



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DJILLALI LIABES – SIDI BEL ABBES  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de **DOCTEUR EN SCIENCES**

Par : **Abdelkader BENDRISS**

**Spécialité** : Génie Mécanique

**Option** : Energétique

**Thème**

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES  
BIOCARBURANTS ET DE LEURS PROPRIÉTÉS SUR LE  
FONCTIONNEMENT DES MOTEURS À COMBUSTION  
INTERNE**

Devant le jury composé de : Messieurs

KHALFI Ali	Pr.	Université Djillali Liabès de SBA	Président
LASBET Yahia	MCA	Université Ziane Achour de Djelfa	Directeur de thèse
MAKHLOUF Mohammed	Pr.	Université Djillali Liabès de SBA	Co-Directeur de thèse
LAOUEDJ Samir	Pr.	Université Djillali Liabès de SBA	Examineur
AIDAOUI Lakhdar	MCA	Université Ziane Achour de Djelfa	Examineur
BOUSBAA Hamza	MCA	Ecole nationale polytechnique d'Oran	Examineur

**Année Universitaire 2020/2021**

## ملخص

تسبب استخدام الوقود الأحفوري في تلوث البيئة، ونجم عن هذا زيادة الاحتباس الحراري. لتصحيح هذا الوضع أصبح من الضروري استخدام مصادر طاقة أنظف أخرى. في هذا السياق، يتمتع الوقود الحيوي بإمكانيات كبيرة. وقود الديزل الحيوي هو وقود حيوي له خصائص فيزيائية وكيميائية مماثلة لخصائص الديزل الأحفوري. تتمثل إحدى أهم خصائص وقود الديزل الحيوي مقارنة بأنواع الوقود الحيوي الأخرى على أنه يمكن استخراجه من مجموعة متنوعة من المواد الخام، لذلك تختلف تركيباتها وقد تختلف خصائصها الفيزيائية والكيميائية من وقود إلى آخر مما يؤدي إلى حدوث اختلافات في استجابات المحرك من حيث الأداء والاحتراق والانبعاثات الملوثة بشكل خاص.

كجزء من هذه الأطروحة، تم إجراء تحقيقين إحصائيين. أول تحقيق إحصائي تم إجراؤه على 22 خاصية فيزيائية كيميائية لـ 34 مادة خام، وذلك لإخراج الخصائص الفيزيائية والكيميائية الرئيسية، تمت مناقشة الارتباطات المختلفة الملحوظة وشرحها وفقًا لتركيب الأحماض الدهنية ودرجة عدم التشبع، ثم تم اختيار خمسة خصائص كالخصائص الفيزيائية والكيميائية الرئيسية. التحقيق الثاني هو استخدام هذه الخصائص الخمسة وتحليل تأثيرها على استجابات محرك ليسر-بيتر، تم تحليل 15 نوعًا من أنواع الوقود الحيوي ذات الخصائص الفيزيائية والكيميائية المختلفة، وقد لوحظ أن استجابات المحرك تختلف من وقود إلى آخر. تمت مناقشة نتائج الارتباطات بين الخصائص الفيزيائية والكيميائية الرئيسية واستجابات المحرك من حيث الجوانب الأساسية لكيمياء الوقود وعواقبها على الأداء الفعلي للمحرك.

بالإضافة إلى ذلك، تم نمذجة الديناميكية الحرارية للاحتراق في محرك الاحتراق الداخلي، لفهم تأثير الخصائص الفيزيائية والكيميائية الرئيسية على مسار الاحتراق في محرك ديزل ليسر-بيتر، باستعمال 7 أنواع من الوقود وهي الديزل القياسي و 6 أنواع من الوقود الحيوي وهي (الزيوت المائدة المستعملة، الشحوم الحيوانية، زيت النخيل، و مزيج B10 و B20 و B30 من مياه الصرف من معاصر الزيتون). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن أنواع الوقود الحيوي الستة أعطت أداءً مشابهًا لأداء الديزل مع انخفاض كبير في الانبعاثات الملوثة، وأظهر التحليل الإحصائي للنتائج توافقًا جيدًا بين النتائج التي تم الحصول عليها ونتائج المراجع.

**الكلمات المفتاحية:** الوقود الحيوي؛ ديزل حيوي؛ الخصائص الفيزيائية والكيميائية؛ التحليل الإحصائي أداء محرك احتراق داخلي.

## Résumé

L'utilisation des énergies fossiles a engendré une pollution de l'environnement et a contribué au réchauffement climatique. Pour remédier à cette situation, le recours à d'autres sources d'énergies plus propres est indispensable. Dans ce contexte, les biocarburants présentent un potentiel non négligeable. Le biodiesel est un biocarburant qui possède des propriétés physico-chimiques similaires à celle du diesel. L'une des particularités du biodiesel par rapport aux autres types de biocarburants est le fait qu'il peut être produit à partir d'une variété de matières premières. Par conséquent, leurs compositions sont différentes et leurs propriétés physico-chimiques peuvent différer d'un carburant à un autre. Ceci induit des variations des réponses du moteur en termes de performances, de combustion et surtout des émissions polluantes.

Dans le cadre de ces travaux thèse deux investigations statistiques ont été menées. La première investigation statistique a été effectuée sur 22 propriétés physico-chimiques de 34 matières premières, afin de sortir les propriétés physico-chimiques principales, les différentes tendances observées ont été discutées et expliquées en fonction de la composition en acides gras et en degré d'insaturation, cinq propriétés ont été choisies comme propriétés physico-chimiques principales. La deuxième investigation est d'utiliser ces cinq propriétés et d'analyser leurs l'influence sur les réponses d'un moteur Lister Petter, 15 carburants de différentes propriétés ont été analysés, il a été remarqué que les réponses du moteur varient d'un carburant à l'autre. Les résultats des corrélations entre les propriétés physico-chimiques principales et les réponses du moteur ont été discutés en fonction des aspects fondamentaux de la chimie des carburants et des conséquences qu'elles ont sur le fonctionnement réel du moteur.

En outre, une modélisation thermodynamique de la combustion dans un MCI a été menée pour comprendre l'influence des propriétés physico-chimiques principales sur le déroulement de la combustion dans un moteur diesel Lister Pitter, alimenté par 7 carburants à savoir le diesel standard et 6 types de biodiesels à base (des huiles de friture usagées ; des graisses animales ; des huiles de palme ; et les mélanges de B10, B20 et B30 issus des eaux usées des pressoirs à olives). Les résultats obtenus ont montrés que les 6 carburants modélisés donnent des performances comparables à celles du gazole avec une réduction significative des émissions polluantes, l'analyse statistique des résultats montre une bonne concordance des résultats obtenus et les résultats de la littérature.

**Mots clés :** Biocarburants ; Biodiesels ; Propriétés Physico-chimiques ; Analyse Statistique ;  
Fonctionnement de moteur CI.

---

## Abstract

The use of fossil fuels has caused environmental pollution and contributed to global warming. To remedy this situation, the use of other sources of cleaner energy is essential. In this context, biofuels have significant potential. Biodiesel is a biofuel that has physicochemical properties similar to that of diesel. One of the peculiarities of biodiesel compared to other types of biofuels is the fact that it can be produced from a variety of raw materials. Therefore, their compositions are different and their physicochemical properties may differ from one fuel to another. This induces variations in engine responses in terms of performance, combustion and especially polluting emissions.

As part of this thesis work, two statistical investigations were carried out. The first statistical investigation was carried out on 22 physicochemical properties of 34 raw materials, in order to bring out the main physicochemical properties, the various trends observed were discussed and explained according to the fatty acid composition and the degree of unsaturation, five properties were chosen as the main physicochemical properties. The second investigation is to use these five properties and analyze their influence on the responses of a Lister Petter engine, 15 fuels of different properties were analyzed, it was noticed that the engine responses vary from fuel to the other. The results of the correlations between the main physicochemical properties and the engine responses were discussed in terms of the fundamental aspects of fuel chemistry and the consequences they have on the actual functioning of the engine.

In addition, thermodynamic modeling of combustion in an ICE was carried out to understand the influence of the main physicochemical properties on the course of combustion in a Lister Pitter diesel engine, powered by 7 fuels namely standard diesel and 6 types of biodiesel based (used frying oils; animal fats; palm oils; and blends of B10, B20 and B30 from wastewater from olive presses). The results obtained showed that the 6 modeled fuels give performances comparable to those of diesel with a significant reduction in polluting emissions, the statistical analysis of the results shows a good agreement between the results obtained and the results of the literature.

**Keywords:** Biofuel; Biodiesel; Physical-chemical properties; Statistical analysis; CI engine functioning.

---

## **Bibliographie de l'auteur**

### **I. Publications dans des revues avec comité de lecture**

A. BENDRISS, C. KEZRANE, Y. LASBET, S. AWAD, K. LOUBAR, M. MAKHLOUF. "Experimental Investigation on the influence of a Biodiesel (Waste Cooking Oil) on the performance and Exhaust Emissions of a compression ignition engine". JESA n°4-6/2017, 361-378.

### **1- Actes de congrès avec comité de lecture**

1. A. BENDRISS, C. KEZRANE, Y. LASBET, M. MAKHLOUF, "Numerical study of low temperature combustion strategies", The Third International Conference on FRACTURE MECHANICS "Engineering Applied Fracture Mechanics and Environment", Chlef, 27-30 November 2016. Algeria.
2. C. KEZRANE, A. BENDRISS, K. LOUBAR, A. SARY, A. LIAZID, M. TAZEROUT, "Comparaison des émissions polluantes d'un moteur diesel alimenté avec quatre carburants", Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution ICEMAEP2016, Constantine, 30-31 October 2016 .
3. A. BENDRISS, C. KEZRANE, Y. LASBET, S. AWAD, K. LOUBAR, M. MAKHLOUF, M. TAZEROUT, "Performance and Exhaust Emissions of a Biodiesel (Waste Cooking Oil) Fueled Compression Ignition Engine", Fourth International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution, ICEMAEP2018, Constantine, Algeria. April 29-30, 2018.
4. A. BENDRISS, C. KEZRANE, Y. LASBET, M. MAKHLOUF, K. LOUBAR, "Emissions evaluation of Waste Cooking Oil Biodiesel in a Compression", IV. ECOCEE, 17-18 June 2019, Istanbul Turkey.
5. A. BENDRISS, C. KEZRANE, Y. LASBET, M. MAKHLOUF, "Analyse de la combustion et les émissions d'un biodiesel à base des huiles de friture usagées dans un MCI", ERMA'19 Relizane, Algérie. Le 17 et 18 février 2020.

