237 at (18mmHg)	35099.6	N/A	-2180.60
Oleic Acid	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	282.46	28.77	0.888	358	-11.141992	67.3624	-823.50
Methanol	CH <sub>4</sub> O	32.042	0.554	0.787	64.7	726.1	37.34	-238.60
Sulfuric Acid	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.08	21	1.8302	337	N/A	56	-810.4
Potassium Hydroxide	KOH	56.105	N/A	2.044	1327	N/A	N/A	-426.85
Water	H <sub>2</sub> O	18.015	0.890	0.9970	99.974	N/A	44	-285.84
Methyl Oleate (FAME)	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	296.5	4.88 at(30°C)	0.8739 at(20°C)	218.5 at (20mmHg)	-11871.2632	84.39128 at (1 torr)	-744.79
Glycerin	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	92.09	934	1.2613	290	1655.4	61	-699.00
Phosphoric Acid	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	97.995	N/A	1.892	407	N/A	N/A	-1281.14
Potassium Phosphate	K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	212.266	N/A	2.564	N/A	N/A	N/A	-2002.88

Le biodiesel distillé tend à avoir un problème plus important avec le glycérol libre dû au report du glycérol pendant la distillation. Le carburant avec du glycérol libre excessif aura

généralement un problème avec le glycérol se déposant dans les réservoirs de stockage, créant un mélange très visqueux qui peut boucher les filtres de carburant et causer des problèmes de combustion dans le moteur [19].

Tableau 1.2.

Component	Flash Point (°C)	Boiling Point (°C)	Autoignition Temperature (°C)	Flammability Limit	
				LFL (vol%)	UFL (vol%)
Triolein	330	237 at(18mmHg)	N/A	N/A	N/A
Oleic Acid	189	358	363	N/A	N/A
Methanol	9.7	64.7	455	6	31
Sulfuric Acid	N/A	337	N/A	N/A	N/A
Potassium Hydroxide	N/A	1327	N/A	N/A	N/A
Water	N/A	99.974	N/A	N/A	N/A
Methyl Oleate (FAME)	170	218.5 at(20mmHg)	340	N/A	N/A
Glycerin	160	290	400	1.1	N/A
Phosphoric Acid	N/A	407	N/A	N/A	N/A
Potassium Phosphate	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

## 1.5. Les applications des biodiesel

### 1.5.1. Moteur diesel

Le moteur Diesel, également connu sous le nom de moteur à allumage par compression, est un moteur à combustion interne qui s'allume automatiquement lors de l'injection du carburant, en raison d'une auto-inflammation due aux hautes températures dans la chambre de combustion. Elles sont obtenues grâce à une compression élevée, ce qui permet d'atteindre une température allant de 700 à 900 °C. Des bougies de préchauffage sont fréquemment employées pour faciliter le démarrage à froid des petits moteurs en augmentant temporairement la température d'un point de la chambre de combustion. Pour les moteurs de bateaux et les moteurs fixes à fioul lourd, il est nécessaire de les chauffer à une température élevée afin de faciliter le démarrage [20].

### 1.5.2. Utilisation des biodiesels dans les moteurs diesel

Les biodiesels sont considérés comme des produits à court terme prometteurs pour remplacer les combustibles fossiles, car ils sont renouvelables, biodégradables et proviennent des ressources agricoles disponibles dans la plupart des pays producteurs. Outre

les éléments mentionnés précédemment, l'emploi des biodiesels offre de nombreux bénéfices pour le moteur.

Ils ne renferment presque aucun soufre. Les émissions de suie sont significativement réduits (0,001 % du total), ils ne contiennent aucun benzol ou d'autres composants cancérigènes polyaromatiques, ils possèdent des capacités de lubrification intéressantes et peuvent ainsi contribuer à prolonger la durée de vie du moteur. Le point d'inflammabilité du biodiesel est plus bas que celui du diesel de pétrole. [21]

Ils sont constitués d'Esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) ou d'Esters éthyliques d'huiles végétales (EEHV) à la différence du diesel de pétrole. Comme mentionné précédemment, ces Esters d'Alkyls présentent des caractéristiques similaires à celles du gazole, ce qui les rend plus avantageux par rapport aux huiles végétales. Ils ont des températures de distillation variant de 320 °C à 350 °C, ce qui les place au niveau des fractions les plus lourdes du gazole.

### **1.5.3. L'efficacité énergétique**

La performance énergétique d'un système est influencée par sa fonction. L'objectif des moteurs est de générer un mouvement (activité). On exprime l'énergie du mouvement en joule. Le rapport entre l'énergie du travail produit et l'énergie contenue dans le carburant utilisé pour le produire est connu sous le nom d'efficacité énergétique du moteur (également exprimé en joule). Les moteurs ne peuvent pas atteindre une efficacité de 100 % selon les lois de thermodynamique. Le carburant perd une partie de son énergie en chaleur sans être récupérée (à l'exception de l'hiver pour chauffer l'habitacle). Il ne faut pas confondre cette notion avec le concept de « rendement », qui correspond à la relation entre l'efficacité réelle de la machine et l'efficacité théorique maximale qu'on peut attendre d'elle dans le cylindre [22].

Le biodiesel possède le bilan énergétique le plus élevé par rapport aux autres types de carburants. Effectivement, une unité d'énergie fossile utilisée pour la production du biodiesel nécessite 4,5 unités d'énergie.

### **1.5.4. Les générateurs**

Une machine qui génère de l'électricité, qu'il s'agisse d'un générateur à courant continu ou d'un alternateur, elle convertit l'énergie mécanique transmise par le rotor en énergie électrique. Le générateur à courant continu présente des caractéristiques plus lourdes et plus onéreuses ; il nécessite des vérifications régulières mais ne requiert pas de convertisseur pour la charge des batteries. La charge et le coût de l'alternateur sont réduits, son entretien est minime, mais il nécessite un convertisseur pour la charge des batteries. [23]

## **1.6. Mélanges de Biodiesel**

On combine le biodiesel au diesel afin de former un mélange. Ce mélange est composé de biodiesel pur, aussi appelé B100, mélangé à du diesel pétrolier selon diverses concentrations (Bn). La lettre *n* fait référence au pourcentage de biodiesel compris dans le mélange. Les mélanges courants sont : [24.25.26]

Tableau 1.5. les mélanges de biodiesel

Mélange	Biodiesel pur (B100)	Diesel pétrolier
<b>B2</b>	2p. 100	98p. 100
<b>B5</b>	5p. 100	95p. 100
<b>B7</b>	7p. 100	93p. 100
<b>B10</b>	10p. 100	90p. 100
<b>B20</b>	20p. 100	80p. 100

- **B2** : 2 p. 100 de biodiesel mélangé à 98 p. 100 de diesel
- **B5** : 5 p. 100 de biodiesel mélangé à 95 p. 100 de diesel
- **B7** : 7p. 100 de biodiesel mélangé à 93 p. 100 de diesel
- **B10** : 10 p. 100 de biodiesel mélangé à 90 p. 100 de diesel
- **B20** : 20 p. 100 de biodiesel mélangé à 80 p. 100 de diesel
- **B100** : 100 p. 100 de biodiesel, sans aucune teneur en diesel

### 1.7. L'utilisation de biodiesel

Bien qu'il puisse être employé à l'état pur, le biodiesel est généralement mélangé avec le diesel dérivé du pétrole (pétrodiesel). Les mélanges de biodiesel-pétrodiesel sont identifiés par l'abréviation « Bxx », où « xx » indique le pourcentage de biodiesel dans le mélange. Ainsi, un carburant B20 contient 20 % de biodiesel et 80 % de pétrodiesel alors qu'un carburant B100 correspond au biodiesel pur. Plusieurs types de mélange sont commercialisés dont les plus fréquents sont le B2, B5, B20 et B100 [27]. La complexité et la diversité chimique du biodiesel (mélange d'esters) font en sorte qu'il doit être homologué selon plusieurs critères de qualité (par exemple, les normes ASTM D6751 en Amérique du Nord ou EN 14214 en Europe) avant d'être commercialisé. Tout biodiesel homologué à ces standards comporte une garantie de qualité minimale, entre autres pour l'indice de cétane, la viscosité et les teneurs en phosphore et en soufre. En Amérique du Nord, il existe également un programme de certification volontaire pour les producteurs et distributeurs de biodiesel, le BQ-9000. Ce programme, similaire aux programmes ISO, vise à assurer que le biodiesel produit respecte des normes de qualité préétablies au niveau de tous les maillons de la chaîne (pratiques d'entreposage, d'échantillonnage, d'évaluation, de mélange, de

distribution et de gestion du biodiesel) et donc, jusqu'à ce qu'il soit rendu dans le réservoir du consommateur [28].

## **1.8. Les propriétés physico-chimiques**

### **1.8.1. Les propriétés chimiques**

#### **a. L'indice d'acide :**

L'indice d'acide (IA) est la masse (mg) de potasse alcoolique (hydroxyde de potassium, KOH) qui sert à neutraliser l'acidité contenue dans 1 g de corps gras. C'est aussi le nombre d'acide oléique pour 100 g de substance. Il permet de connaître la quantité d'acide libre présent dans l'huile. Une huile est considérée consommable si sa teneur en acide libre est inférieure à 1 % en masse. Cette caractéristique rend compte de l'état de dégradation d'une huile dans la mesure où les acides gras libres sont des produits de dégradation et plus particulièrement D'hydrolyse des triglycérides. La qualité d'une huile est donc définie par sa quantité en acides gras libres, plus cette quantité est faible, plus l'huile est de bonne qualité [29].

#### **b. L'indice de saponification :**

L'indice de saponification (Is) est la masse (mg) de potasse (KOH) nécessaire pour neutraliser l'acidité libre et saponifier les esters d'un gramme de lipides. Cet indice est d'autant plus faible que les acides gras liés au glycérol ont un poids moléculaire plus élevé [30].

#### **c. L'indice d'ester :**

L'indice d'ester (IE) est la masse de potasse (KOH) (mg) nécessaire pour saponifier les acides gras estérifiés contenus dans 1 g de matière grasse. On le calcule par la différence entre l'indice de saponification et l'indice d'acide.

#### **d. L'indice d'iode :**

L'indice d'iode (II) est la masse en gramme d'iode [31]., nécessaire pour saturer les doubles liaisons de 100 g de lipides (matière grasse). Il permet de connaître le nombre moyen de doubles liaisons présent dans le corps gras et renseigne sur le degré d'insaturation. Plus l'indice d'iode est grand, plus le point de fusion est bas et plus l'huile est fluide.

#### **e. L'indice de peroxyde :**

L'indice de peroxyde (IP) est le nombre de microgrammes d'oxygène actif contenu dans 1 g de produit capable d'oxyder l'iodure de potassium avec libération d'iode. Cette méthode permet de mesurer les produits primaires d'oxydations tels que les peroxydes formés lors de l'oxydation lipidique [31].

#### **f. La teneur en matières insaponifiables :**

La teneur en matières insaponifiables d'un corps gras est l'ensemble des produits présents après saponification de celui-ci par un hydroxyde alcalin suivi d'une extraction par un solvant spécifique et élimination de ce dernier. Cet ensemble est formé par des constituants naturels

extraits de matières grasses tels que les stérols, les tocophérols, les alcools aliphatiques supérieurs, les pigments et les hydrocarbures naturels [32].

### **1.8.2. Les propriétés physiques :**

Les huiles sont fluides à température ambiante, riches en acides gras insaturés à bas point de fusion. Les triglycérides sont des composés polymorphes et revêtent plusieurs formes cristallines. Chaque forme cristalline a un point de fusion, une viscosité relativement élevée.

#### **a. La viscosité :**

La viscosité cinématique est déterminée en mesurant, à une température donnée, la durée de l'écoulement d'un volume connu de liquide à travers un appareil comportant un orifice (tube calibré ou tube capillaire) de dimensions normalisées et elle s'exprime en  $m^2/s$ , Stoke (St) ou centistokes (cSt). Elle dépend de la structure et de la température des huiles. Par ailleurs, la viscosité dynamique caractérise les couches de lubrifiant à frotter ou à glisser les unes sur les autres, c'est aussi le produit de la viscosité cinématique  $\nu$  par la masse volumique du fluide  $\rho$  et elle s'exprime en Pa.s (pascal. seconde) ou N.s/m<sup>2</sup> ; poise (P) et centipoise (cP). À 20 °C la viscosité de l'huile d'arachide est de 84 mm<sup>2</sup>/s tandis que celle de l'huile de palme à 50 °C est de 30 mm<sup>2</sup>/s [32].