## Remerciements

Je remercie d'abord DIEU le tout puissant pour m'avoir donné la force qui m'a permis de finaliser ce travail malgré les épreuves que j'ai eu durant la période de rédaction de la thèse.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes directeurs de thèse le Docteur Yahia LASBET, Maitre de Conférence A à l'université de Djelfa, et le Professeur Mohammed MAKHLOUF, Professeur à l'université de Sidi Bel Abbes, qui ont encadrés mes recherches. Leurs aides scientifiques et leurs critiques constructives, leurs confiances ainsi que leurs soutiens amicaux m'ont été d'un grand recours.

Je tiens à remercier également le Docteur Khaled LOUBAR, Maître de Conférence à l'Institut Mines-Télécom de Nantes, et Cheikh KEZRANE, Maitre de Conférence A à l'université de Djelfa, pour ses conseils toujours judicieux, ses contributions à ce travail, ses aides inestimables lors de m'avoir accompagné avec des mesures expérimentaux.

Une très grande reconnaissance va au Pr. Ali KHALFI, Professeur à l'université de Sidi Bel Abbes, pour l'honneur qu'il nous fait de présider le jury de cette thèse et pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à notre travail.

J'adresse également mes sincères remerciements au Professeur Samir LAOUEDJ, Pr. à l'université de Sidi Bel Abbes, d'avoir accepté de juger ce travail et d'apporter ses critiques tant constructives.

Je remercie chaleureusement le Docteur Lakhdar AIDAOU, Maitre de Conférence A à l'université de Djelfa, pour avoir bien voulu examiner ce travail et de contribuer par ces conseils tant souhaités.

Comme je remercie infiniment et je suis très honoré que le docteur Hamza BOUSBAA, Maitre de Conférence A à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, d'avoir accepté de prendre part à l'appréciation de ce travail et d'apporter ses suggestion congruentes.

Je tiens également à exprimer mon sincère remerciement à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce travail exceptionnellement au Docteur Kamel ZOUGGAR.

Finalement, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents, mon épouse et mes enfants, mes frères et sœurs, pour leurs affections, encouragements et soutien tout au long de ces années de thèse.

# Table des matières

<b>Principales notations</b> .....	<b>I</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>IV</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>VI</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etat de l'art</b> .....	<b>5</b>
<b>I.1. Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>I.2. Les biocarburants</b> .....	<b>6</b>
I.2.1. Les biogaz .....	6
I.2.2. Le bioéthanol .....	7
I.2.3. Le biodiesel.....	7
I.2.4. La bio-huile.....	8
<b>I.3. Classification des biocarburants</b> .....	<b>9</b>
I.3.1. Biocarburants de première génération .....	9
I.3.1.1. La filière Ethanol .....	9
I.3.1.2. La filière huiles végétales .....	10
I.3.1.3. La filière Biodiesel.....	10
I.3.1.4. Autres filières : le Bio méthane.....	10
I.3.2. Biocarburants de deuxième génération .....	11
I.3.3. Biocarburants de troisième génération.....	12
<b>I.4. Procédés de production des biocarburants</b> .....	<b>13</b>
I.4.1. Les techniques de transformation .....	13
I.4.1.1. La voie Thermochimique .....	13
I.4.1.2. La voie Chimique.....	17
I.4.2. La réaction de transestérification et le biodiesel.....	17
I.4.2.1. Catalyse basique.....	18
I.4.2.2. Catalyse acide .....	20
I.4.2.3. Catalyse hétérogène .....	20
I.4.2.4. Catalyse enzymatique .....	21
I.4.2.5. Transestérification à catalyse basique chauffée par les micro-ondes.....	22
I.4.2.6. Transestérification sous assistance des ondes ultrasonores .....	22
I.4.2.7. Transestérification non catalysée .....	23
I.4.3. L'influence des procédés de production sur les propriétés des biocarburants : .....	25
I.4.3.1. Effet sur le rendement .....	26

I.4.3.1. Effet sur les propriétés physico-chimiques .....	28
I.4.3. Procédé de production des biocarburants de première génération .....	29
I.4.3.1 Avantages .....	31
I.4.3.2 Critiques .....	33
I.4.4. Procédé de production des biocarburants de deuxième génération .....	34
I.4.4.1. Avantages .....	36
I.4.4.2. Critiques .....	36
I.4.5. Procédé de production des biocarburants de troisième génération .....	37
I.4.5.1. Avantages et perspectives d'avenir .....	40
I.4.5.2. Critiques .....	41
<b>I.5. Le biodiesel ailleurs dans le monde .....</b>	<b>41</b>
<b>I.6. Situation des biodiesels en Algérie et en Afrique .....</b>	<b>42</b>
<b>Chapitre II : Propriétés physico-chimique des biocarburants.....</b>	<b>45</b>
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>46</b>
<b>II.2. Les Caractéristiques principales des biocarburants .....</b>	<b>46</b>
<b>II.3. Le biodiesel comme carburant .....</b>	<b>49</b>
<b>II.4. Matières premières utilisés pour la production du biodiesel .....</b>	<b>50</b>
II.4.1. Les huiles végétales comestibles .....	50
II.4.2. Les huiles végétales non comestibles .....	51
II.4.3. Les huiles usées de cuisson comme source de biodiesel .....	52
<b>II.5. Propriétés physico-chimiques du biodiesel .....</b>	<b>52</b>
II.5.1. Indice de cétane .....	53
II.5.2. Propriétés d'écoulement à froid .....	54
II.5.3. Densité .....	55
II.5.4. Viscosité .....	56
II.5.5. Point d'éclair .....	57
II.5.6. Stabilité oxydation.....	58
II.5.7. L'indice d'iode.....	59
II.5.8. Lubricité .....	60
II.5.9. Autres propriétés.....	60
II.5.9.1. Cendres sulfatées .....	60
II.5.9.2. Soufre .....	61
II.5.9.3. Métaux alcalins de la terre.....	61
II.5.9.4. Contenu du méthanol ou de l'éthanol.....	61



II.5.9.5. Corrosion de bande de cuivre .....	62
II.5.9.6. Teneur en phosphore .....	62
II.5.9.7. Résidus de carbone Conradson .....	62
II.5.9.8. Teneur d'ester .....	63
II.5.9.9. Température distillation.....	63
II.5.9.10. Contamination totale.....	63
II.5.9.11. Eau et Sédiments .....	64
II.5.9.12. Indice d'acide .....	64
II.5.9.13. Glycérol libre.....	65
II.5.9.14. Glycérine totale.....	65
II.5.9.15. Mono-glycéride, di-glycéride et triglycéride .....	65
II.5.9.16 Ester méthylique d'acide linoléique et contenu de poly-insaturation .....	66
<b>II.6. Effet de la matière première sur les propriétés physiques et chimiques du biodiesel.....</b>	<b>66</b>
<b>II.7. Propriétés physico-chimiques des biocarburants et fonctionnement des moteurs.....</b>	<b>67</b>
II.7.1. Effet sur la performance du moteur.....	67
II.7.1.1. Effet sur la puissance (BP).....	67
II.7.1.2. Effet sur l'efficacité thermique (BTE) .....	69
II.7.1.3. Effet sur la consommation spécifique du carburant (BSFC) .....	72
II.7.2. Effet sur la combustion.....	74
II.7.2.1. Effet sur la pression cylindrique et température de combustion .....	74
II.7.2.2. Effet sur le délai d'auto-inflammation et la durée de combustion .....	77
II.7.3. Effet sur les émissions polluantes.....	79
II.7.3.1. Hydrocarbures imbrulés (HC) .....	79
II.7.3.2. Monoxyde de carbone (CO) .....	81
II.7.3.3. Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ).....	83
II.7.3.4. Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ) .....	85
II.7.3.5. Fumée et particules (PM).....	88
<b>Chapitre III : Corrélations entre les propriétés physico-chimiques des biodiesels.....</b>	<b>90</b>
<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>91</b>
<b>III.2. Méthode d'analyse.....</b>	<b>91</b>
III.2.1. Analyse en composantes principales.....	91
III.2.2. Régression linéaire .....	92
<b>III.3 Matières premières et propriétés .....</b>	<b>92</b>
<b>III.4. Analyses statistiques des propriétés des biodiesels :.....</b>	<b>93</b>

III.4.1 Statistiques descriptives des propriétés : .....	95
III.4.2. Degré d'insaturation .....	96
III.4.3. Indice d'iode.....	96
III.4.4. Indice de cétane .....	98
III.4.5. Densité.....	101
III.4.6. Pouvoir calorifique .....	103
III.4.7. Viscosité cinématique .....	105
III.4.8. Point d'éclair.....	106
III.4.9. Propriétés d'écoulement à basse température .....	109
III.4.10. Teneur en carbone .....	112
III.4.11. Température distillation .....	112
III.4.12. Stabilité d'oxydation .....	115
<b>III.5. Conclusion .....</b>	<b>118</b>
<b>Chapitre IV : L'influence des propriétés des biodiesels sur le fonctionnement des moteurs.....</b>	<b>119</b>
<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>120</b>
<b>IV.2. Analyses descriptives .....</b>	<b>120</b>
IV.2.1. Analyses des propriétés physico-chimiques.....	122
IV.2.1. Analyses des réponses moteur .....	122
<b>IV.2. L'influence sur les performances du moteur.....</b>	<b>124</b>
IV.2.1. Consommation spécifique.....	124
IV.2.2. Rendement effectif :.....	125
IV.2.3. Relation du rendement effectif avec consommation spécifique.....	125
IV.2.4. Température des gaz d'échappement :.....	128
<b>IV.3. L'influence sur la combustion .....</b>	<b>130</b>
IV.3.1. Délai d'auto-inflammation :.....	130
IV.3.2. Durée de combustion .....	132
IV.3.3. Pression cylindrique.....	133
<b>IV.4. Emissions polluantes.....</b>	<b>134</b>
IV.4.1. Les oxydes d'azote.....	134
IV.4.2. Le monoxyde de carbone (CO).....	137
IV.4.3. Les hydrocarbures imbrûlés (HC).....	138
IV.4.4. Les particules .....	139
<b>IV.5. Conclusion .....</b>	<b>142</b>
<b>Chapitre V : Modélisation de la combustion d'un biodiesel dans un MCI.....</b>	<b>143</b>