#### **b. La masse volumique :**

La masse volumique est la masse exprimée en kilogramme contenu dans un volume d'un mètre cube. Dans le cas des huiles, la masse volumique ou la densité sont surtout utiles comme moyen d'identification ou de contrôle.

La masse volumique de l'huile est élevée pour des composés ayant une insaturation faible. Pour des composés ayant le degré d'insaturation identique, elle croit lorsque la longueur des chaînes baisse [31].

#### **c. Point trouble, Point d'écoulement :**

Le point trouble est la température à laquelle apparaît un début de cristallisation ou de dépôt dans l'huile se traduisant par une altération de la limpidité. Il permet de prévoir le comportement de l'huile dans une période froide.

Le point d'écoulement définit la température à laquelle une huile chauffée, puis refroidie dans des conditions bien précises et normalisée cesse de couler (cristallise ou se solidifie) [32].

#### **d. L'indice de réfraction :**

L'indice de réfraction est le rapport de vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière dans l'huile. Il renseigne sur l'état de dégradation d'une huile. En effet, la présence d'acides gras libres abaisse fortement l'indice de réfraction [33].

### **1.9. La toxicité de biodiesel**

On considère que le biodiesel pur (B100) est moins nocif que le diesel pétrolier. En cas de déversement, il se décompose plus rapidement que le diesel. Le biodiesel mélangé serait moins nocif que le diesel pétrolier. Toutefois, les informations précises concernant la toxicité comparative sont restreintes.[34.35]

Les émissions de particules fines, d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone sont réduites par le biodiesel par rapport au diesel, ce qui réduit l'exposition des utilisateurs et de l'environnement à ces polluants toxiques.

### 1.9.1. Sécurité

Bien que moins toxique que le diesel, le biodiesel reste un carburant qui nécessite des précautions de manipulation et de stockage. Son point d'éclair plus élevé (supérieur à 150 °C) le rend plus sûr à manipuler et à transporter que le diesel pétrolier.

### 1.9.2. Propriétés toxicologiques

Les recherches sur les effets toxiques du biodiesel sont restreintes. Il serait essentiel de mener des études supplémentaires afin d'évaluer de manière précise son impact sur la santé et l'environnement par rapport au diesel.

Pour récapituler, le biodiesel est moins toxique que le diesel pétrolier, notamment en raison de sa biodégradabilité plus rapide et de son profil d'émissions plus favorable. Néanmoins, il est essentiel de prendre des précautions lors de sa manipulation et des études supplémentaires seraient bénéfiques pour évaluer précisément son avantage en termes de toxicité.

## 1.10. Comparaison entre les procédés existant de biodiesel

Tableau 1.6. Comparaison entre les procédés existant de biodiesel [36]

Procédés	Descriptions	Avantages	Inconvénients
Transestérification	La transestérification est la méthode chimique la plus fréquemment utilisée pour fabriquer du biodiesel. Il consiste à réagir des huiles végétales ou des graisses animales avec un alcool (méthanol ou éthanol) en présence d'un catalyseur	Cette méthode est couramment employée, performante et bien établie dans le secteur du biodiesel.	Il peut être nécessaire de procéder à des étapes de purification supplémentaires afin de supprimer les impuretés et la glycérine.

	afin de générer des esters méthyliques d'acides gras (FAME) et de la glycérine.		
<b>Estérification direct</b>	La production de biodiesel sans passer par la transestérification est possible grâce à l'estérification directe, qui consiste à estérifier les acides gras des huiles végétales ou des graisses animales avec un alcool.	Ce procédé peut être plus simple et nécessiter moins d'étapes que la transestérification	Il peut être moins efficace pour certaines matières premières et nécessiter des conditions de réaction spécifiques.
<b>Pyrolyse et gazéification</b>	Ces procédés thermochimiques impliquent la décomposition thermique des matières premières pour produire du biodiesel.	Ils peuvent être utilisés pour des matières premières variées et offrir des rendements élevés.	Ils peuvent nécessiter des conditions de réaction spécifiques et des équipements coûteux.

### 1.11. Les limites de production (limite contrainte)

Les limites de production du biodiesel peuvent être définies par plusieurs facteurs, notamment environnementaux, économiques et techniques. Voici un aperçu des limites de production du biodiesel basé sur les sources fournies:

#### 1.11.1. Limites environnementales

Un hectare de colza cultivé peut produire entre 800 et 1 200 kg de biocarburant, ce qui souligne une limite de production liée à la disponibilité des matières premières et à leur rendement

#### 1.11.2. Limites humaines et économiques

Poussés par des subventions particulièrement incitatives de l'État sur les biocarburants, de plus en plus d'agriculteurs privilégient la production de colza, blé, tournesol, etc. Destinée au biodiesel au détriment de la culture alimentaire.

Ce qui réduit l'offre de nourriture pour la consommation à échelle du globe et contribue au renchérissement des matières premières agricoles. Ce qui a pour conséquence de rendre la situation des pauvres encore plus précaire [37].

#### **1.11.3. Coût de production**

Le coût de production minimum du biodiesel par transestérification est estimé entre 0,36 et 0,85 \$CAN/L, ce qui représente une limite économique à sa production en fonction des prix des matières premières et des coûts de transformation [38].

#### **1.11.4. Concurrence avec l'industrie alimentaire**

Environ 50% du colza est déjà utilisé pour la production de biodiesel, ce qui soulève des préoccupations quant à la concurrence des surfaces cultivables entre l'industrie alimentaire et la production de biocarburants. Cette concurrence peut limiter la disponibilité de matières premières pour la production de biodiesel [39].

#### **1.11.5. Risques et contraintes de production à la ferme**

La production de biodiesel à la ferme pour autoconsommation comporte des risques liés à l'utilisation de biocarburants non conformes aux normes ASTM, aux risques d'intoxication au méthanol et aux risques d'explosion, ce qui peut limiter sa production et utilisation

### **1.12. Les procédés de biodiesel**

La transestérification est le procédé le plus courant pour produire du biodiesel à partir d'huiles végétales ou de graisses animales. Il consiste à faire réagir l'huile avec un alcool (généralement le méthanol) en présence d'un catalyseur (acide ou base) pour obtenir des esters méthyliques d'acides gras (biodiesel) et du glycérol. [40]

#### **1. Equation de la réaction de transestérification**

Cette réaction de transestérification est régie par l'équation bilan ci-dessous suivante :



#### **2. Facteurs influençant de la réaction de transestérification des huiles :**

Beaucoup de paramètres affectent le processus de la réaction de transestérification et sont : la condition de réaction, le ratio molaire alcool/huile, le type et la quantité de catalyseur, le temps et la température de réaction, la pureté de réactifs des acides gras libre

#### **3. Procédés de production du biodiesel**

Il existe deux types principaux de procédés de production du biodiesel :

Procédé par voie alcaline	Procédé par voie acide
<ul style="list-style-type: none"> <li>▫ Le procédé le plus courant.</li> <li>▫ Utilise un catalyseur alcalin (hydroxyde de sodium ou de potassium) pour accélérer la réaction de transestérification.</li> <li>▫ Peut être réalisé en une ou deux étapes.</li> <li>▫ <b>Avantages:</b> Simple, efficace et rentable.</li> <li>▫ <b>Inconvénients:</b> Sensible à l'eau et aux acides gras libres, peut produire du savon.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▫ Utilise un catalyseur acide (acide sulfurique ou acide phosphorique) pour accélérer la réaction de transestérification.</li> <li>▫ Généralement plus lent que le procédé par voie alcaline.</li> <li>▫ Moins sensible à l'eau et aux acides gras libres.</li> <li>▫ <b>Avantages:</b> Peut utiliser des huiles de qualité inférieure, produit moins de savon.</li> <li>▫ <b>Inconvénients:</b> Plus complexe et moins rentable que le procédé par voie alcaline, peut corroder les équipements</li> </ul>

### Conclusion :

Le biodiesel présente des avantages environnementaux et économiques significatifs, offrant ainsi une alternative viable au diesel pétrolier. Il est toutefois essentiel de prendre en compte les frais potentiels, les problèmes de compatibilité et les exigences de stockage avant de l'adopter à grande échelle. Des études et un progrès constants peuvent contribuer à améliorer les performances du biodiesel, à diminuer les dépenses et à relever les défis associés à son utilisation à grande échelle.

De plus, il convient de souligner que le biodiesel ne constitue pas une réponse miracle à tous les problèmes environnementaux associés au voyage. Le biodiesel doit être utilisé de manière efficace dans le cadre d'une stratégie globale visant à diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, en favorisant des modes de transport durables tels que les voitures.

Chapitre 2

---

## Problématique

Dans ce projet, les huiles de cuisson usagées (WCO) sont sélectionnées comme matière première, avec l'appui des objectifs de production d'énergie renouvelable. Le prétraitement de WCO est essentiel pour réduire sa teneur en acides gras libres et empêcher la saponification par estérification. La production est séparée en deux unités principales : une unité de prétraitement utilisant un catalyseur acide et une unité de transestérification principale utilisant un catalyseur alcalin. Les bilans de matières et d'énergie ont été calculés, afin d'atteindre un taux de production de 10 000 tonnes par an, atteignant une conversion totale de 98% et une pureté de biodiesel de 97% pour satisfaire les normes de l'ASTM. De plus, le procédé produit du glycérol en tant que sous-produit précieux, avec une pureté de 94 %. En recyclant le méthanol, on peut réduire le besoin en méthanol frais à environ 70 % de l'exigence initiale.

### 2.1 Description détaillée du procédé sélectionné

Le procédé se compose de deux parties : une unité d'estérification qui s'occupe du prétraitement de WCO. La deuxième partie est l'unité principale responsable de la production de biodiesel à partir de l'WCO par la réaction de transestérification.

#### 2.1.1 L'unité d'estérification

Le méthanol est mélangé avec de l'acide sulfurique à 5% (en masse) à base d'huile et introduit dans le premier réacteur CSTR (R-101). L'autre courant d'alimentation, contenant 92 % de trioléine et 8 % d'acide oléique, est chauffée à 70 °C dans l'échangeur de chaleur HE-101 en utilisant le courant chaud à haute température de la colonne de distillation D-101 avant d'entrer dans le réacteur. Le réacteur fonctionne à température constante (isotherme) à 70 °C. Tous les acides gras libres (FFAs), l'acide oléique, sont transformés en oléate de méthyle (MO). Le courant de matière produit est dirigé vers la colonne de distillation (D-101) où l'excès de méthanol est récupéré, puis le méthanol est mélangé avec le courant d'alimentation du méthanol frais. Le courant de matière du fond de la colonne D-101 qui contient le Triolein, MO, l'eau, et l'acide sulfurique est dirigé vers une tour de lavage de glycérine (W-101). Cela aide à séparer le trioléine et l'oléate de méthyle des composants restants. Les déchets sont éliminés sous forme de déchets et l'huile raffinée est acheminée vers l'unité de transestérification.

#### 2.1.2 L'unité de transestérification

Le méthanol frais est mélangé avec 0.75% de KOH (en masse), à base d'huile, puis envoyé au réacteur R-102. Le courant de matière issu de la tour de lavage, l'huile prétraitée, est refroidie à une température de 30 °C dans l'HE-102. Les deux flux d'alimentation ont été

dirigés vers le réacteur (R-102) opérant à 30 °C. Le rapport méthanol-oil est de 6:1, ce qui donne un taux de conversion de 98 % de WCO en oléate de méthyle (MO). Ensuite, le courant de matière sortant du réacteur R-102 est dirigée vers un décanteur (S-101), pour séparer le mélange en deux phases, riche en glycérol et en phase riche en oléate de méthyle. La phase riche en oléate de méthyle est envoyée vers une tour de lavage (W-102) pour séparer le biodiesel des autres composants et existe comme un flux supérieur. Les courants de matière du fond (at the bottom) de W-102 et S-101 sont mélangés et par la suite pompés dans le réacteur de neutralisation (R-103) pour séparer le catalyseur. Le réacteur reçoit un courant d'alimentation qui contient uniquement l'acide phosphorique ( $H_3PO_4$ ) pour réagir avec le KOH et produire du phosphate de potassium ( $K_3PO_4$ ) et de l'eau. Le courant sortant du réacteur (R 103) est utilisé pour alimenter un séparateur de décantation (S-102) pour séparer le phosphate de potassium et se trouve dans le flux sortant en bas du séparateur ( at the Bottom). La purification du glycérol et la séparation de l'eau et du méthanol sont effectuées en dirigeant le flux supérieur du séparateur (S-102) vers la colonne de distillation (D-103). Une partie du glycérol présent en tant que flux de fond (bottom) de la colonne (D 103) est recyclée vers la colonne (W-102) dans l'unité de prétraitement. Le courant supérieur de la colonne (D-103) est envoyé vers une autre colonne de distillation (D-104) pour séparer l'eau et récupérer l'excès du méthanol par la suite recycler le méthanol vers le mixer (M-102) pour le mélanger avec du méthanol alimentant le réacteur (R-102). Le courant supérieur de W-102 est redirigé vers la colonne de distillation sous vide (D-102). La distillation sous vide est essentielle pour éviter la dégradation du MO et réduire la consommation d'énergie en raison du point d'ébullition élevé du MO qui utilise un condenseur partiel et des traces de méthanol et d'eau sont rejetées sous forme de gaz de ventilation. La colonne (D-102) est essentielle pour purifier le biodiesel afin de répondre aux normes ASTM pour la production de biodiesel, le flux de fond contient l'huile non réagit.