<b>V.1. Introduction .....</b>	<b>144</b>
<b>V.2. Modèle thermodynamique.....</b>	<b>145</b>
V.2.1. Hypothèses du modèle.....	145
V.2.2. Equations du modèle .....	146
V.2.2.2. Modèle de calcul de la chaleur massique à volume constant .....	147
V.2.2.3. Modèle de calcul de dégagement de chaleur .....	148
V.2.2.4. Modèle de calcul de la chaleur perdue à travers des parois du cylindre.....	148
V.2.2.5. Modèle de calcul du coefficient d'échange de chaleur.....	149
<b>V.4. Résultats et discussions .....</b>	<b>153</b>
V.4.1. Analyse de la combustion.....	154
V.4.1.1. Pression cylindre .....	155
V.4.1.2. Début de l'injection et début de combustion.....	157
V.4.1.3. Taux de dégagement de chaleur .....	160
V.4.1.4. Fraction de carburant brûlée.....	164
V.4.1.5. Délai d'auto-inflammation .....	164
V.4.1.6. Durée de la combustion :.....	166
V.4.2. Performances du moteur.....	167
V.4.2.1. Consommation spécifique de carburant .....	167
V.4.2.2. Rendement effectif .....	169
V.4.3. Les émissions polluantes .....	170
V.4.3.1. Les Oxydes d'azote .....	170
V.4.3.2. Monoxyde de carbone .....	171
V.4.3.3. Les hydrocarbures imbrûlés (HC) .....	173
V.4.4.4. Les particules (PM) .....	174
<b>V.5. Analyse statistique des résultats.....</b>	<b>175</b>
V.5.1 L'influence des propriétés des carburants sur la combustion.....	176
V.5.1 L'influence des propriétés des carburants sur les performances .....	177
V.5.1 L'influence des propriétés des carburants sur les émissions .....	179
<b>V.6. Conclusion.....</b>	<b>180</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>181</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>185</b>

## Principales notations

### Variables

$A$	surface des parois du cylindre	[m <sup>2</sup> ]
$a_{0-5}$	Coefficients de la loi polynomiale décrivant $C_v$	[-]
$D$	Alésage du moteur	[m]
$C_{1-2}$	Coefficients de la loi de Woschni	[-]
CO	Monoxyde de carbone	
CSC	consommation spécifique de carburant	[kg.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$C_u$	La cylindrée du moteur	[m <sup>3</sup> ]
$C_v$	Chaleur massique à volume constant du mélange des gaz	[J.g <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
DI	Degré d'insaturation	[-]
$Gr$	Nombre de Grashof	[-]
HC	Hydrocarbures imbrûlés	[%]
$h_c$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$h_f$	Enthalpie massique du mélange gazeux	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
IA	Indice d'acide	[mg KOH.g <sup>-1</sup> ]
IC	Indice de cétane	[-]
II	Indice d'iode	[-]
$k$	Energie cinétique	[J]
$m$	masse	[kg]
$\dot{m}_f$	Débit massique du combustible	[g.h <sup>-1</sup> ]
$N$	Vitesse de rotation du vilebrequin	[tn.min <sup>-1</sup> ]
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote	[p.p.m.]
$Nu$	Nombre de Nusselt	[-]
$P$	Pression	[bars]
PCFF	Point de colmatage du filtre à froid (CFPP)	[°C]
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	[MJ.kg <sup>-1</sup> ]
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	[MJ.kg <sup>-1</sup> ]
PE	Point d'éclair	[°C]
PEcoule	Point d'écoulement	[°C]
$P_{eff}$	Puissance effective du moteur	[kW]
PM	Particules	[%]
$Pr$	Nombre de Prandtl	[-]
PT	Point trouble	[°C]

$Q_{comb}$	Chaleur dégagée par la combustion	[J]
$Q_{parois}$	Chaleur perdu à travers les parois du cylindre	[J]
$R$	Constante universelle des gaz parfaits	[J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$r$	Constante massique des gaz parfaits	[J.g <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$R^2$	Coefficient de régression	[-]
$Re$	Nombre de Reynolds	[-]
SO	Stabilité d'oxydation	[h à 110°C]
$S_p$	Surface des parois du cylindre	[m <sup>2</sup> ]
$t$	Temps	[s]
$T$	Température	[K]
TD	Température Distillation	[°C]
TE	Températures des Gaz d'Echappement	[K]
$u$	Energie interne du gaz	[J]
$U_p$	Vitesse du piston	[m.s <sup>-1</sup> ]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$V_m$	Volume mort du cylindre	[m <sup>3</sup> ]

**Lettres grecques**

$\gamma$	Rapport des chaleurs spécifiques des gaz	[-]
$\Delta\theta_{comb}$	Durée de la combustion	[°]
$\eta_{eff}$	Rendement effectif du moteur	[%]
$\theta$	Position du vilebrequin	[°]
$\theta_0$	Début de la combustion	[°]
$\lambda$	Rapport bielle manivelle	[-]
$\rho$	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Indices**

$a$	Admission
$e$	Echappement
$g$	Gaz
$p$	Parois
$r$	Etat de référence

**Abréviations**

ACP	Analyse en Composantes Principales
ASTM	American Society for Testing and Materials
EEHV	Esters Ethyliques d’Huile Végétale
EMAG	Ester Méthylique d'Acide Gras (FAME)
EMHV	Esters Méthyliques d’Huile Végétale
EN	Norme Européenne
EUPO	Eaux usées des pressoirs à olives
HFU	huiles de friture usagées
MCI	Moteur à Combustion Interne
SG	Savitzky-Golay
TDC	Taux de Dégagement de Chaleur

## Liste des figures

Figure I.1. Voies de production des biocarburants de la biomasse .....	14
Figure I.2. Procédé de gazéification associé au procédé de synthèse de Fisher-Tropsch .....	14
Figure I.3. Produits majoritaires obtenus par pyrolyse de la biomasse.....	15
Figure I.4 : Schéma proposé par Ji et al. 2006 pour le système ultrasonore .....	23
Figure I.5 : Procédé de transestérification supercritique par cogénération .....	24
Figure I.6. Matières premières, procédés et biocarburants obtenus.....	30
Figure I.7. Processus de fabrication des biocarburants de première génération .....	31
Figure I.8. Processus de fabrication des filières de deuxième génération .....	35
Figure I.9. Processus de la fabrication des biocarburants à partir des micro-algues .....	38
Figure I.10. Evolution de la demande et de l'offre pour le Diesel en Algérie.....	43
Figure II.1. Poids spécifique, $T = 15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	51
Figure III.1. Corrélations entre l'indice iode et les approches de calcul de degré d'insaturation en ACP et Régression linéaire.....	97
Figure III.2. Corrélations entre l'indice Cétane et les propriétés physico-chimiques en ACP et Régression linéaire.....	99
Figure III.3. Corrélations entre la densité et les propriétés physico- chimiques en RL.....	102
Figure III.4. Corrélations entre PC et les propriétés physico-chimiques en ACP et RL.....	104
Figure III.5. Cercles de corrélations de la viscosité cinématique et les propriétés physico-chimiques en ACP et Régression linéaire.....	107
Figure III.6. Corrélations entre le PE et les propriétés physico-chimiques en ACP et RL...	108
Figure III.7. Corrélations entre les PEBT et les propriétés physico- chimiques en ACP et Régression linéaire.....	110
Figure III.8. Corrélation entre la teneur de carbone et les propriétés physico-chimiques.....	113
Figure III.9. Corrélation entre la température distillation et les propriétés physico-chimiques.....	114
Figure III.10. Corrélation entre la stabilité d'oxydation et la teneur en soufre et IC.....	116
Figure IV.1 Corrélations entre Rendement (BTE), CSC(BSFC) et les propriétés physico-chimiques principales des biodiesels en ACP .....	126
Figure IV.2 Corrélations entre température d'échappement (TE), la richesse et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP.....	129
Figure IV.3 Corrélations entre le délai d'auto-inflammation (DA), la durée de combustion (DC) et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP.....	131

Figure IV.4. Corrélations entre les émissions polluantes et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP.....	136
Figure V.1. Synthèse des modèles physiques utilisés dans les MCI .....	145
Figure V.2 : Comparaison des modèles de calcul du coefficient de transfert thermique sur le moteur Lister Petter.....	152
Figure V.3 : Evolution de la pression cylindrique en fonction de l'angle vilebrequin.....	156
Figure V.4 : Evolution de la température cylindrique en fonction de l'angle vilebrequin....	157
Figure V.5 : Courbes de pression d'injection à faible et pleine charge moteur.....	158
Figure V.6 : Courbes de la dérivée de la pression du cylindre à faible et pleine charge moteur .....	159
Figure V.7 : Taux de dégagement de chaleur en faible et pleine charge moteur sans filtrage du signale de pression cylindre.....	160
Figure V.8 : Taux de dégagement de chaleur en faible et pleine charge moteur avec filtrage du signale de pression cylindre.....	162
Figure V.9 : Taux de la fraction du carburant brulée en faible et pleine charge moteur.....	163
Figure V.10 : Délai d'auto-inflammation en fonction de la puissance moteur.....	165
Figure V.11 : Durée de combustion en fonction de la puissance moteur.....	167
Figure V.12 : Consommation de carburant spécifique en fonction de la puissance moteur...	168
Figure V.13 : Rendement effectif en fonction de la puissance moteur.....	169
Figure V.14 : Evolution de la concentration des NOx dans les gaz d'échappement.....	171
Figure V.15 : Evolution de la concentration des CO dans les gaz d'échappement.....	172
Figure V.16 : Evolution de la concentration des HC dans les gaz d'échappement.....	173
Figure V.17 : Evolution des concentrations des particules PM .....	175
Figure V.18 Corrélations entre les paramètres de la, la combustion et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP.....	176
Figure V.19 Corrélations entre les performances du moteur et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP.....	178
Figure V.20 Corrélations entre les émissions du moteur et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP.....	179



## Liste des tableaux

Tableau I.1. Données relatives à la transestérification supercritique .....	25
Tableau I.2 : propriétés influençant sur le rendement du procédé de transestérification .....	27
Tableau II.1. Composition en acides gras (%) des huiles végétales.....	51
Tableau III.1. Résumé des différentes propriétés physico-chimiques du biodiesel pour toutes les matières premières à analysées .....	94
Tableau III.2. Statistiques descriptives des propriétés.....	95
Tableau III.3. Matrice de corrélation des matières premières (Coefficient de corrélation de Pearson).....	117
Tableau IV.1 : Propriétés physico-chimiques des biodiesels testés dans le moteur LP.....	120
Tableau IV.2 : Réponses du moteur LP alimenté par biodiesels en différentes puissances...	121
Tableau IV.3 : Statistiques descriptives des propriétés physico-chimique .....	122
Tableau IV.4 : Statistiques descriptives des réponses moteur en différentes puissances.....	123
Tableau IV.5 : Matrice de corrélations des 15 carburants testés dans un moteur.....	141
Tableau V.1. Coefficients utilisés pour calculer $C_v$ .....	147
Tableau V.2. Coefficient C1 et C2 de la corrélation de Woschni .....	151
Tableau V.3. Spécification du moteur d'essai.....	154
Tableau V.4. Propriétés de biodiesel d'HFU et de Pétrole-diesel.....	154

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La limitation de la disponibilité des carburants à base de pétrole et les préoccupations environnementales ont fait créer la nécessité de trouver de sources de carburants alternatifs tels que les biocarburants, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique, l'hydrogène, l'énergie nucléaire et ainsi de suite. Parmi toutes ces sources d'énergies alternatives, les biocarburants sont l'une des sources d'énergie alternatives potentielles qui peuvent répondre à une partie de la demande énergétique actuelle. Le concept de biocarburants remonte au 19<sup>ème</sup> siècle lorsque les chercheurs ont essayé d'utiliser l'huile végétale comme carburant pour les moteurs diesel. Mais les problèmes liés à l'utilisation d'huiles directement comme carburant et la disponibilité des carburants fossiles rendent le concept de combustibles d'huile végétale non rentable. En raison de l'épuisement rapide des carburants à base de pétrole, et la consommation croissante de carburants dans les pays en développement et les préoccupations environnementales conduit les chercheurs et les gouvernements à développer des carburants à base d'énergie renouvelable.

Les biocarburants sont des sources d'énergie qui sont produits à partir de la biomasse de la matière vivante. Les huiles végétales, les graisses animales, les huiles de cuisson et les déchets provenant des industries de transformation des aliments ont été utilisés comme matière première principale pour la production des biocarburants. En plus de ces sources, les micro-algues font également l'objet d'une grande attention en tant que source d'huile / lipides, en raison de la productivité élevée. Selon ses natures, les biocarburants peuvent être trouvés en état liquides ou gazeux, utilisés essentiellement pour le secteur des transports, ils peuvent être utilisés seuls ou en mélanges avec un carburant conventionnel. L'un des avantages de ces carburants alternatifs est leur utilisation dans des moteurs existants sans modifications ou avec des modifications minimales. Toutefois, ces carburants alternatifs peuvent être obtenus par des procédés divers (thermochimique ou biochimique). Par conséquent, leurs compositions sont différentes et leurs propriétés physico-chimiques peuvent varier d'un carburant à un autre. Ceci induit des variations sur les performances des moteurs en termes de rendement, de consommation spécifique et surtout des émissions polluantes.

Le biodiesel est un biocarburant qui possède des propriétés similaires au diesel conventionnel. De plus, il est renouvelable et émet moins d'émissions polluantes par rapport au pétrole-diesel lorsqu'il est brûlé. Comme tous les carburants, il a ses avantages et ses

inconvenients. Son premier avantage est qu'il peut être utilisé dans les moteurs à injection directe comme carburant pur ou sous forme de mélanges. La viscosité du biodiesel est entre 7 à 11 fois inférieure à celle de l'huile mère, ce qui améliore la pulvérisation et la volatilité du mélange air-carburant et rend la combustion plus complète. En plus, la viscosité plus élevée du biodiesel que celle du diesel conventionnel lui offre un meilleur pouvoir lubrifiant dans la chambre de combustion, ce qui réduit le frottement et l'usure des pièces mécaniques. Le point d'éclair élevé rend la manipulation du biodiesel plus sécurisée. L'indice de cétane plus élevé du biodiesel que celui du diesel, rend son inflammation plus rapide.

A cet effet, l'objet de ce travail de recherche est d'étudier l'influence des propriétés physico-chimiques des biocarburants sur les performances des moteurs à combustion interne. Pour réaliser l'étude, cette thèse est formée en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique sur les biocarburants et ses natures, la classification et les procédés de production. Ainsi que l'influence des paramètres de production des biocarburants comme : la température de réaction ; le type et la quantité du catalyseur ; la durée de réaction, sur le rendement et les propriétés physico-chimiques des biocarburants. Par la suite, les avantages et les inconvenients des procédés de production de chacune des trois générations des biocarburants. Enfin, la situation des biocarburants dans le monde et en Algérie.

Le deuxième chapitre est consacré aux propriétés physico-chimiques des biocarburants. D'une part, on a commencés à citer les différentes caractéristiques des biocarburants, les matières premières utilisées pour la production, ainsi que, les différentes propriétés physico-chimiques des biodiesel et leurs influences sur les moteurs à allumage par compression. D'autre part, représenter les études sur l'influence des propriétés physico-chimiques des biocarburants sur le fonctionnement du moteur en termes de performances, combustion, et émissions polluantes.

Dans le troisième chapitre, on procèdera à l'analyse statistique des propriétés physicochimique. On a commencés à citer les méthodes d'analyses statistiques d'actualité, plus précisément l'analyse en composantes principales et la régression linéaire. Par la suite, l'utilisation de ces méthodes pour analyser les corrélations existant entre les propriétés physico-chimiques, 34 matières premières de 22 propriétés physico-chimiques ont été prises en considération. Les résultats obtenus ont été expliqués, en termes interactions chimiques et

réponses moteurs. A partir d'analyse, la densité, la viscosité cinématique, l'indice de cétane, le pouvoir calorifique et le point d'éclair, ont été choisis comme propriétés principales pour le reste de l'étude.

Le quatrième chapitre, Analyse statistique de l'influence des propriétés physico-chimiques principales des biodiesels sur le fonctionnement des moteurs. La méthode d'analyse statistique ACP a été utilisée pour représenter les corrélations existant entre les propriétés physico-chimiques principales de 15 carburants testés dans un banc d'essais équipé d'un moteur Lister Petter sur le fonctionnement moteur en termes performance, combustion, et émissions polluantes. Les résultats ont été représentés sous forme des cercles et matrice de corrélations, des interprétations sur les fortes corrélations entre les propriétés physico-chimiques principales et les réponses du moteur ont été données, selon les principes de base de la thermodynamique et de la combustion.

Dans le cinquième chapitre, modélisation de la combustion dans un moteur à allumage par compression, alimenté par 7 carburants à savoir le diesel standard et 6 types de biodiesels à base (des huiles de friture usagées ; des graisses animales ; des huiles de palme ; et les mélanges de B10, B20 et B30 issus des eaux usées des pressoirs à olives). Le modèle thermodynamique de la combustion a été programmé en MATLAB, avec utilisation des mesures expérimentales recensées dans les laboratoires d'IMT atlantique de Nantes-France, réalisés sur un banc d'essai équipé d'un moteur Lister Petter, ces mesures sont réalisées sous différentes charges du moteur. Le signal de pression fourni par le banc d'essai est un signal qui comporte des bruits pour le lisser (filtrer) la méthode de Savitzky-Golay a été utilisée, ceci pour la bonne compréhension des réponses moteur en termes de combustion. Par la suite, la méthode d'analyse statistique ACP a été utilisée pour relier l'effet des propriétés physico-chimiques sur les résultats obtenus par le modèle thermodynamique et sur les réponses du moteur.

Enfin, nous achèverons notre manuscrit, par une conclusion générale, qui résumera les principaux résultats de notre étude.

# **Chapitre I : Etat de l'art**

## **I.1. Introduction**

Au cours des dernières décennies, la surexploitation des énergies fossiles a engendrée la pollution atmosphérique, qui est devenue comme une menace pour de nombreux pays, en raison de l'utilisation des sources d'énergie produisant des émissions de gaz toxiques. Ces sources sont principalement l'énergie pétrolière qui a révolutionnée l'industrie. Avec l'utilisation des sources énergétiques pétrolières et le développement remarquable de l'industrie, cela a conduit à des futurs dommages environnementaux nocifs. Aujourd'hui, nous assistons au phénomène du réchauffement climatique et à une menace pour la couche d'ozone qui protège la planète du rayonnement solaire. Les biocarburants sont l'une des solutions permettant de répondre à la demande énergétique mondiale, en plus d'être extraits d'une matière première renouvelable et biodégradable, ils sont moins polluants que le carburant fossile.

## **I.2. Les biocarburants**

Les biocarburants sont des sources d'énergie, produits à partir de la biomasse de la matière vivante de plantes ou de déchets industriels biodégradables [1]. Selon ses natures les biocarburants peuvent être trouvés en état liquides ou gazeux, utilisés essentiellement pour le secteur des transports. L'histoire du biocarburant a débuté en 1892, lorsque l'inventeur du moteur diesel Rudolph Diesel a testé pour la première fois l'huile d'arachide dans le moteur qu'il a inventé, le moteur à combustion interne, et qui porte son nom [2]. Les inconvénients majeurs de l'utilisation des huiles végétales sont essentiellement liés à leur viscosité élevée (environ 11 – 17 fois plus élevée que le carburant diesel) et à leur faible volatilité qui engendre la formation de dépôts dans les moteurs [3]. Donc ils doivent être traités avant de les utiliser comme carburant. Les biocarburants sont subdivisés en : bioéthanol, biodiesel, bio-huile, biogaz, liquides de Fischer-Tropsch et le bio-hydrogène [4]. Les biocarburants représentent une source d'énergie renouvelable, sans grand danger pour l'environnement et constituent ainsi une voie de développement soutenable et durable. En effet, ils contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre et de ce fait, à améliorer la qualité de l'air [5]. De plus, ils peuvent remplacer les carburants fossiles [6].

### **I.2.1. Les biogaz**

Le biogaz est le produit gazeux de la fermentation de matières organiques animales ou végétales riches en sucres par des bactéries méthanogènes anaérobies (digestion microbienne en absence d'oxygène) [7], soit par gazéification (craquage thermique) du bois [9]. Les boues

de station d'épuration, les effluents d'élevage et des industries agroalimentaires ainsi que les déchets ménagers constituent les principaux substrats. La production de bio-méthane se fait par la digestion anaérobie ou méthanisation. C'est un processus au cours duquel la matière organique est dégradée par des microorganismes et convertie en méthane et en dioxyde de carbone [7]. La biomasse subit premièrement un prétraitement afin d'améliorer sa biodégradabilité. Plusieurs cultures de bactéries entrent en action en vue de réaliser les diverses étapes de la fermentation méthanique. Celle-ci s'achève par la production de méthane ( $\text{CH}_4$ ) par les bactéries méthanogènes.