## 2.2. Analyse des bilans de masse et d'énergie

Le bilan de matière et la loi de conservation de la masse, en génie des procédés, sont essentiel pour définir et analyser le comportement des systèmes dans diverses conditions opératoires. En utilisant les bilans massiques, il est possible de calculer les débits de composants entrant, sortant et subissant une transformation dans un système. Le bilan de matière permet d'expliquer les paramètres clés du système, tels que la conversion de réaction, les puretés de séparation et les réactifs limitants. Il est important pour les ingénieurs en génie chimique et les concepteurs de procédés d'appliquer des calculs des bilans de matières pour assurer le fonctionnement optimal et durable des procédés industriels.

Le bilan énergétique, d'autre part, couvre le principe de conservation de l'énergie, déclarant que l'énergie ne peut pas être créée ou détruite, mais peut seulement être transformée d'une forme à l'autre. Le bilan énergétique prend en compte l'entrée et la sortie d'énergie, y compris le transfert de chaleur, le travail et les changements d'énergie interne. Ce principe est crucial pour évaluer la performance des systèmes, en garantissant une gestion efficace de l'énergie. Ensemble, les bilans de matière et d'énergie permettent une compréhension complète du comportement des procédés chimiques. L'application de ces principes est cruciale dans toutes les industries, en mettant l'accent sur leur importance absolue dans le domaine du génie chimique.

### 2.3. Hypothèses

- 1) La durée de fonctionnement de l'usine est de 330 jours.
- 2) La durée de l'arrêt est de 35 jours
- 3) La production de biodiesel est d'environ 10000 tonnes par an.
- 4) Le biodiesel et le glycérol ont une pureté de 97 % et 94 %, respectivement.

Tableau 2.1. Propriétés physico-chimiques des composés employés

Composés	Formule moléculaire	Masse molaire	Viscosité cP	Masse volumique	Enthalpie de formation
<b>Triolein</b>	$C_{57}H_{104}O_6$	885.432	4.23	0.915 at(15°C)	-2180.60
Oleic Acid	$C_{18}H_{34}O_2$	282.46	28.77	0.888	-823.50
Methanol	$CH_4O$	32.042	0.554	0.787	-238.60
Sulfuric Acid	$H_2SO_4$	98.08	21	1.8302	-810.4
Potassium hydroxyde	KOH	56.105	N/A	2.044	-426.85
Water	$H_2O$	18.015	0.890	0.9970	-285.84
Methyl Oleate (fame)	$C_{19}H_{36}O_2$	296.5	4.88 at(30°C)	0.8739 at(20°C)	-744.79
Glycerin	$C_3H_8O_3$	92.09	934	1.2613	-699.00
Phosphoric Acid	$H_3PO_4$	97.995	N/A	1.892	-1281.14
Potassium phosphate	$K_3PO_4$	212.266	N/A	2.564	-2002.88

Les éléments sont désignés par des abréviations telles qu'indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 2.2. Abréviations des composants

Component	Abbreviation
Methyl Oleate	MO
Methanol	MeOH
Sulfuric Acid	S
Triolein	T
Potassium Hydroxide	K
Phosphoric Acid	P
Tri-Potassium Phosphate	TP
Water	W
Oleic Acid	OL
Glycerol	G

L'équation générale utilisée dans les calculs des bilan massiques est la suivante :

- L'équation générale du bilan de matière pour un système à l'état stationnaire et sans réaction chimique est :

$$\text{Ce qui entre} + \text{génération} = \text{ce qui sort} + \text{consommation} \quad \text{II.1}$$

- L'équation générale du bilan matériel pour un système à l'état stationnaire avec réaction chimique :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in} \pm \vartheta \xi \quad \text{II.2}$$

Où :

$\dot{n}_{out}$  est le débit molaire à la sortie

$\dot{n}_{in}$  est le débit molaire à l'entrée

$\xi$  représente l'avancement de la réaction.

L'équation générale du bilan énergétique est donnée par :

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_p + \Delta \dot{E}_k = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad \text{II.3}$$

Où :

$\Delta H$  : L'enthalpie

$\Delta \dot{E}_p$  : L'énergie potentielle

$\Delta \dot{E}_k$  : L'énergie cinétique

Q : la chaleur.

$\dot{W}_S$  : Le travail

Si l'énergie potentielle et cinétique peut être considérée comme négligeable et que le système est adiabatique, le travail est calculé comme suit :

$$W_S = m_{mix} \frac{\Delta P}{\rho_{mix}} \quad \text{II.4}$$

Où :

$m_{mix}$  : Le débit massique du mélange

$\Delta P$  : La différence de pression

$\rho_{mix}$  : La masse volumique du mélange.

Si l'énergie potentielle et l'énergie cinétique peuvent être considérées comme négligeables et qu'il n'y a pas de travail, l'équation se simplifie comme suit :

$$\dot{Q} = \Delta \dot{H} = \sum_{out} \dot{n}_j \hat{H}_j - \sum_{in} \dot{n}_j \hat{H}_j \quad \text{II.5}$$

Où :

$\dot{n}$  : Le débit molaire

$j$  : Les composants

Les calculs d'enthalpie pour un composant sans changement de phase sont effectués de la manière suivante :

$$\Delta H_{Stream No} = \dot{n}_j^{Stream No} \cdot \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad \text{(II.6)}$$

Avec :

$\dot{n}$  : est le débit molaire

$c_p$  : la capacité calorifique

$T$  : est la température

En cas de changement de phase, voici comment l'équation est formulée :

$$\Delta H_{Stream\ No} = \dot{n}_j^{Stream\ No} \cdot \left( \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \lambda_j \right) \quad (II-7)$$

Où  $\lambda_j$  représente la chaleur latente.

Dans le cas d'un système avec réaction chimique, la formule devient la suivante :

$$Q = \Delta H = \sum_{out} n_j H_j - \sum_{in} n_j H_j + \xi \Delta H_r \quad II.8$$

Avec :

$\xi$  : L'avancement de la réaction

$\Delta H_r$  : l'enthalpie de réaction

Dans un système avec réaction chimique, l'enthalpie standard de réaction est calculée par la formule suivante :

$$\Delta H_r^\circ = \sum_{products} \nu H_f^\circ - \sum_{reactants} \nu H_f^\circ \quad II.9$$

Dans les colonnes de distillation, et en tenant comptes des hypothèses et que les quantités d'énergies du condenseurs et du rebouilleur sont ajoutés, l'équation II.5 est modifiée comme suit :

$$Q = \Delta H_{system} + Q_c + Q_b = \sum_{out} n_j H_j - \sum_{in} n_j H_j + Q_c + Q_b$$

Avec :

$Q_c$  et  $Q_b$  sont les energies du condenseur et du rebouilleur respectivement

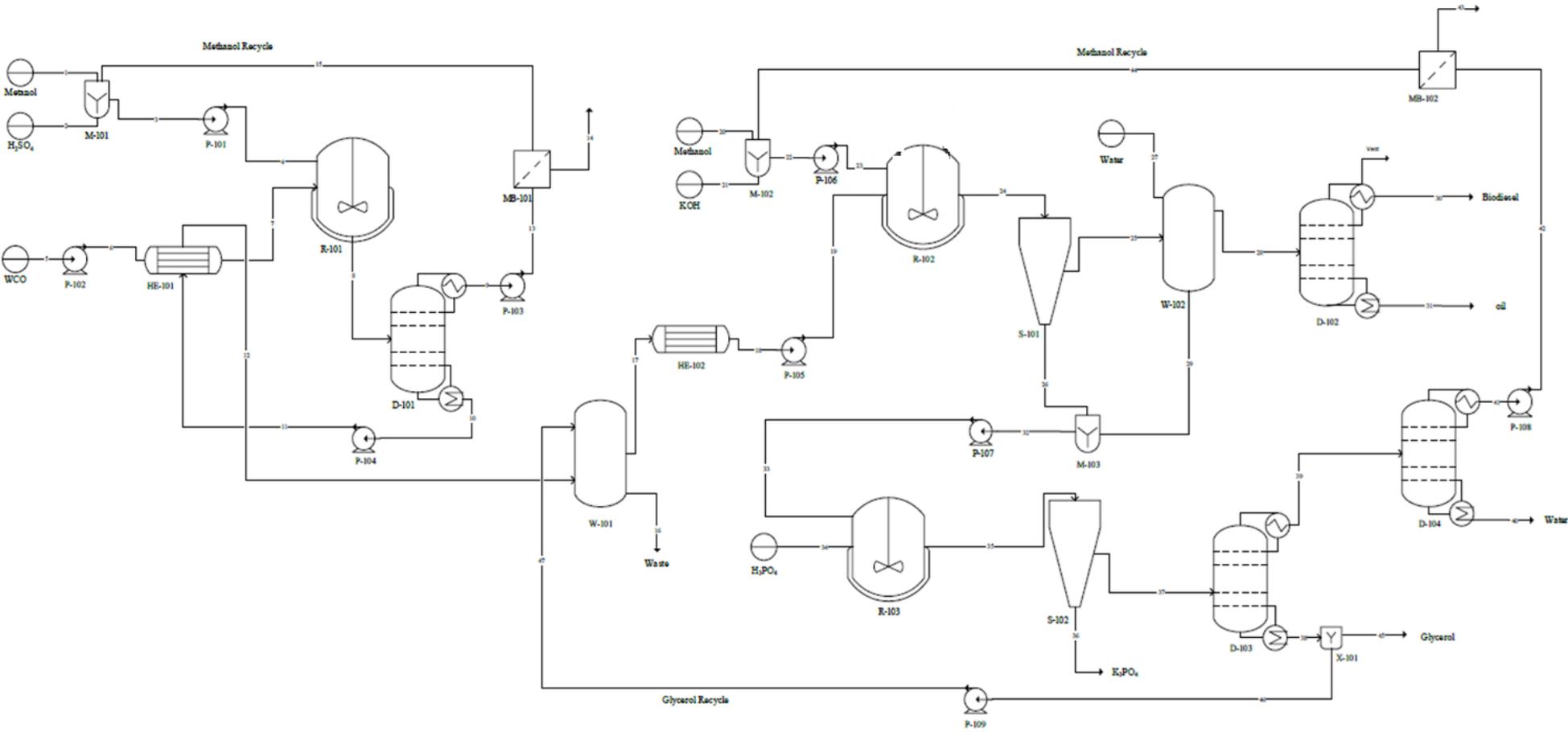


Tableau 2.3. Récapitulatif des courants de matière de l'unité d'estérification (prétraitement) et de transestérification (par simulation)