### **I.2.2. Le bioéthanol**

Le bioéthanol provient de la fermentation alcoolique de sucres simples par des levures ; les sucres simples doivent être obtenus à partir de la biomasse et les sources de la matière première pour la fabrication du bioéthanol sont :

- Les sucres simples ou amidon hydrolysé (dégradé) provenant de plantes consommables (canne à sucre, maïs, etc.) ; ce sont des agro-carburants.
- Les débris végétaux de toute sorte (résidus forestiers, copeaux issus de scieries ou de papeteries, etc.) riches en cellulose (éthanol cellulosique) ; la cellulose peut être hydrolysée en sucre simple fermentable.

L'éthanol produit par cette fermentation est combustible et peut être ajouté aux carburants conventionnels. Les alcools peuvent être utilisés comme additifs pour les carburants et dans d'autres cas, ils sont utilisés comme matière première pour la fabrication d'autres carburants ; dans des moteurs conçus pour cette utilisation. Le taux d'éthanol produit peut être en outre mélangé avec 5 à 10% de carburant de l'essence pour une utilisation dans les voitures normales [10]. Cependant, des pourcentages plus élevés (85%) d'éthanol sont nécessaires pour les véhicules spécialement adaptés [11].

### **I.2.3. Le biodiesel**

Le biodiesel (biogazol) est un biocarburant destiné à être utilisé dans les moteurs Diesel. Il est constitué d'un mélange d'esters éthyliques ou méthyliques des huiles végétales (EEHV ou EMHV) ou des graisses animales. Contrairement au pétro-diesel, qui est formé de plusieurs hydrocarbures composés uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène, le biodiesel contient de l'oxygène. Le biodiesel est par ailleurs biodégradable, ce qui n'est pas le cas du pétro-diesel.



Le biodiesel est élaboré à partir de substrats riches en matières grasses tels que les huiles végétales, les huiles de cuisson usées et les graisses animales. Les huiles végétales utilisées sont extraites de plantes oléagineuses cultivées spécifiquement pour leurs grains ou pour leurs fruits riches en matière grasse.

Le biodiesel présente les avantages suivants : amélioration de la performance du carburant, l'augmentation de lubricité, le nombre cétane et point d'éclair plus élevé par rapport aux diesel fossiles, plus faible toxicité pour les organismes vivants, la réduction des émissions polluantes d'échappement, et sa polyvalence pour une utilisation comme combustible [12-15]. Il est une source d'énergie renouvelable qui offre une meilleure sécurité de l'approvisionnement énergétique. Il est biodégradable [16, 17]. Il améliore également la qualité de l'environnement par des suies (particules) de moins nocives générées par les gaz d'échappement des véhicules. Le biodiesel lorsqu'il est mélangé avec du diesel fossile, crée un mélange de biodiesel adapté pour les moteurs diesel avec un minimum de modifications et augmente le rendement fonctionnel du moteur; avec une faible viscosité et une réduction des émissions de monoxyde de carbone [18], le biodiesel est facile à utiliser, non-toxique, et exempt de soufre [19] et des composés aromatiques [3]. Possédant un point d'éclair élevé facilite le stockage, et la présence d'une plus grande quantité d'oxygène dans le carburant biodiesel garantit la combustion complète des hydrocarbures. La production de biodiesel (esters méthyliques) à partir d'huiles végétales représente un autre moyen de production de combustibles liquides à partir de biomasse, et qui se développe rapidement en importance commerciale et en raison de la pertinence des fluctuations des prix du pétrole et les avantages environnementaux du processus d'offre. Actuellement, il est souvent ajouté au Diesel classique dans des pourcentages variables [20].

#### **1.2.4. La bio-huile**

Ce sont les produits liquides issus de la solvolysé ou de la pyrolyse de la biomasse (bois, huiles végétales et graisses animales). La bio-huile est un mélange complexe qui contient une grande variété de composés de différentes classes chimiques, tels les acides carboxyliques, les esters, les alcools, les aldéhydes, les cétones, les phénols, les alcènes et les aromatiques. En outre, les bio-huiles sont faciles à stocker et à transporter et peuvent être utilisées comme un biocarburant ou pour la fabrication de produits chimiques de grande valeur [21, 22].

### I.3. Classification des biocarburants

On distingue actuellement trois catégories des biocarburants, apparus plus ou moins chronologiquement :

- Les biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération.
- Les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération.
- Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération.

#### I.3.1. Biocarburants de première génération

Un biocarburant de première génération est un agro-carburant produit à partir de cultures destinées traditionnellement à l'alimentation, plus spécifiquement les organes de réserves des plantes oléifères ou encore à sucres.

Ce sont des carburants liquides issus de la transformation des matières végétales produites par l'agriculture (betterave, canne à sucre, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre, etc...). Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>). Ces combustibles ont des caractéristiques physico-chimiques différentes des produits pétroliers qu'ils vont remplacer. Ces biocarburants sont caractérisés par une commercialisation à grande échelle et par des technologies assimilées et des procédés de production relativement simples [5, 23]. Dans lesquels on peut distinguer les filières suivantes :

##### I.3.1.1. La filière Ethanol

- **Le bioéthanol** : est obtenu par la fermentation des levures de sucres simples issus des plantes (canne à sucre et betterave), ou de l'amidon issu des céréales (maïs et blé). Il peut être mélangé directement à l'essence à des teneurs allant de 5 à 26% ou à des taux encore plus élevés pour les véhicules dits flexibles introduits avec succès au Brésil [24]. L'éthanol peut remplacer partiellement ou totalement l'essence. Une petite proportion d'éthanol peut aussi être ajoutée dans du gazole, donnant Alors du gazole oxygéné, mais cette pratique est peu fréquente. La production de bioéthanol est largement dominée par le Brésil et les Etats-Unis.
- **L'éthyle-tertio-butyle-éther (ETBE)** est un dérivé (un éther) de l'éthanol. Il est obtenu par réaction entre l'éthanol et l'iso butène et il est utilisé comme additif à hauteur de 15 % à l'essence en remplacement du plomb [25]. L'iso butène est obtenu lors du raffinage du pétrole.

### **I.3.1.2. La filière huiles végétales**

De nombreuses espèces végétales sont oléifères comme le palmier à huile, le tournesol, le colza, le ricin. Les rendements à l'hectare varient d'une espèce à l'autre. L'huile est extraite par pressage (écrasement) à froid, à chaud, voire (pour un coût plus élevé) avec un solvant organique.

L'huile végétale brute (HVB, ou HVP) peut être utilisée directement, dans les moteurs diesels, pure ou en mélange, mais, notamment à cause de sa viscosité relativement élevée, l'utilisation d'une fraction d'huile importante nécessite l'usage d'un moteur adapté.

### **I.3.1.3. La filière Biodiesel**

Le biodiesel est obtenu par la transformation des triglycérides qui constituent les huiles végétales ; la transformation de ces huiles, avec du méthanol ou de l'éthanol, produit des esters d'Huile Végétale, respectivement méthyliques (EMHV) et éthyliques (EEHV). Le biodiesel est le plus connu et le plus consommé, il est produit à partir de plantes oléagineuses par transestérification ou craquage [26], à l'exemple du biodiesel synthétisé à partir de l'huile de colza en Allemagne et à partir de l'huile de palme en Malaisie [23].

### **I.3.1.4. Autres filières : le Bio méthane**

Le bio méthane est le principal constituant du biogaz issu de la fermentation méthanique (ou méthanisation) de matières organiques animales ou végétales riches en sucres (amidon, cellulose, plus difficilement les résidus ligneux) par des micro-organismes méthanogènes qui vivent dans des milieux anaérobies. Les principales sources sont les boues des stations d'épuration, les lisiers d'élevages, les effluents des industries agroalimentaires et les déchets ménagers. Les gaz issus de la fermentation sont composés de 65 % de méthane, 34 % de CO<sub>2</sub> et 1 % d'autres gaz dont le sulfure d'hydrogène et le d'azote. Le méthane est un gaz pouvant se substituer au gaz naturel (ce dernier est composé de plus de 95 % de méthane) [25]. Il peut être utilisé soit dans des moteurs à allumage commandé (technologie moteurs à essence) soit dans des moteurs dits dual-fuel.

Les limitations des biocarburants de première génération ont été identifiées à l'exception de l'éthanol produit à partir de la canne à sucre. A. Filemon et J. Uriarte [27] ont mis l'accent des recherches sur la nécessité de trouver de nouvelles ressources énergétiques renouvelables extraites de la biomasse, d'où un nouveau type de produit, en l'occurrence le biocarburant de deuxième génération.

### I.3.2. Biocarburants de deuxième génération

Afin de diminuer les effets négatifs associés aux biocarburants de première génération, la deuxième génération se développe progressivement. Un biocarburant de deuxième génération est obtenu à partir d'une biomasse dédiée au non-alimentaire, moins exigeante en termes de qualité de terre arable et en eau. Il s'agit plus spécifiquement de la biomasse ligno-cellulosique (lignine et cellulose) [5] associée aux parties non comestibles des plantes, aux déchets, aux résidus des récoltes agricoles, aux activités forestières, ainsi qu'à la fraction organique des déchets municipaux [27]. Il devient alors envisageable de valoriser les pailles, les tiges, les feuilles ou même des plantes à croissance rapide (*Miscanthus* et *Jatropha curcas*) dont l'huile est non comestible et qui suscite un engouement général de la part de la communauté scientifique en raison de son important potentiel pour la production du biodiesel.

Les biocarburants de deuxième génération sont des nouvelles filières purement énergétiques, aux meilleurs rendements et plus intéressantes sur le plan environnemental émergent progressivement, on peut distinguer :

**-Éthanol ligno-cellulosique,** La ligno cellulose [5], principal constituant des parties non alimentaires des végétaux, consiste en un assemblage complexe de deux polymères de sucres, la cellulose et l'hémicellulose, et d'un polymère essentiellement composé de motifs aromatiques (la lignine). La principale difficulté pour transformer cette matière première est de rendre les sucres fermentescibles sans dégradation excessive.

**-Diesel et kérosène synthétiques issus d'huile végétale,** Une autre approche permet d'utiliser les huiles végétales pour produire des hydrocarbures : il s'agit d'un procédé hydrogénation pour enlever l'oxygène (Hydrotreated Vegetable Oil). Les hydrocarbures issus de cette technologie ont d'excellentes qualités pour les gazoles : cétane élevé, absence de soufre et d'hydrocarbures aromatiques, propriétés à froid ajustables. Ces bases gazoles sont totalement compatibles avec le gazole actuel. Selon les sources d'huiles végétales, ce procédé convient également pour produire une base pour kérosène (bio kérosène). Hydrocarbures synthétiques par voies thermochimiques la voie indirecte (Biomasse ver Liquide) est un enchaînement d'étapes unitaires : gazéification de la biomasse, purification du gaz de synthèse produit, synthèse Fischer-Tropsch (FT) et hydro isomérisation pour produire des hydrocarbures. Pour ces différentes étapes, les technologies existent présentent des degrés de maturité inégaux et ne sont utilisées en général que pour traiter des charges fossiles. Il faut donc, d'une part, les adapter à

la biomasse et d'autre part, lever les verrous technologiques existants pour qu'elles atteignent l'échelle industrielle.