<b>stream</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
T °C	25	25	27,53	27,53	25	25	70	70	28	136	136	96,63	28	28	28
P (bar)	1	1	1	1,1	1	1,1	1,1	1	0,2	0,3	1	1	1	1	1
Methanol	0,49	0	9,36	9,36	0	0	0	9,24	8,87	0,37	0,37	0,37	8,87	0	8,87
sulfuric acid	0	0,67	0,67	0,67	0	0	0	0,67	0	0,67	0,67	0,67	0	0	0
Triolein	0	0	0	0	1,44	1,44	1,44	1,44	0	1,44	1,44	1,44	0	0	0
Oliec acid	0	0	0	0	0,12	0,12	0,12	0	0	0	0	0	0	0	0
Methyl Oleate	0	0	0	0	0	0	0	0,12	0	0,12	0,12	0,12	0	0	0
water	0	0	0	0	0	0	0	0,12	0,01	0,11	0,11	0,11	0,01	0,01	0
Glycerol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H3PO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K3PO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (kmol/h)	0,49	0,67	10,03	10,03	1,56	1,56	1,56	11,59	8,88	2,71	2,71	2,71	8,88	0,01	8,87
<b>stream</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
T °C	102,38	109,9	30	30	25	25	44,63	44,63	30	30	30	50	31,5	30,39	194
P (bar)	1	1	1	1,1	1	1	1	1,1	1	1	1	1	1	1	0,1
Methanol	0,37	0	0	0	4,43	0	8,61	8,61	4,39	1,1	3,29	0	0,03	1,07	0
sulfuric acid	0,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Triolein	0	1,44	1,44	1,44	0	0	0	0	0,03	0,03	0	0	0,03	0	0
Oliec acid	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Methyl Oleate	0	0,12	0,12	0,12	0	0	0	0	4,35	4,35	0	0	4,35	0	4,26
water	0,18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,78	0,28	2,5	0,13
Glycerol	1,13	0	0	0	0	0	0	0	1,41	0,06	1,35	0	0	0,06	0
KOH	0	0	0	0	0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,03	0,14	0	0	0,03	0
H3PO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K3PO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (kmol/h)	2,35	1,56	1,56	1,56	4,43	0,17	8,78	8,78	10,35	5,57	4,78	2,78	4,69	3,66	4,39

Tableau 2.4. Résumé des courants de matière pour l'unité de transestérification principale (par simulation)

stream	31	Vent	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
T °C	415	194	30,13	30,13	25	25	25	25	225	69,38	88,5	64,9	64,9	64,9	64,9	225	225	225
P (bar)	0,2	0,1	1	1,1	1	1	1	1	1,1	1	1,1	1	1,1	1,1	1,1	1,2		
Methanol	0	0,03	4,36	4,36	0	4,36	0	4,36	0	4,36	0,17	4,19	4,19	0	4,19	0	0	0
sulfuric acid	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Triolein	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oliec acid	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Methyl Oleate	0,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
water	0	0,15	2,5	2,5	0	2,67	0,53	2,14	0,09	2,05	1,84	0,2	0,2	0,2	0	0,018	1,13	1,13
Glycerol	0	0	1,41	1,41	0	1,41	0	1,41	1,41	0	0	0	0	0	0	0,28	0,07	0,07
KOH	0	0	0,17	0,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H3PO4	0	0	0	0	0,06	0,006	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K3PO4	0	0	0	0	0	0,06	0,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (kmol/h)	0,12	0,18	8,44	8,44	0,06	8,506	0,6	7,91	1,5	6,41	2,01	4,39	4,39	0,2	4,19	0,298	1,2	1,2

## 2.4 Conception des équipements

### 2.4.1 Conception des principaux équipements

Les réacteurs constituent l'épine dorsale de notre système de génie chimique, Leur conception est cruciale pour assurer le succès de toute l'opération. Dans ce contexte, le choix des réacteurs à agitation continue (CSTR) se distingue par son importance stratégique. Ces réacteurs sont bien connus pour leur capacité à gérer les réactions en phase liquide, une base de notre procédé. Les CSTR soutiennent l'efficacité et la qualité de nos procédé, car ces réacteurs gèrent efficacement les réactions complexes requises.

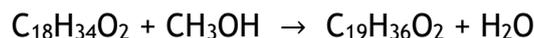
#### 2.4.1.1 Le réacteur d'estérification R-101

Le débit de WCO a été précisément ajusté pour atteindre un taux de production annuel de 10 000 tonnes / année. Cela a été réalisé en utilisant la fonction 'Goal Seek' dans le logiciel Excel pour augmenter le taux de production au niveau souhaité.

*Hypothèses :*

- Conversion de l'acide oléique = 100% (1<sup>ère</sup> relation)
- Rapport méthanol-huile = 6:1 (2<sup>ème</sup> relation)
- Teneur en acide sulfurique = 5% massique de WCO
- Débit d'alimentation de WCO,  $n_{WCO}^5 = 1,56 \frac{kmole}{h}$
- Le débit du courant d'alimentation de WCO se compose de 92% de trioléine et de 8% d'acide oléique.

L'estérification de l'acide oléique se produit par la réaction suivante :



Pour obtenir le débit du méthanol dans le courant de matière (N° 4) à la sortie du mélangeur, on applique la deuxième relation (le rapport méthanol-huile) :

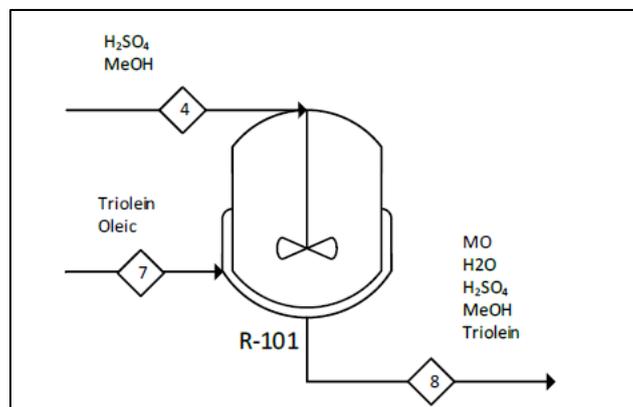


Figure II.1. Schéma du R-101

$$\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^4 = 6 * \dot{n}_{WCO}^7 = 6 * 1.56 = 9.36 \frac{kmol}{h}$$

La teneur en acide sulfurique nous permet de déterminer le débit massique d'acide sulfurique.

$$\dot{m}_S^4 = 0.05 * M_{wt(avg)}^{WCO} * \dot{n}_{WCO}^7 = 0.05 * 837.2 * 1.56 = 65.32 \frac{kg}{h}$$

Le débit molaire s'obtient simplement comme suit :

$$\rightarrow \dot{n}_S^4 = \dot{m}_S^4 \div M_{wt}^S = 65.32 \div 98.08 = 0.67 \frac{kmol}{h}$$

Calcul de l'avancement de la réaction  $\xi$  en utilisant l'équation (2.2) :

$$\dot{n}_{OL}^8 = \dot{n}_{OL}^7 - \xi_1$$

Pour une conversion totale de l'acide Oleic

$$\rightarrow 0 = 0.08 * 1.56 - \xi_1, \rightarrow \xi_1 = 0.12 \frac{kmol}{h}$$

En appliquant l'équation (II.2) sur l'ensemble des éléments impliqués dans la réaction :

$$\text{❖ Pour le Methanol: } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^8 = \dot{n}_{MeOH}^4 - \xi_1 = 9.36 - 0.12 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^8 = 9.24 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour le Methyl Oleate: } \rightarrow \dot{n}_{MO}^8 = \xi_1 = 0.12 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour l'eau "Water": } \rightarrow \dot{n}_w^8 = \xi_1 = 0.12 \frac{kmol}{h}$$

Pour les composés non réagis, Triolean et l'acide sulfurique 'Sulphuric Acid', ce qui entre = ce qui sort.

$$\text{❖ Pour le Triolean: } \rightarrow \dot{n}_T^8 = \dot{n}_T^7 = 0.92 * \dot{n}_{WCO}^5 = 0.92 * 1.56, \rightarrow \dot{n}_T^8 = 1.44 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour le Sulfuric Acid: } \rightarrow \dot{n}_S^8 = \dot{n}_S^4 = 0.67 \frac{kmol}{h}$$

#### 2.4.1.2 La colonne de distillation D 101

Hypothèses :

- Récupération du méthanol dans le distillat = 96 %
- Récupération de l'eau dans le distillat = 10 %
- Aucune trace d'acide sulfurique, de MO et de trioléine dans le distillat.

En utilisant l'équation (2.1) après avoir examiné les hypothèses, pour toutes les composantes :

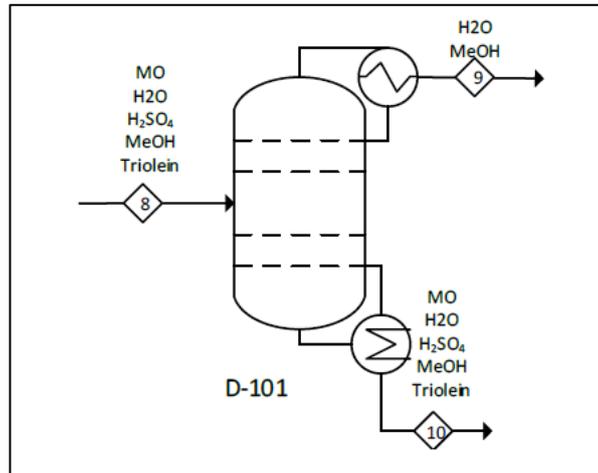


Figure II.2. Schéma de la colonne de distillation D-101

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

❖ Pour le Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^9 = 0.96 * \dot{n}_{MeOH}^8 \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^9 = 0.96 * 9.24 = 8.87 \frac{kmol}{h}$

$$\dot{n}_{MeOH}^8 = \dot{n}_{MeOH}^9 + \dot{n}_{MeOH}^{10}$$

$$\rightarrow 9.24 = 8.87 + \dot{n}_{MeOH}^{10} \frac{kmol}{h}, \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{10} = 0.37 \frac{kmol}{h}$$

❖ Pour le Sulfuric Acid:  $\rightarrow \dot{n}_S^{10} = \dot{n}_S^8 = 0.67 \frac{kmol}{h}$

❖ Pour le Triolein:  $\rightarrow \dot{n}_T^{10} = \dot{n}_T^8 = 1.44 \frac{kmol}{h}$

❖ Pour le Methyl Oleate:  $\rightarrow \dot{n}_{MO}^{10} = \dot{n}_{MO}^8 = 0.12 \frac{kmol}{h}$

❖ Pour Water:  $\rightarrow \dot{n}_w^9 = 0.1 * \dot{n}_w^8, \rightarrow \dot{n}_w^9 = 0.1 * 0.12 = 0.01 \frac{kmol}{h}$

$$\dot{n}_w^8 = \dot{n}_w^9 + \dot{n}_w^{10}, \rightarrow 0.12 = 0.01 + \dot{n}_w^{10}, \rightarrow \dot{n}_w^{10} = 0.11 \frac{kmol}{h}$$

### 2.4.1.3 La pompe P 104

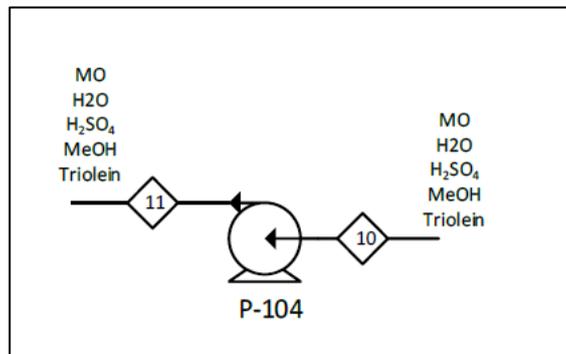


Figure II.3. Schéma de la pompe P-104

En se référant à l'équation (II.1), après avoir examiné les hypothèses, pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

- ❖ Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{11} = \dot{n}_{MeOH}^{10} = 0.37 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Sulfuric Acid:  $\rightarrow \dot{n}_S^{11} = \dot{n}_S^{10} = 0.67 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Triolein:  $\rightarrow \dot{n}_T^{11} = \dot{n}_T^{10} = 1.44 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Methyl Oleate:  $\rightarrow \dot{n}_{MO}^{11} = \dot{n}_{MO}^{10} = 0.12 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Water:  $\rightarrow \dot{n}_w^{11} = \dot{n}_w^{10} = 0.11 \frac{kmol}{h}$

#### 2.4.1.4 La pompe P 103

En utilisant l'équation (II.1), une fois les hypothèses examinées, pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

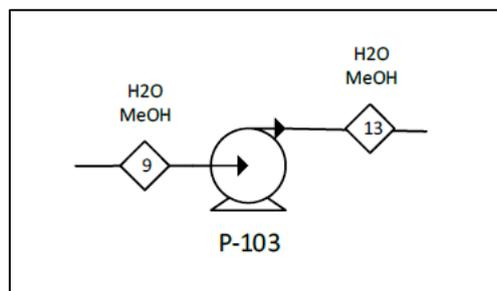


Figure II.4. Schéma de la pompe P-103

- ❖ Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{13} = \dot{n}_{MeOH}^9 = 8.87 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Water:  $\rightarrow \dot{n}_w^{13} = \dot{n}_w^9 = 0.01 \frac{kmol}{h}$

#### 2.4.1.5 Le mélangeur M 101

Dans ce mélangeur, il n'y a pas de réaction chimique. On se basant sur l'équation (II.1) :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

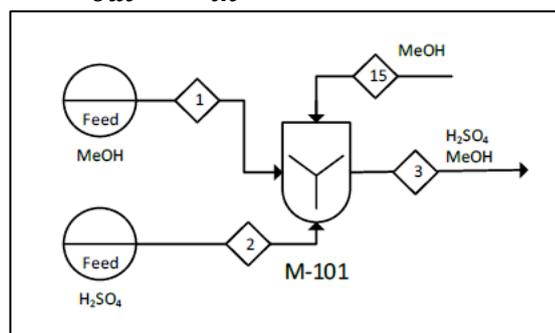


Figure II.5. Schéma du mélangeur M-101

- ❖ Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^3 = \dot{n}_{MeOH}^1 + \dot{n}_{MeOH}^{15}$ ,  
 $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^3 = \dot{n}_{MeOH}^4 = 9.36 \frac{kmol}{h}$

$$\rightarrow 9.36 = \dot{n}_{MeOH}^1 + 8.87, \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^1 = 0.49 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Sulfuric Acid : } \rightarrow \dot{n}_S^3 = \dot{n}_S^2 = 0.67 \frac{kmol}{h}$$

#### 2.4.1.6 La pompe P 101

En se référant à l'équation (II.1), après avoir examiné les hypothèses, pour tous les composés

:

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

$$\text{❖ Methanol: } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^4 = \dot{n}_{MeOH}^3 = 8.87 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Water: } \rightarrow \dot{n}_w^4 = \dot{n}_w^3 = 0.01 \frac{kmol}{h}$$

#### 2.4.1.7 L'échangeur de chaleur HE 101

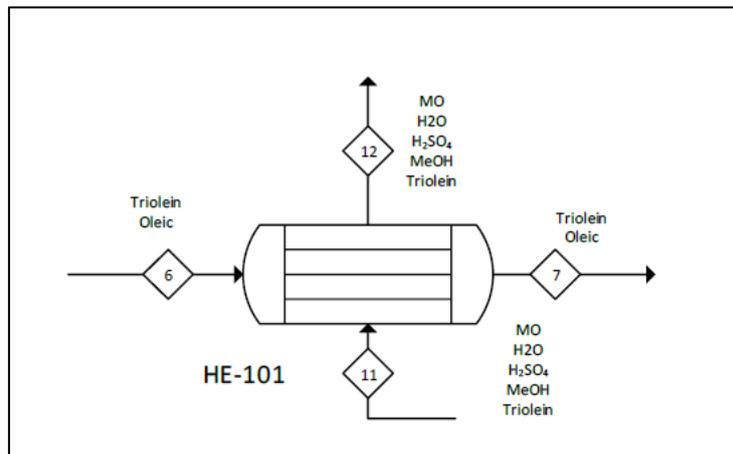


Figure II.6. Schéma de l'échangeur de chaleur HE-101

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

En ce qui concerne le fluide froid :

$$\text{❖ Triolein : } \rightarrow \dot{n}_T^7 = \dot{n}_T^6 = 1.44 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Oleic Acid : } \rightarrow \dot{n}_{OL}^7 = \dot{n}_{OL}^6 = 0.12 \frac{kmol}{h}$$

En ce qui concerne le fluide chaud :

$$\text{❖ Methanol : } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{12} = \dot{n}_{MeOH}^{11} = 0.37 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Sulfuric Acid : } \rightarrow \dot{n}_S^{12} = \dot{n}_S^{11} = 0.67 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Triolein : } \rightarrow \dot{n}_T^{12} = \dot{n}_T^{11} = 1.44 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Methyl Oleate : } \rightarrow \dot{n}_{MO}^{12} = \dot{n}_{MO}^{11} = 0.12 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Water : } \rightarrow \dot{n}_w^{12} = \dot{n}_w^{11} = 0.11 \frac{kmol}{h}$$

2.4.1.8 Pompe P-102

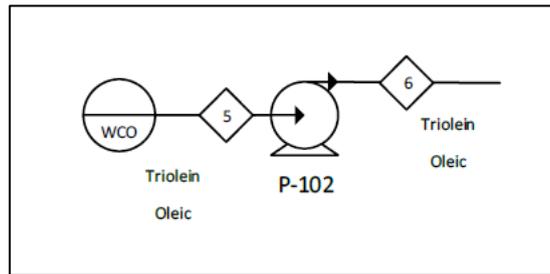


Figure II.7.

En se référant à l'équation (II.1), après avoir examiné les hypothèses, pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

- ❖ Triolein:  $\rightarrow \dot{n}_T^6 = \dot{n}_T^5 = 1.44 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Oleic acide:  $\rightarrow \dot{n}_{Ol}^6 = \dot{n}_{Ol}^5 = 0.12 \frac{kmol}{h}$

2.4.1.9 L'échangeur de chaleur HE 102

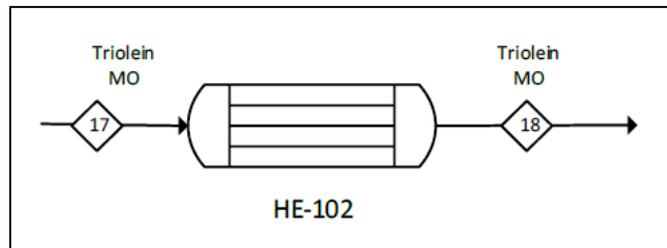


Figure II.8. Schéma de l'échangeur de chaleur HE-101

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

- ❖ Triolein :  $\rightarrow \dot{n}_T^{18} = \dot{n}_T^{17} = 1.44 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Methyl Oleate :  $\rightarrow \dot{n}_{MO}^{18} = \dot{n}_{MO}^{17} = 0.12 \frac{kmol}{h}$

2.4.1.10 Pompe P-102

En se référant à l'équation (II.1), après avoir examiné les hypothèses, pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

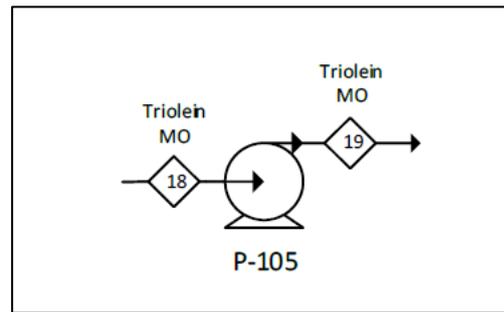


Figure II.9. Schéma de la pompe P-105

- ❖ Triolein:  $\rightarrow \dot{n}_T^{19} = \dot{n}_T^{18} = 1.44 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$
- ❖ Methyl Oleate :  $\rightarrow \dot{n}_{MO}^{19} = \dot{n}_{MO}^{18} = 0.12 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$

#### 2.4.1.11 Le réacteur de transestérification R-102

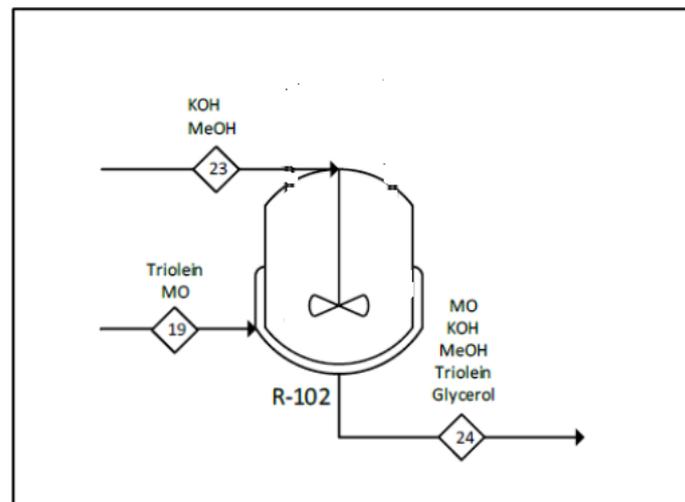
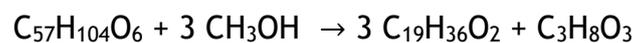


Figure II.10.

Hypothèses :

- Conversion de Triolein = 98% (1<sup>ère</sup> relation)
- Rapport méthanol-huile = 6:1 (2<sup>ème</sup> relation)
- Teneur en Hydroxyde de Potassium = 0,75% massique de WCO

La réaction de transestérification de Triolein est la suivante :



Appliquant la deuxième relation pour déterminer le débit du méthanol :

$$\dot{n}_{\text{MeOH}}^{23} = 6 * \dot{n}_T^{19} = 6 * 1.44 = 8.61 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Pour obtenir le débit d'hydroxyde de potassium, on peut appliquer la relation de quantité de catalyseur (Teneur en Hydroxyde de Potassium = 0,75% massique de WCO).

$$\dot{m}_K^{23} = 0.0075 * M_{wt}^T * \dot{n}_T^{19} = 0.0075 * 885.432 * 1.44 = 9.53 \frac{kg}{h}$$

Le débit molaire s'obtient simplement comme suit :

$$\rightarrow \dot{n}_T^{23} = \dot{m}_T^{23} \div M_{wt}^T = 9.53 \div 56.105 = 0.17 \frac{kmol}{h}$$

L'avancement de la réaction peut être déterminé en utilisant l'équation II.2 comme suit :

$$\dot{n}_T^{24} = \dot{n}_T^{19} - \xi_2 \rightarrow \text{la conversion du Triolean est de 98\%}$$

$$\dot{n}_T^{24} = (1 - 0,98) \times \dot{n}_T^{19} = (1 - 0,98) \times 1,44 \rightarrow \dot{n}_T^{24} = 0,03 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow 0,03 = 1,44 - \xi_2$$

$$\xi_2 = 1,41 \frac{kmol}{h}$$

En appliquant l'équation (II.2) sur l'ensemble des éléments impliqués dans la réaction :

$$\diamond \text{ Pour le Methanol: } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{24} = \dot{n}_{MeOH}^{23} - \xi_2 = 8.6 - 3 \times 1,41 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{24} = 4.39 \frac{kmol}{h}$$

$$\diamond \text{ Pour le Methyl Oleate: } \rightarrow \dot{n}_{MO}^{24} = \dot{n}_{MO}^{19} + 3 \times \xi_2 = 0.12 + (3 \times 1,4) = 4,35 \frac{kmol}{h}$$

$$\diamond \text{ Pour le Glycerol : } \rightarrow \dot{n}_G^{24} = \xi_2 = 1,41 \frac{kmol}{h}$$

En ce qui concerne les éléments non réagis, comme l'hydroxyde de potassium, l'entrée égale la sortie :

$$\diamond \text{ Pour l'Hydroxyde de Potassium : } \rightarrow \dot{n}_K^{24} = \dot{n}_K^{23} = 0,17 \frac{kmol}{h}$$

Tableau 2.5. Récapitulatif du bilan de matière de R-102

Stream	Inlet		Outlet
Component	19 (kmol/h)	23 (kmol/h)	24 (kmol/h)
Methanol	0	8,61	4,39
Potassium Hydroxide	0	0,17	0,17
Triolein	1,44	0	0,03
Methyl Oleate	0,12	0	4,35
Glycerol	0	0	1,41
Total	1,56	8,78	10,35
$\xi_2$ (kmol/h)	1,41		

2.4.1.12 Décanteur (Gravity separator)

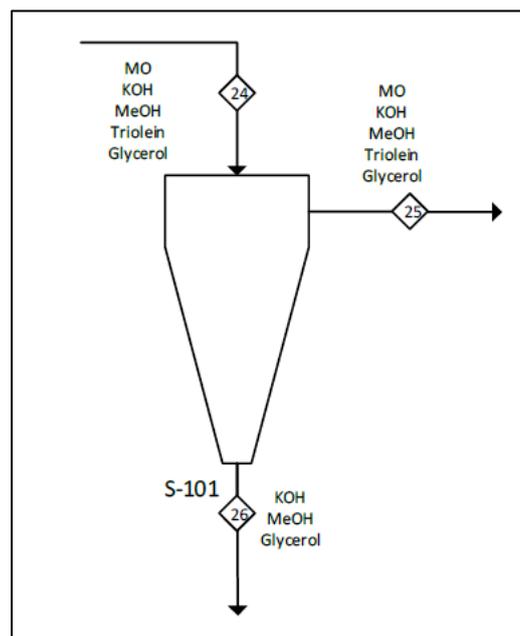


Figure II.11.

Dans le décanteur S-101, utilisé pour séparer deux liquides en fonction de leurs densités. La phase liquide plus légère comprend de Methyl Oleate, du Trioleine et des traces de KOH, de Methanol et du Glycerol, tandis que la phase liquide plus lourde contient du KOH, du Methanol et du Glycerol.