Le principal avantage des biocarburants de deuxième génération réside dans le fait que ces produits limitent l'incommodante dualité qui oppose la production des denrées alimentaires à celle des biocarburants, tout en permettant, c'est à espérer, une exploitation plus efficiente des terres agricoles.

### **I.3.3. Biocarburants de troisième génération**

Les biocarburants dits de troisième génération, dérivés de microbes et de micro-algues, s'imposeraient comme une issue exemptée des principaux inconvénients propres aux biocarburants de première et de deuxième générations. En effet, les micro-algues possèdent plusieurs avantages dont l'importante capacité de production de biomasse par hectare, la fréquence de récolte très importante, la diminution de l'utilisation d'eau potable ainsi que celle d'émission de gaz à effet de serre.

Les micro-algues sont des organismes photosynthétiques qui utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone. Les lipides accumulés par les micro-algues, pouvant atteindre jusqu'à 80 % de leur poids sec, sont principalement sous forme de triglycérides. Ces derniers peuvent ensuite être utilisés pour produire du biodiesel via une réaction appelée transestérification. Un des avantages de l'utilisation des micro-algues pour la production de biodiesel est leur croissance extrêmement rapide puisque certaines espèces peuvent doubler leur biomasse de une à trois fois en 24 heures.

Les avancées récentes ont montré que des espèces microbiennes comme la levure, les champignons (mycètes et champignons) et les micro-algues, peuvent être utilisées pour produire du biodiesel, du fait que ces organismes peuvent bio-synthétiser et stocker des quantités importantes d'acides gras, similaires à celles présentes dans les huiles végétales. Les algues sont recensées comme l'une des plus vieilles formes de vie sur terre ; elles sont présentes dans pratiquement tous les écosystèmes, dans une large variété d'espèces et qui présentent le taux de croissance le plus élevé de l'ensemble du règne végétal ; elles s'adaptent à des conditions environnementales très variées. Les cellules des algues sont de véritables usines biochimiques miniaturisées qui absorbent du CO<sub>2</sub> et produisent des lipides, des protéines et des hydrates de carbone. De plus, leur activité photosynthétique est beaucoup plus forte que celle des plantes terrestres et donc plus productives. Un grand nombre d'études s'intéressent à déterminer les

conditions optimales de la production de l'huile à partir des algues, aboutissent à des résultats prometteurs. En effet, il a été rapporté que le rendement en huile par hectare dépasse d'un facteur de 30 celui des cultures traditionnelles des plantes oléifères. Néanmoins, certains handicaps doivent être contournés, à l'instar du rendement des algues qui dépend fortement des radiations solaires, ce qui limite leur exploitation aux régions ensoleillées (procédés extensifs), à moins d'installer des photo-bioréacteurs fermés où les paramètres physicochimiques sont contrôlés (procédés intensifs). La mise en œuvre industrielle de la production des biocarburants à partir des micro-algues reste toutefois à confirmer [26, 27].

#### **I.4. Procédés de production des biocarburants**

La production des biocarburants à partir de la biomasse (végétale ou animale) nécessite des prétraitements, qui permet de modifier les propriétés énergétiques de la biomasse utilisée et de les rendre similaires à celles des carburants fossiles, autrement dit c'est l'amélioration des propriétés physico-chimiques et thermodynamiques de ce carburant. La viscosité élevée est l'obstacle principal qui empêche l'utilisation directe des huiles végétales dans les moteurs diesel. En effet, la haute viscosité conduit à de faibles pulvérisations et une volatilité du jet du carburant lors de l'injection, ce qui conduirait à une mauvaise combustion pour provoquer une augmentation de carburant imbrûlé. La mauvaise combustion conduit aussi à une formation de dépôts de carbone sur les injecteurs, ainsi qu'à la formation de gommages sur les pistons et les parois des cylindres [28-31]. Afin de réduire cette viscosité, transformer l'huile végétale en biodiesel, plusieurs procédés sont utilisés pour la production des biocarburants.

##### **I.4.1. Les techniques de transformation**

Aujourd'hui, pour créer un biocarburant dénué de toute impureté, nous sommes en mesure de distinguer trois grandes voies de transformation. Chacune d'entre elles se déclinent en plusieurs possibilités. Il est important de comprendre que le type de matières premières utilisées va influencer sur le processus de transformation.

###### **I.4.1.1. La voie Thermochimique**

La voie thermochimique consiste tout d'abord à dégrader la biomasse pour en extraire un gaz de synthèse. Ce dernier sera à son tour synthétisé pour être transformé en hydrocarbure qui pourra être ajouté au carburant actuel. Ce processus est considéré comme la voie la plus robuste selon Sylvie Rougé, chef de projet biomasse à la Direction de l'énergie nucléaire (Grenoble) du CEA-France [33]. Dans cette voie, on distingue quatre principales méthodes : la gazéification, la pyrolyse, la méthanisation, le BTL (Biomass To Liquid).

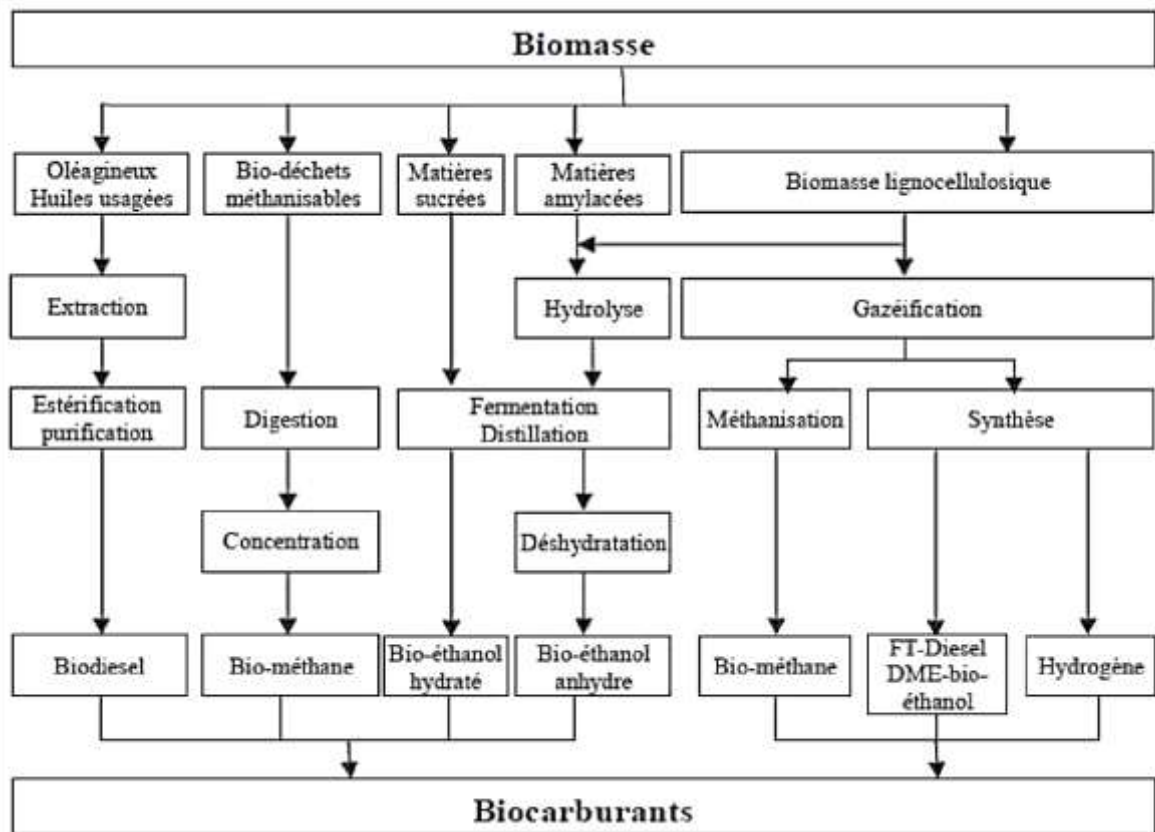


Figure I.1 : Voies de production des biocarburants de la biomasse [32].

**a. La Gazéification**

La gazéification est une décomposition thermique des substances organiques solides en élevant la température entre 900 °C et 1100 °C en milieu oxygéné ou en présence de vapeur d'eau [34]. Le gaz obtenu, très riche en hydrogène (80 à 85%) est appelé Singaz. Ce produit est particulièrement intéressant car il répond à toutes les spécifications nécessaires pour le transport des carburants issus de la biomasse.