**Hypothèses :**

- Le courant de matière en bas du décanteur(N°26) ne contient pas de Triolean et Methyl Oleate.
- 25 % du méthanol est récupéré en haut du décanteur (top stream)
- Le taux de glycérol récupéré en bas du décanteur (bottom stream) est de 96 %.
- L'hydroxyde de potassium est récupéré en bas du décanteur est de 85 %.

$$\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{25} = 0,25 \times \dot{n}_{MeOH}^{24} = 0,25 \times 4,39 = 1,1 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_G^{26} = 0,96 \times \dot{n}_G^{24} = 0,96 \times 1,41 = 1,35 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_K^{26} = 0,85 \times \dot{n}_K^{24} = 0,85 \times 0,17 = 0,14 \frac{kmol}{h}$$

Appliquant l'équation II.1 pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

$$\dot{n}_{25} + \dot{n}_{26} = \dot{n}_{24}$$

❖ Pour le Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{26} = \dot{n}_{MeOH}^{24} - \dot{n}_{MeOH}^{25} = 4,39 - 1,1$

$$\dot{n}_{MeOH}^{26} = 3,29 \frac{kmol}{h}$$

❖ Pour le Glycerol :  $\rightarrow \dot{n}_G^{25} = \dot{n}_G^{24} - \dot{n}_G^{26} = 1,41 - 1,35$

$$\rightarrow \dot{n}_G^{25} = 0,06 \frac{kmol}{h}$$

❖ Pour l'Hydroxyde de Potassium :  $\rightarrow \dot{n}_K^{25} = \dot{n}_K^{24} - \dot{n}_K^{26} = 0,17 - 0,14$

$$\rightarrow \dot{n}_K^{25} = 0,03 \frac{kmol}{h}$$

❖ Pour le Triolean:  $\rightarrow \dot{n}_T^{25} = \dot{n}_T^{24} = 0,03 \frac{kmol}{h}$

❖ Pour Methyl Oleate:  $\rightarrow \dot{n}_{MO}^{25} = \dot{n}_{MO}^{24} = 4,34 \frac{kmol}{h}$

Tableau 2.6. Récapitulatif du bilan de matière de S-101

Stream Component	Inlet	Outlet	
	24 (kmol/h)	25 (kmol/h)	26 (kmol/h)
Methanol	4,39	1,1	3,29
Potassium Hydroxide	0,17	0,03	0,14
Triolein	0,03	0,03	0
Methyl Oleate	4,35	4,35	0
Glycerol	1,41	0,06	1,35
Total	10,35	5,57	4,78

2.4.1.13 La tour de lavage W-102

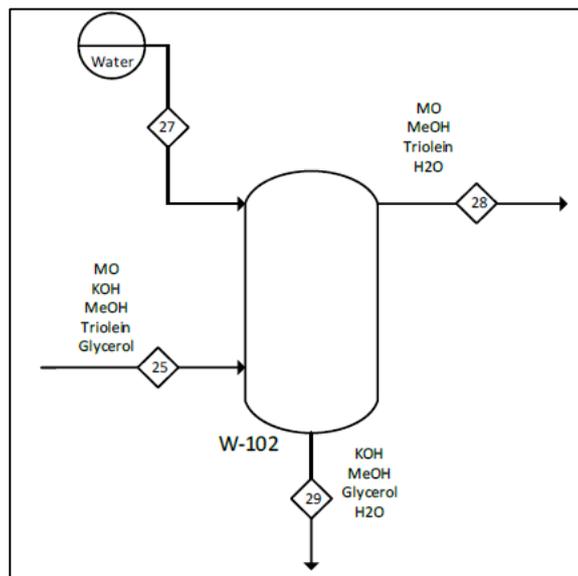


Figure II.12

### Hypothèse

- Le débit d'eau dans le courant de matière N°27 égale la moitié du courant N°25 (Abbaszadeh et al) ( 1<sup>ère</sup> relation)
- 97% du Methanol est récupérée dans le courant de matière en bas de la tour de lavage (2<sup>ème</sup> relation)
- 90% de l'eau va être récupérée en bas de la tour de lavage (3<sup>ème</sup> relation)
- Le courant de matière en bas de la tour (at bottom) ne contient pas de Tirolean et Methyl Oleate.
- Le courant de matière en haut de la tour (at top stream) ne contient pas de Glycerol et d'Hydroxyde de Potassium.

$$\rightarrow \dot{n}_W^{27} = 0,5 \times \dot{n}_{Total}^{25} = 0,5 \times 5,55 = 2,78 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{29} = 0,97 \times \dot{n}_{MeOH}^{25} = 0,97 \times 1,1 = 1,07 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_W^{29} = 0,90 \times \dot{n}_W^{27} = 0,9 \times 2,78 = 2,5 \frac{kmol}{h}$$

Appliquant l'équation II.1 pour tous les composés

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

$$\text{❖ Pour le Methanol: } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{28} + \dot{n}_{MeOH}^{29} = \dot{n}_{MeOH}^{25} \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{28} + 1,07 = 1,1$$

$$\dot{n}_{MeOH}^{28} = 0,03 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour le Glycerol : } \rightarrow \dot{n}_G^{29} = \dot{n}_G^{25} = 0,06 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_G^{29} = 0,06 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour l'Hydroxyde de Potassium : } \rightarrow \dot{n}_K^{29} = \dot{n}_K^{25} = 0,03 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_K^{29} = 0,03 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour le Methyl Oleate : } \rightarrow \dot{n}_{MO}^{28} = \dot{n}_{MO}^{25} = 4,35 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Water : } \rightarrow \dot{n}_W^{28} + \dot{n}_W^{29} = \dot{n}_W^{27} \rightarrow \dot{n}_W^{28} + 2,5 = 2,78$$

$$\dot{n}_W^{28} = 0,28 \frac{kmol}{h}$$

## 2.4.1.14 Colonne de distillation D-102

Hypothèses

- 98% du Methyl Oleate sera récupérée dans le distillat
- La pureté du Methyl Oleate dans le distillat est de 0,97

$$\rightarrow \dot{n}_{MO}^{30} = 0,98 \times \dot{n}_{MO}^{28} = 0,98 \times 4,35 = 4,26 \frac{kmol}{h}$$

En utilisant l'équation II.1 pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

- ❖ Pour le Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{28} = 0,03 \frac{kmol}{h}$ , libéré sous forme de gaz de ventilation.
- ❖ Triolean :  $\rightarrow \dot{n}_T^{31} = \dot{n}_T^{28} = 0,03 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Pour le Methyl Oleate :  $\rightarrow \dot{n}_{MO}^{31} + \dot{n}_{MO}^{30} = \dot{n}_{MO}^{28} \rightarrow \dot{n}_{MO}^{31} + 4,26 = 4,35 \frac{kmol}{h}$   
 $\dot{n}_{MO}^{31} = 0,09 \frac{kmol}{h}$ ,  $\rightarrow \dot{n}_{MO}^{31} + \dot{n}_{MO}^{30} = \dot{n}_{MO}^{28} \rightarrow 0,09 + (0,97 \times \dot{n}_{Total}^{30}) = 4,35$   
 $\rightarrow \dot{n}_{Total}^{30} = 4,39 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Water :  $\rightarrow \dot{n}_W^{30} = (1 - 0,97) \times \dot{n}_{Total}^{30} = 0,03 \times 4,39 = 0,13 \frac{kmol}{h}$   
 $\rightarrow \dot{n}_W^{30} + vent (H_2O) = \dot{n}_{MO}^{28} \rightarrow 0,13 + (vent H_2O) = 0,28$   
 $(vent H_2O) = 0,15 \frac{kmol}{h}$ , libéré sous forme de gaz de ventilation.

## 2.4.1.15 Mélangeur M-103

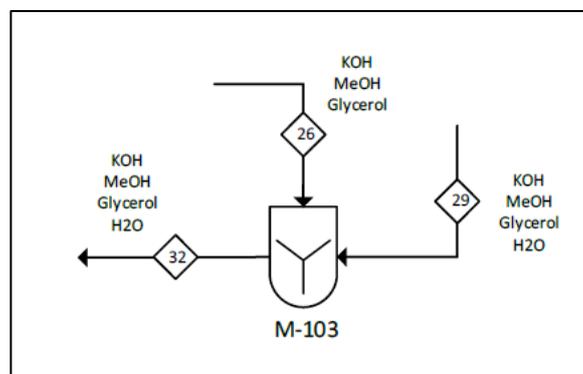


Figure II.13

L'équation II.1 est appliquée pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

$$\text{❖ Pour le Methanol: } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{32} = \dot{n}_{MeOH}^{26} + \dot{n}_{MeOH}^{29} \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{32} = 3,29 + 1,07$$

$$\dot{n}_{MeOH}^{32} = 4,36 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour le Glycerol : } \rightarrow \dot{n}_G^{32} = \dot{n}_G^{26} + \dot{n}_G^{29} = 1,35 + 0,06 = 1,41 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_G^{32} = 1,41 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour l'Hydroxyde de Potassium : } \rightarrow \dot{n}_K^{32} = \dot{n}_K^{26} + \dot{n}_K^{29} = 0,14 + 0,03 = 0,17 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_K^{32} = 0,17 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Water : } \rightarrow \dot{n}_W^{32} = \dot{n}_W^{29} \rightarrow \dot{n}_W^{32} = 2,5 \frac{kmol}{h}$$

$$\dot{n}_W^{32} = 2,5 \frac{kmol}{h}$$

#### 2.4.1.16 Pompe P-107

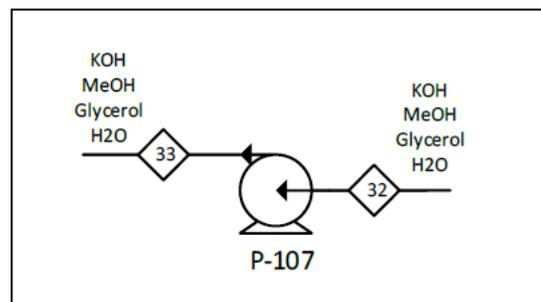


Figure II.14

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

$$\text{❖ Pour le Methanol: } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{33} = \dot{n}_{MeOH}^{32} = 4,36$$

$$\dot{n}_{MeOH}^{33} = 4,36 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour le Glycerol : } \rightarrow \dot{n}_G^{33} = \dot{n}_G^{32} = 1,41 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_G^{33} = 1,41 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Pour l'Hydroxyde de Potassium : } \rightarrow \dot{n}_K^{33} = \dot{n}_K^{32} = 0,17 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_K^{33} = 0,17 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Water : } \rightarrow \dot{n}_W^{33} = \dot{n}_W^{32} \rightarrow \dot{n}_W^{33} = 2,5 \frac{kmol}{h}$$

$$\dot{n}_W^{33} = 2,5 \frac{kmol}{h}$$

## 2.4.1.17 Réacteur de neutralisation R-103

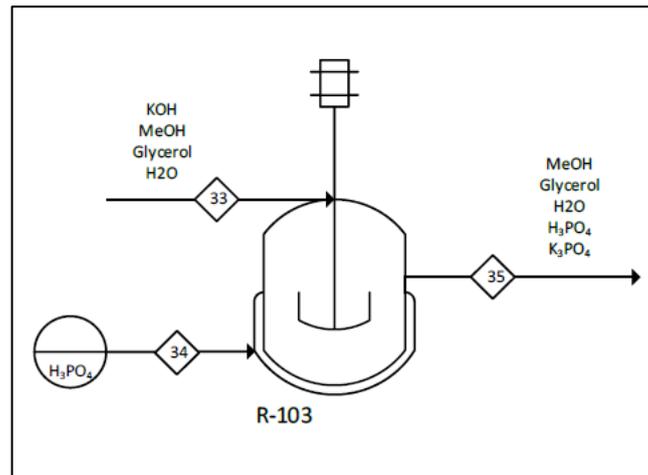
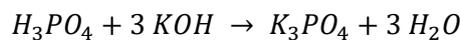


Figure II.15

## Hypothèses :

- Toute la quantité d'Hydroxyde de Potassium est convertie en  $K_3PO_4$
- 10% d'excès en acide phosphorique.

L'avancement de la réaction  $\xi$  est calculé en appliquant l'équation II.2. La réaction de neutralisation du phosphate de potassium est la suivante :



$$\rightarrow \dot{n}_K^{35} = \dot{n}_K^{33} - 3 \times \xi_3$$

→ pour une conversion totale (100%) d'hydroxyde de potassium :  $\dot{n}_K^{35} = 0$

$$\frac{\dot{n}_K^{33}}{3} = \xi_3 \rightarrow \frac{0,17}{3} = \xi_3, \quad \rightarrow \xi_3 = 0,06 \frac{kmol}{h}$$

En utilisant l'équation II.2 pour tous les composés impliqués dans la réaction chimique :

$$\text{❖ Water : } \rightarrow \dot{n}_W^{35} = \dot{n}_W^{33} + (3 \times \xi_3) \rightarrow \dot{n}_W^{35} = 2,5 + (3 \times 0,06) = 2,67 \frac{kmol}{h}$$

$$\dot{n}_W^{35} = 2,67 \frac{kmol}{h}$$

$$\text{❖ Phosphoric Acid : } \rightarrow \dot{n}_P^{35} = \dot{n}_P^{34} - \xi_3$$

$$\rightarrow \dot{n}_K^{33} = 0,17 \frac{kmol}{h}$$

Depuis la stœchiométrie de la réaction chimique, la quantité théorique de l'acide phosphorique est la suivante :

$$\rightarrow \dot{n}_{P,theo}^{34} = \frac{1}{3} \times \dot{n}_K^{33} = \frac{1}{3} \times 0,17 = 0,06 \frac{kmol}{h}$$

Tenant compte de l'hypothèse, un excès de 10% en acide phosphorique :

$$\rightarrow \dot{n}_P^{34} = 1.1 \times \dot{n}_{P,theo}^{34} = 1.1 \times 0,06 = 0,066 \frac{kmol}{h}$$

$$\rightarrow \dot{n}_P^{35} = 0,066 - 0,06 = 0,006 \frac{kmol}{h}$$

❖ Tri-Potassium Phosphate :  $\rightarrow \dot{n}_{TP}^{35} = \xi_3 = 0,06 \frac{kmol}{h}$

Pour les composés qui n'ont pas participés à la réaction chimique tel que Methanol et Glycerol, ce qui entre = ce qui sort.

❖ Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{35} = \dot{n}_{MeOH}^{33} = 4,36 \frac{kmol}{h}$

❖ Glycerol :  $\rightarrow \dot{n}_G^{35} = \dot{n}_G^{33} = 1,41 \frac{kmol}{h}$

#### 2.4.1.18 Décanteur S-102

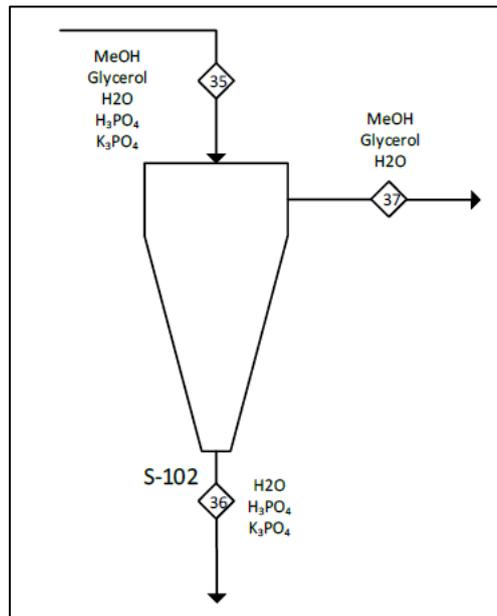


Figure II.16

Hypothèses :

❖ 20% de l'eau va être récupérer en bas du décanteur (at downstream)

$$\dot{n}_W^{36} = 0,2 \times \dot{n}_W^{35} = 0,2 \times 2,67 = 0,53 \frac{kmol}{h}$$

En utilisant l'équation II.1 pour tous les composés :

- ❖ Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{37} = \dot{n}_{MeOH}^{35} \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{37} = 4,36 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Glycerol :  $\rightarrow \dot{n}_G^{37} = \dot{n}_G^{35} \rightarrow \dot{n}_G^{37} = 1,41 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Water :  $\rightarrow \dot{n}_W^{37} + \dot{n}_W^{36} = \dot{n}_W^{35}, \rightarrow \dot{n}_W^{37} + 0,53 = 2,67$

$$\dot{n}_W^{37} = 2,14 \frac{kmol}{h}$$

- ❖ Phosphoric Acid :  $\rightarrow \dot{n}_P^{37} = \dot{n}_P^{35}, \rightarrow \dot{n}_P^{37} = 0,006 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Tri-Phosphoric Acid :  $\dot{n}_{TP}^{37} = \dot{n}_{TP}^{35}, \rightarrow \dot{n}_{TP}^{37} = 0,06 \frac{kmol}{h}$

#### 2.4.1.19 Colonne de distillation D-103

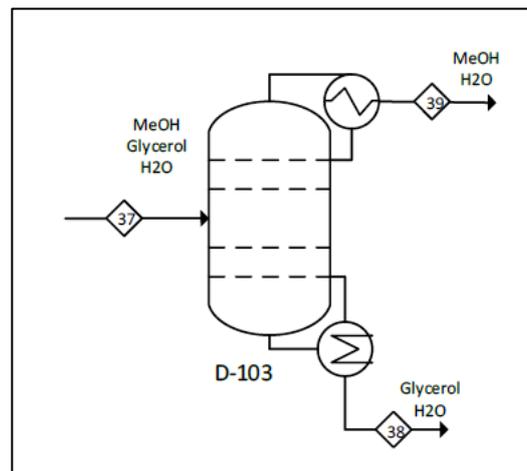


Figure II.17

Hypothèses :

- En bas de la colonne (at the bottom), la pureté du Glycerol est de 94%

Appliquant l'équation II.1 pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

- ❖ Pour le Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{39} = \dot{n}_{MeOH}^{37} = 4,34$   

$$\dot{n}_{MeOH}^{39} = 4,34 \frac{kmol}{h}$$
- ❖ Pour le Glycerol :  $\rightarrow \dot{n}_G^{38} = \dot{n}_G^{37} = 1,41 \frac{kmol}{h}$ ,  $\rightarrow \dot{n}_G^{38} = 0,94 \times \dot{n}_{Total}^{38}$   

$$\rightarrow 1,41 = 0,94 \times \dot{n}_{Total}^{38} \Rightarrow \dot{n}_{Total}^{38} = 1,5 \frac{kmol}{h}$$
- ❖ Water :  $\rightarrow \dot{n}_W^{38} + \dot{n}_W^{39} = \dot{n}_W^{37}, \Rightarrow \dot{n}_W^{38} = (1 - 0,94) \times \dot{n}_{Total}^{38}$

$$\dot{n}_W^{38} = 0,06 \times 1,5 = 0,09 \frac{kmol}{h}, \rightarrow \dot{n}_W^{39} + 0,09 = 2,14$$

$$\dot{n}_W^{39} = 2,05 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

#### 2.4.1.20 Colonne de distillation D-104

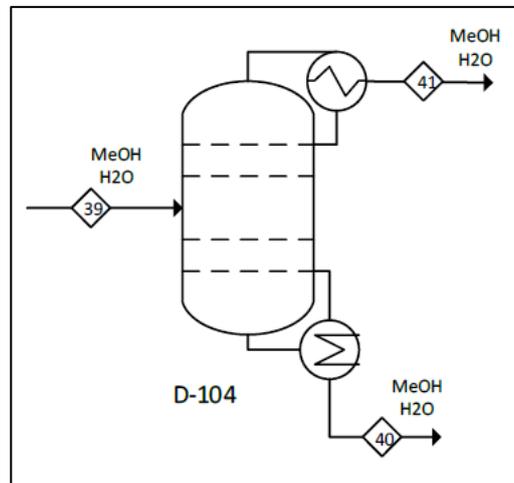


Figure II.18

Hypothèses :

- 96% du Methanol est récupéré dans le distillat
- 10% de l'eau est récupérée dans distillat

$$\text{❖ Pour le Methanol: } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{41} = 0,96 \times \dot{n}_{MeOH}^{39} = 0,96 \times 4,36$$

$$\dot{n}_{MeOH}^{41} = 4,19 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{MeOH}^{41} + \dot{n}_{MeOH}^{40} = \dot{n}_{MeOH}^{39}, \rightarrow 4,19 + \dot{n}_{MeOH}^{40} = 4,36$$

$$\dot{n}_{MeOH}^{40} = 0,17 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\text{❖ Water :} \rightarrow \dot{n}_W^{41} = 0,1 \times \dot{n}_W^{39}, \dot{n}_W^{41} = 0,1 \times 2,05 = 0,205 \frac{\text{kmol}}{\text{h}},$$

$$\text{❖ } \Rightarrow \dot{n}_W^{41} + \dot{n}_W^{40} = \dot{n}_W^{39} \rightarrow 0,205 + \dot{n}_W^{40} = 2,05$$

$$\dot{n}_W^{40} = 1,84 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

#### 2.4.1.21 Pompe P-108

En appliquant l'équation 2.1, pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

$$\text{❖ Pour le Methanol: } \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{42} = \dot{n}_{MeOH}^{41} = 4,19$$

$$\dot{n}_{MeOH}^{39} = 4,19 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

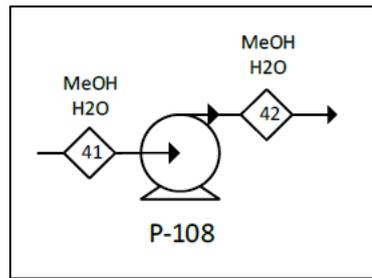


Figure II.19

$$\text{❖ Water :} \rightarrow \dot{n}_W^{42} = \dot{n}_W^{41} = 0,205,$$

$$\Rightarrow \dot{n}_W^{42} = 0,205 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_W^{38} = 0,06 \times 1,5 = 0,09 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}, \rightarrow \dot{n}_W^{39} + 0,09 = 2,14$$

$$\dot{n}_W^{39} = 2,05 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

#### 2.4.1.22 Mélangeur M-102

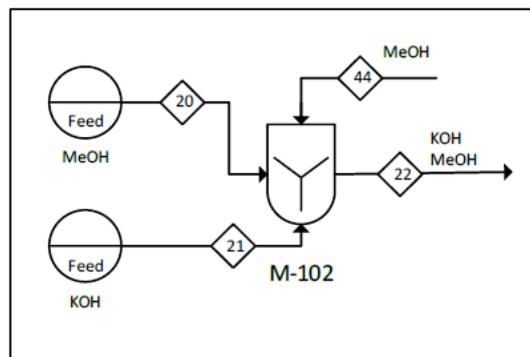


Figure II.20.

En appliquant la loi de conservation de la matière pour tous les composés, on obtient :

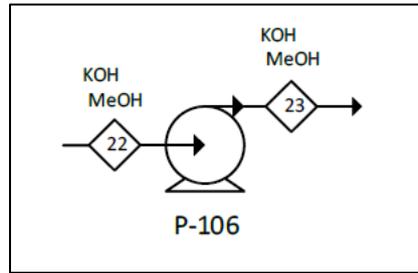
$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

$$\text{❖ Pour le Methanol:} \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{22} = \dot{n}_{MeOH}^{20} + \dot{n}_{MeOH}^{44}, \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{22} = \dot{n}_{MeOH}^{23} = 8,61 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\rightarrow 8,61 = \dot{n}_{MeOH}^{20} + 4,19, \rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{20} = 4,43 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\bullet \text{ Potassium Hydroxide:} \rightarrow \dot{n}_K^{22} = \dot{n}_K^{21} = 0,17 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

2.4.1.23 Pompe P-106



Figurell.21

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

- ❖ Pour le Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{23} = \dot{n}_{MeOH}^{22} = 8,61 \frac{kmol}{h}$   
 $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{23} = 8,61 \frac{kmol}{h}$
- Potassium Hydroxide:  $\rightarrow \dot{n}_K^{23} = \dot{n}_K^{22} = 0,17 \frac{kmol}{h}$

2.4.1.24 Séparateur (Divider) X-101

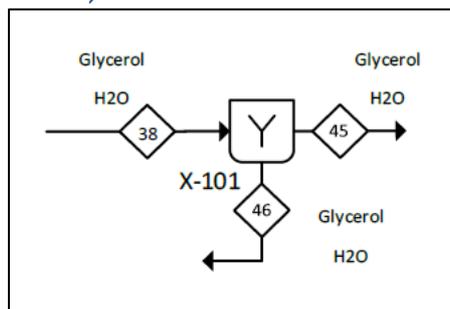


Figure II.22.