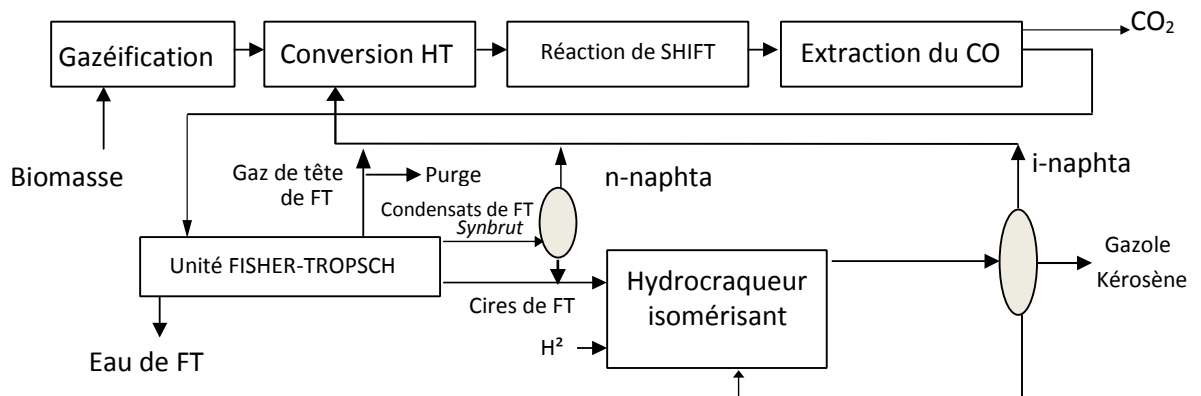


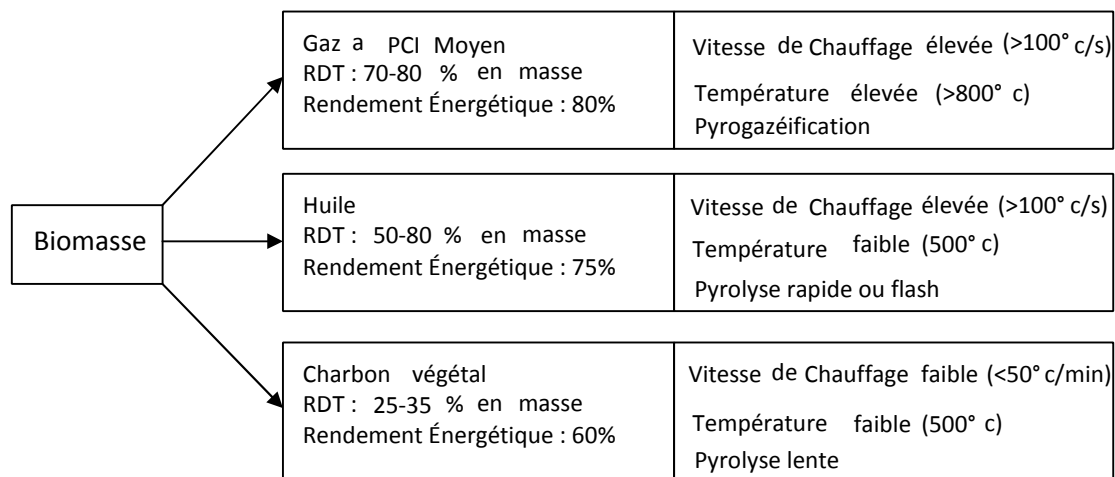
Figure I.2 : Procédé de gazéification associé au procédé de synthèse de Fisher-Tropsch [35]

## b. La Pyrolyse

La pyrolyse est également une technique de décomposition thermique de substances organiques dans un milieu averse d'air [34]. Cependant, elle a lieu à des températures variant entre 450 et 500 °C [35]. Un de ses grands avantages est qu'elle permet de diminuer le gaspillage d'énergie et qu'elle s'adapte à plusieurs types de biomasses agro-forestières et autres résidus de transformation (RDT). En effet, les résidus de l'exploitation agricole et forestière sont brûlés sur place après les récoltes. De plus, c'est une technique de transformation qui permet de détruire les pathogènes contenus dans des matériaux potentiellement dangereux tels que les abats d'animaux. Elle permet également de retourner au sol les fertilisants N, P, K, C via la répartition du charbon pyrolytique [35].

Les produits issus de cette technique de transformation de matières premières sont [35]:

- Les bio-huiles (60-65%) également appelées « huiles pyrolyses ». Elles peuvent être raffinées pour être utilisées comme carburants.
- Le Charbon (20-25%)
- Le gaz (10-15%). Les principaux sont : CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, et sont principalement utilisés dans le procédé lui-même comme source d'énergie.



**Figure I.3 :** Produits majoritaires obtenus par pyrolyse de la biomasse à pression atmosphérique selon les conditions de température et de vitesse de chauffe (rendement énergétique : contenu énergétique de produits, contenu énergétique de la biomasse [35])

On constate avec ce tableau qu'il existe plusieurs types de pyrolyses :

- La pyrolyse rapide : elle nécessite un taux élevé de particules de chauffage et une courte période de transfert de chaleur à la biomasse [34]
- La pyrolyse lente [35]



### **c. La Méthanisation**

La méthanisation (ou digestion anaérobie) consiste en la transformation de matière organique en biogaz (Moletta, 2008). Cette dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène donne naissance à plus de 90% à du biogaz, le méthane [35] ; le reste étant du gaz carbonique.

Historiquement, le processus de méthanisation n'est pas nouveau. Dès les années 1940, il fut utilisé à partir du fumier [36]. Dans les années 1970, l'application s'est étendue au traitement des eaux usées amenant ainsi de nombreuses applications industrielles : agroalimentaires, chimiques, pétroliers, agricoles. Aujourd'hui, il est vu comme un outil de dépollution créant de surcroît une énergie « verte », car la matière première est d'origine vivante (animale ou végétale) [36]. Le méthane produit est un avantage considérable.

La Suède l'a d'ailleurs bien compris et a lancé en 2009 un vaste programme de valorisation du recyclage de la matière organique et la récupération du biogaz. Il est à noter également que les résidus de la fermentation peuvent être utilisés comme fertilisant organique.

### **d. BTL (Biomass to Liquid)**

Cette technique vise à transformer la biomasse en hydrocarbures liquides (de type gazole) en passant par une étape de gazéification. On estime à 4m<sup>3</sup> le volume de biocarburant pouvant être issu par hectare et par année [37]. Le fait de passer par la gazéification de la biomasse permet de rendre la technique simple et ce, quel que soit la matière première. On peut, en effet, épurer le gaz obtenu et ajuster également la proportion des composantes des produits (notamment en hydrogène et monoxyde de carbone) [37]. Cependant, il est important de comprendre que pour le type de matières premières utilisées ainsi que pour le type de débouchés visés (gazole Fisher-Tropsch, méthanol, di-méthyle-éther DME), la technique est modifiable à chacune des étapes de transformation; à savoir le prétraitement, la gazéification, la purification et, pour finir, la valorisation du gaz de synthèse [34]. Aussi, il est possible de dire qu'il existe de multiples combinaisons possibles pour le BLT.

Pour aller plus loin, développons le processus de transformation Fisher-Tropsch. Il consiste en une réaction chimique au cours de laquelle le monoxyde de carbone et l'hydrogène sont convertis en hydrocarbures liquides [37]. Ce processus est déjà très connu et appliqué dans de nombreux domaines. Nous notons que nous devons son invention aux allemands durant la seconde guerre mondiale.

### I.4.1.2. La voie Chimique

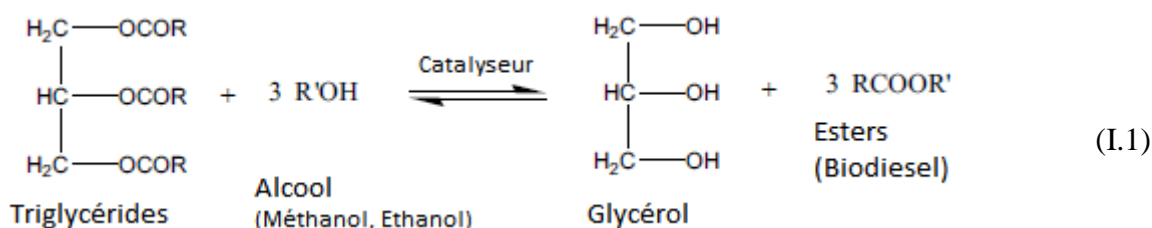
#### a) La Transestérification

La transestérification est un procédé utilisé généralement pour la production de biocarburants de première génération. Cela permet d'éliminer les glycérides via la combinaison de l'huile végétale avec de l'alcool [38]. On peut comparer le procédé à celui de l'hydrolyse sauf que dans le cas présent, de l'alcool est utilisé à la place de l'eau [39]. Il vise à réduire la viscosité de l'huile. Le processus de transformation sera affecté par différentes variables telles que les conditions de la réaction, le rapport molaire de l'alcool à l'huile, le type d'alcool, le type de montant de catalyseurs (pour accélérer la conversion), le temps de réaction, la température et enfin la pureté des différents actifs [39]. Ainsi, le contenu en acide gras libre et l'humidité sont des paramètres clefs pour déterminer la viabilité du processus de transformation.

La transestérification est une réaction chimique qui consiste à remplacer les groupes alcool d'un ester par d'autres types d'alcool. La graisse animale et l'huile végétale sont constituées des triglycérides. Une molécule de triglycérides est formée par la combinaison d'une molécule de glycérine (glycérol un alcool avec 3 fonctions  $-OH$ ) avec trois molécules d'acides carboxyliques à longues chaînes carbonées appelées les acides gras. La transestérification des triglycérides consiste à substituer la glycérine de la graisse par des alcools à courtes chaînes carbonées comme le méthanol et l'éthanol. Les produits résultants de cette réaction sont la glycérine et les esters des acides gras. Ces esters sont appelés méthyliques si l'alcool utilisé durant la transformation est le méthanol et éthyliques dans le cas d'éthanol.

### I.4.2. La réaction de transestérification et le biodiesel

Comme on a déjà noté, la transestérification est une réaction chimique entre 1 mole triglycérides et 3 moles d'alcool et qui donne à la fin 1 mole de glycérol et 3 moles d'esters. L'équation de la réaction s'écrit :



Dans le but d'augmenter la vitesse d'une réaction, un catalyseur chimique est souvent utilisé. Métal, ion, complexe ou encore enzyme, il interagit avec les molécules de réactifs pour accélérer leur transformation et obtenir plus rapidement les produits de la réaction. Un catalyseur est requis dans le but de favoriser la réaction à basses températures et pressions [40, 41]. Sinon on parle d'une réaction non catalysée qui nécessite des hautes températures et pressions afin de passer à l'état supercritique de l'alcool [42, 43]. Le catalyseur favorise la réaction de transestérification et l'accélère, les catalyseurs les plus utilisées sont les catalyseurs homogènes qui sont des bases fortes (catalyse alcaline) ou des acides forts (catalyse acide), les catalyseurs hétérogènes acides et basiques et les enzymes (catalyse enzymatiques) [40,44]. Il est admis que, dans le cas de la réaction de transestérification, la catalyse basique est beaucoup plus rapide que la catalyse acide. Ainsi, les temps de réaction varient de 3 à 48 heures avec un catalyseur acide, les réactions sont pour la plupart complètes au bout d'une heure avec un catalyseur basique [45]. Cependant, dans le cas de la catalyse acide, une température élevée, permet d'accélérer la vitesse de réaction [46].