Hypothèses :

- 80% du débit est envoyé vers le courant de matière de recyclage (envoyé vers le W-101)
- ❖ Glycerol :  $\rightarrow \dot{n}_G^{46} = 0,8 \times \dot{n}_G^{38} = 0,8 \times 1,41 = 1,13 \frac{kmol}{h}$ ,
- ❖ Water:  $\rightarrow \dot{n}_W^{46} = 0,8 \times \dot{n}_W^{38} = 0,8 \times 0,09 = 0,07 \frac{kmol}{h}$

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

- ❖ Glycerol :  $\rightarrow \dot{n}_G^{45} + \dot{n}_G^{46} = \dot{n}_G^{38}, \rightarrow \dot{n}_G^{45} + 1,13 = 1,41, \rightarrow \dot{n}_G^{45} = 0,28 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Water :  $\dot{n}_W^{45} + \dot{n}_W^{46} = \dot{n}_W^{38}, \rightarrow \dot{n}_W^{45} + 0,07 = 0,09, \rightarrow \dot{n}_W^{45} = 0,018 \frac{kmol}{h}$

2.4.1.25 Pompe P-109

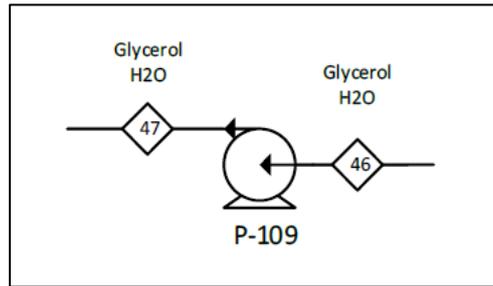


Figure II.23

Appliquant l'équation II.1 pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

❖ **Glycerol** :  $\rightarrow \dot{n}_G^{47} = \dot{n}_G^{46} = 1,13 \frac{kmol}{h}$

❖ **Water** :  $\dot{n}_W^{47} = \dot{n}_W^{46} = 0,07 \frac{kmol}{h}$

2.4.1.26 La tour de lavage de Glycerol W-101

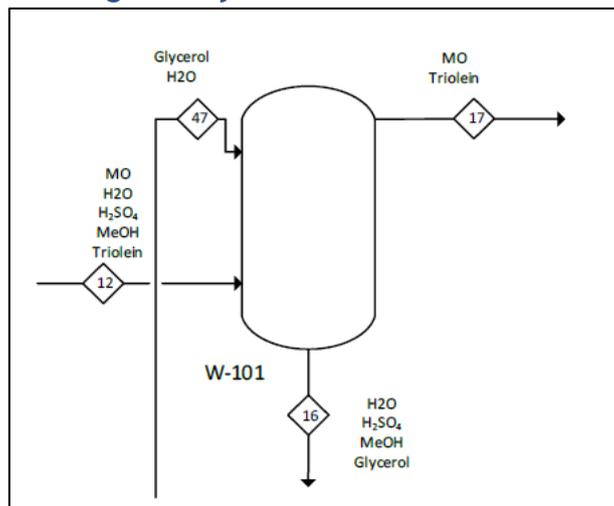


Figure II.24.

Hypothèses :

- Le courant de matière supérieur (top stream) contient uniquement le Methyl Oleate et le Triolean

Appliquant l'équation II.1 pour tous les composés :

$$\dot{n}_{out} = \dot{n}_{in}$$

❖ Pour le Methanol:  $\rightarrow \dot{n}_{MeOH}^{16} = \dot{n}_{MeOH}^{12} = 0,37 \frac{kmol}{h}$

❖ **Glycerol** :  $\rightarrow \dot{n}_G^{16} = \dot{n}_G^{47} = 1,13 \frac{kmol}{h}$

- ❖ Sulfuric Acid :  $\rightarrow \dot{n}_S^{16} = \dot{n}_S^{12} = 0,67 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Triolein:  $\rightarrow \dot{n}_T^{17} = \dot{n}_T^{12} = 1,44 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Methyl Oleate :  $\rightarrow \dot{n}_{MO}^{17} = \dot{n}_{MO}^{12} = 0,125 \frac{kmol}{h}$
- ❖ Water :  $\dot{n}_W^{16} = \dot{n}_W^{12} + \dot{n}_W^{47}, \Rightarrow \dot{n}_W^{16} = 0,11 + 0,07, \rightarrow \dot{n}_W^{16} = 0,18 \frac{kmol}{h}$

#### 2.4.2 Le bilan énergétique

Le bilan énergétique couvre le principe de conservation de l'énergie, affirmant que l'énergie ne peut être créée ou détruite, mais seulement peut être transformée d'une forme à une autre. Dans l'équation du bilan énergétique, on prend en considération l'énergie entrante et sortante, y compris le transfert de chaleur, le travail et les changements d'énergie interne. Ce principe est crucial pour évaluer la performance des systèmes, en garantissant une gestion efficace de l'énergie.

En combinant les bilans de matière et d'énergie, on peut obtenir une compréhension complète du comportement des procédés industriels. Il est crucial d'appliquer ces principes dans toutes les industries, en mettant l'accent sur leur importance absolue dans le domaine du génie chimique. **Malheureusement, en raison du manque de temps, le bilan énergétique n'a pas été finalisé.**

#### Conclusion

Nous avons établi une méthode efficace pour produire du biodiesel à partir d'huile de cuisson usagée (WCO), une matière première durable et économique. Cette approche a donné une conversion totale de 98%, produisant du biodiesel avec une pureté de 97% pour satisfaire aux normes ASTM. La capacité de l'usine est de 10000 tonnes de biodiesel par an. En recyclant l'excès de méthanol dans les unités d'estérification et de transestérification (D-101 et D-104), nous avons réussi à réduire les besoins en méthanol frais d'environ 70%. En outre, le processus de production produit du glycérol en tant que sous-produit précieux, atteignant un niveau de pureté de 94%

Références bibliographiques

- [1] Ma F., Hanna M.A., Biodiesel production: A review, *Bioresour Technol.*70, 1999, pp.1-15
- [2] Meher L.C.,Vidyasagar D,Naik S.N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10, 2006, pp. 248-268
- [3] Toda, M; Takagaki A, Okamura M, Kondo J.N., Hyashi S, Domen K, Hana M.; Biodiesel made with sugar catalyst, *Nature* 438, 2005, pp. 178
- [4] Y.J. Xu, G.X. Li, Z.Y. Sun, Development of biodiesel industry in China: upon the terms of production and consumption, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54 (2016)318-330, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.035>.
- [5] E.G. Shay, Diesel fuel from vegetable oils: status and opportunities, *Biomass Bioenergy* 4 (4) (1993) 227-242, [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(93\)90080-N](https://doi.org/10.1016/0961-9534(93)90080-N).
- [6] A. Murugesan, C. Umarani, R. Subramanian, N. Nedunchezian, Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines—a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (3) (2009) 653-662, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.007>.
- [7] Administration USEI, Annual Biodiesel Production in China, 2016. <https://www.eia.gov/opendata/qb.php?category&equals;2135219&sdid&equals;INTL.81-1-CHN-MT.A>. (Accessed 2 February 2021).
- [8] Y. Gao, Y. Chen, J. Gu, Z. Xin, S. Sun, Butyl-biodiesel production from waste cooking oil: kinetics, fuel properties and emission performance, *Fuel*
- [9] ZIGHMI S., 'Production de biodiesel et optimisation des paramètres des procédés de culture des microorganismes', Doctorat, Ouargla, Algérie, pages 10-13, 2017.
- [10] Fernando ,s, karra, P. , hernandez , R et Jha, S.K.(2007). Effect of incompletely converted soybean oil on biodiesel quality. *Energy* , volume 32,p844-851.
- [11] Knothe, G K h Gerpen, V, (2005) .Voyo biodiesel The biodiesel handbook pp.81-82 AOCS Press, Champaign Illinois USA.
- [12] Knothe, G Krahl, Gerpen V ( 2005a). C tan numbho ombu on why vegetable oil and h derivativ uitable as diel, The biodiesel handbook pp .72 80 AOCS Press, Campaign Illinois USA.
- [13] National renewable Energy laboratory.(2009).Biodiesel handling and use guide .PP.1-56.

- [14] Mia, X, et Wu, Q, (2006). Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil . Bioresource technology, volume 97, numéro 6, P.841-846.
- [15] Imahara, h., Minami, E. et Saka, S. (2006). Thermodynamic study on cloud point of biodiesel with its fatty acid composition. Fuel, volume 85 , numéro 12, p.1666-1670.
- [16] Hart Energy Consulting . (2007). Establishment of the Guidelines for the Development of Biodiesel Standards in the APPEC Région Asia Pacific Economie Coopération, P.1-136.
- [17] Stansell, G.R , Gray, V.M. et Sym, S.D. (2012). Microalgal fatty acid composition : implications for biodiesel quality. journal of applied phycology, volume 24, numéro 4 , p.791-801.
- [18] Seregin, E.P., A.A., Bugai, V.T., Makarov, A.A., Sarantidi, P .G. et Skovorodin, G.B. (1975). Lubricity of diesel fuels . Chemistry and Technology of Fuels and Oils , volume 11, numéro 5, p.360-363.
- [19] Roseli Ap. Ferrari<sup>1</sup>, Anna Leticia M. Turtelli Pighinelli<sup>2</sup> and Kil Jin Park<sup>2</sup>. Biodiesel Production and Quality. Food Technology Institute. Campinas State University. PP288.
- [20] : geneste, b.g.k.d.f., le moteur diesel. 2003.
- [21] : NDIAYE, E.h.I., CARACTÉRISATION THERMOPHYSIQUE DES BIODIESELS : VITESSE DUSON, DENSITÉ, COMPRESSIBILITÉ, in ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES EXACTES
- [22] : NEDELLEC., 2009 Effets des carburants de type « biodiesel » sur les émissions des moteurs diesels européens et sur la toxicité des particules émises. Seine, .
- [23] : génératrice. énergies-renouvelables, 2017
- [24] : <https://ressources-naturelles.canada.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-transports-carburants-remplacement/carburants-remplacement/biocarburants/biodiesel/3510>
- [25] <https://natural-resources.canada.ca/energy/energy-offices-and-labs/canmetenergy/devon-ab-research-centre/bioenergy-and-biofuels/23373>
- [26] <https://www.neste.com/investors/market-data/biodiesel-prices>
- [27] : BRODEUR C., CLOUTIER J., CROWLEY D., DESMEULES X., PIGEON S. and ST-ARNAUD R., 'La production de biodiesel à partir de cultures oléagineuses', Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Publication no EVC 031, pages 1-4,

- [28] La production de biodiesel à partir de cultures oléagineuses, Publication no EVC 031 Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2008.pp 26-28.
- [29]. Fuse T., Kusu F. et Takamura K. J., 1997. Determination of acid values of fats and oils by flow injection analysis with electrochemical detection, *Pharm. Biomed. Anal.* 15, 1515-1519.
- [30]. Bereau D., 2001. Huiles et fractions insaponifiables de huit espèces de palmiers amazoniens, Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 154.
- [31]. Blin J., Brunschwig C., Chapuis A., Changotade O., Sidibe S. S., Noumi E. S. et Girard P., 2013. Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines-towards specifications for a standard in West Africa, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 580-597.
- [32]. Srivastava A. et Sahai P., 2013. Vegetable oils as lube basestocks : A review, *Afr. J. Biotechnol.*, 12, , 880-891
- [33]. Karmakar A., Karmakar S. et Mukherjee S., 2010. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production, *Bioresource Technology*, 101, 7201-7210.
- [34]: <https://www.envoituresimone.com/code-de-la-route/cours/environnement/eco-conduite/biodiesel>
- [35]: HSE Publication L138 Dangerous Substances and Explosive Atmosphere Regulations 2002 Approved Code of Practice. ISBN 0717622037
- [36]: <https://fastercapital.com/fr/contenu/La-chimie-derriere-le-biodiesel--comprendre-la-science-des-carburants-verts.html>
- [37]: <https://biodiesel.e-monsite.com/pages/suite/bibliographie.html00>
- [38]: Nikiema, J., and M. Heitz. "Le biodiesel. I. Caracteristiques, atouts et limites--une synthese." *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 35, no. 1, Jan. 2008, pp. 95+. *Gale Academic OneFile*,
- [39]: <https://www.letemps.ch/economie/finance/une-etude-releve-limites-biocarburants>
- [40] : BALLERINI. D et ALAZARD-TOUX. N, les Biocarburants, Etats de lieux, Perspectives et enjeux du développement. Institut Français du Pétrole (IFP). France. Technip, 2006 , 348p.