#### **I.4.2.1. Catalyse basique**

C'est la méthode la plus utilisée dans l'industrie due à sa rapidité, simplicité et son coût de production [47]. Les catalyseurs utilisés sont les hydroxydes des métaux alcalins et alcalino-terreux, mais les catalyseurs les plus communs sont les hydroxydes de Sodium (NaOH) et de potassium (KOH) [44, 48]. Le mode opératoire est le suivant : le catalyseur sera dissout dans l'alcool puis versé sur l'huile, la réaction commence sous une agitation et un préchauffage jusqu'à une température précise qui doit être maintenue durant toute la réaction, la meilleure température est celle la plus proche du point d'ébullition de l'alcool utilisé [48]. A la fin de la réaction, les produits seront séparés par décantation. La glycérine se dépose avec le catalyseur et une quantité de méthanol au fond et les esters avec l'excès d'alcool forment la phase supérieure. Après récupération les esters (biodiesel) seront lavés avec de l'eau afin de les débarrasser de l'alcool et des traces de catalyseurs qui sont restées. Après le lavage l'eau sera neutralisée et l'alcool sera récupéré par distillation. Le biodiesel va subir un séchage par des absorbants ou une centrifugation afin d'assurer l'élimination de l'humidité. La pureté des produits de la réaction dépend de plusieurs paramètres :

Toutes les références confirment l'important effet de la température sur le déroulement de la réaction. En effet, avec l'augmentation de la température, la viscosité du mélange diminue permettant aux réactifs de mieux se brasser conduisant à l'accélération de la réaction [49]. En

revanche au-delà d'une certaine température, l'alcool commence à s'évaporer et ralentit la réaction [50] et dans ce but-là la plupart des études recommandent de travailler à la température d'ébullition de l'alcool [48, 50]. D'autre part lors de l'utilisation d'un catalyseur basique, la réaction de saponification qui est une réaction concurrente à la transestérification sera favorisée au-delà de certains seuils de température, d'humidité et d'acidité [48].

Le catalyseur est nécessaire pour le déroulement de la réaction à pression atmosphérique et basses températures [40, 41]. Son effet sur la réaction est primordial ; en effet avec des faibles quantités de catalyseur, des mauvais rendements de réaction seront obtenus, en augmentant cette quantité la réaction s'accélère jusqu'à un seuil où la saponification sera favorisée. Les quantités de catalyseur requises augmentent avec l'acidité initiale de l'huile utilisée [39]. L'excès de catalyseur aura pour rôle de neutraliser les acides gras libres.

La réaction de transestérification étant une réaction réversible entre 3 moles d'alcool et une mole de graisse, l'excès d'alcool tend à déplacer l'équilibre dans le sens de la transestérification et de l'accélérer [39, 42, 47]. L'excès d'alcool peut jouer un rôle négatif pendant la phase de lavage ; en effet l'alcool tend à former des émulsions avec l'eau et les esters qui seront entraînés vers la phase aqueuse provoquant des pertes dans le carburant récupéré [39]. Pour les huiles végétales pures, le rapport molaire requis pour les transformer en biodiesel est de 6 :1 [44] lors de l'utilisation du méthanol et entre 9 :1 et 12 :1 en utilisant l'éthanol [39].

La réaction nécessite un certain temps pour transformer toute les huiles ou graisse en biodiesel, ce temps dépend des matières premières utilisées. Dans un premier temps la réaction se déroule lentement à cause de la haute viscosité du mélange et de la faible solubilité des réactifs, mais une fois que la réaction est déclenchée, les produits sont plus miscibles avec l'alcool et moins visqueux ce qui favorise largement la réaction. Après un certain temps toute l'huile sera transformée en esters, à ce moment-là si on prolonge davantage la durée, la réaction inverse aura lieu. Donc il faut bien préciser cette durée pour optimiser la réaction [51].

Comme on a déjà noté, la saponification est une réaction concurrente à la transestérification. Elle est favorisée par de l'un des deux paramètres, la présence de l'eau et des acides gras libres. Une fois que l'un de ces deux paramètres augmente on aura recours à la pré-estérification ou la transestérification à catalyse acide. Les points faibles de la transestérification à catalyse basique sont sa sensibilité à l'humidité et à l'acidité d'une part et l'impureté de la glycérine produite par la réaction [44, 47].

### I.4.2.2. Catalyse acide

La méthode appliquée à la catalyse acide est la même que celle utilisée pour la catalyse basique mais en remplaçant les bases fortes par des acides forts. Les catalyseurs acides les plus utilisés sont les acides minéraux acide chlorhydrique HCl, acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, acide phosphorique H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> et les acides sulfoniques RSO<sub>3</sub>H où R est une chaîne organique [45, 52].

Freedman a remarqué que la transestérification en catalyse acide est 4000 fois plus lente qu'en catalyse basique [45] et que les temps de réaction sont beaucoup plus longs. Ainsi pour une conversion supérieure à 99 %, la méthanolyse de l'huile de soja (à 65°C) en présence de 1 % molaire de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, est complète après 50 heures de réaction ; la butanolyse (à 117°C) et l'éthanolyse (à 78°C), avec les mêmes quantités de catalyseur et d'alcool, s'effectuent après 3 à 18 heures respectivement [46]. Il a remarqué que la réaction est plus rapide quand la chaîne de l'alcool est plus longue. Le fait que la butanolyse soit plus rapide que l'éthanolyse et la méthanolyse résulte non seulement d'une température plus élevée mais d'une plus grande solubilité du butanol dans l'huile en début de réaction. Il est évidemment préférable de prendre une stoechiométrie alcool/triglycérides supérieure à trois.

Bien que la catalyse basique soit beaucoup plus rapide que la catalyse acide, cependant beaucoup d'études notent que le choix du catalyseur peut être judicieux si l'huile végétale ou la matière grasse utilisée contient une forte proportion d'acides libres. Ces derniers peuvent détruire le catalyseur basique en réagissant avec pour former des savons ; tandis qu'un catalyseur acide peut en même temps réaliser la transestérification des triglycérides et l'estérification des acides libres présents en augmentant ainsi la conversion [53]. Des conditions plus sévères de température et de pression seront appelées alors pour accélérer la vitesse de la réaction. Les catalyseurs acides sont rarement utilisés du fait de leur moindre réactivité et des risques élevés de corrosion des installations industrielles.

### I.4.2.3. Catalyse hétérogène

Cette technique offre l'avantage d'une séparation facile de la glycérine du biodiesel sans avoir recours au lavage avec l'eau, ce qui réduit le rejet des polluants et donne une glycérine à haute pureté. D'autre part la possibilité de régénération du catalyseur offre un avantage économique important.

Les catalyseurs hétérogènes basiques sont des composés chimiques basiques qui sont insolubles dans l'alcool, comme les zéolites basiques, les oxydes métaux alcalinoterreux et les

hydrotalcites. Les oxydes des métaux alcalinoterreux sont les plus intéressants, par exemple l'oxyde de calcium CaO a une basicité forte et il peut être fabriqué à partir de matières premières moins chères comme le calcaire ou l'hydroxyde de calcium [54]. Les huiles à hautes teneurs en acides gras libres tendent à former du savon avec les sites actifs du catalyseur et le neutralisent. Des études ont montré qu'il y a une partie soluble de CaO dans le biodiesel ce qui nécessite une nouvelle étape de purification. Le MgO peut être préparé du magnésium, il est très efficace à une température de 180°C, mais aux plus faibles températures il perd son efficacité. D'autres types de catalyseurs basiques hétérogènes sont en cours de développement mais ils ont besoin d'avantage d'étude afin de comprendre l'effet des hautes teneurs en acides gras libres sur leur fonctionnement [51].

Les catalyseurs hétérogènes acides offrent l'avantage d'être inaffectés par l'acidité de l'huile utilisée, facile à régénérer et ont moins de risques de corrosion que les acides minéraux [51]. Par contre la recherche sur l'utilisation directe de ce type de catalyseurs dans la production du biodiesel n'est pas assez étudiée parce que lors de son utilisation la transestérification des triglycérides est très lente et il y a possibilité d'avoir des réactions indésirables. D'autre part les catalyseurs hétérogènes acides requièrent des procédures de préparations compliquées et leur réaction requiert des hautes températures et des quantités d'alcool très élevées [54].

#### **I.4.2.4. Catalyse enzymatique**

La réaction de transestérification des huiles végétales par catalyse enzymatique a connu un grand essor ces dernières années. En effet, les enzymes possèdent plusieurs avantages : elles sont biodégradables, sélectives [55], ce qui permet d'augmenter les rendements de la réaction tout en diminuant la production des sous-produits de la réaction. Les conditions de la réaction sont relativement douces (température et pression basses) ce qui diminue le prix en termes d'énergie et d'équipements et tend vers des coûts de gaspillage plus faibles. Dans le cas de la catalyse enzymatique on n'a ni le problème des acides libres ni la sensibilité à l'eau ; on peut bien travailler dans un milieu aqueux ou non aqueux. Notons bien que l'enzyme peut être immobilisée sur un support [55].

Mais la catalyse enzymatique est dotée de certains inconvénients : en effet, l'enzyme est trop chère (par exemple la lipase est plus cher qu'un catalyseur basique) et possède une activité instable. La réaction est trop lente [55] et est donc limitée industriellement car elle dure entre 4-16 h pour atteindre une conversion de 95 %.

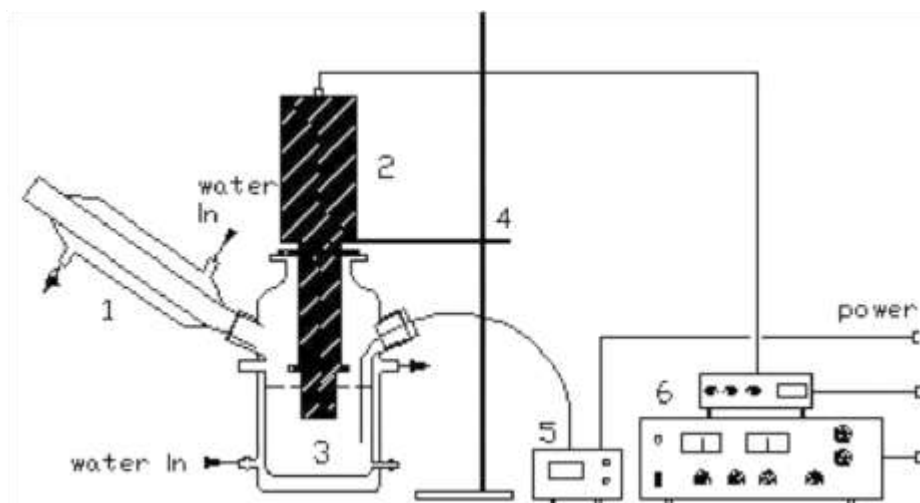
Cependant, des études sont effectuées dans le but de recycler l'enzyme vu son prix élevé. On citera en particuliers les recherches faites sur l'immobilisation de l'enzyme sur un support. L'activité de l'enzyme est inhibée par le méthanol et le glycérol présents dans le milieu réactionnel. D'où l'idée de rajouter un solvant, le *tert*-butanol (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O) afin d'éliminer à fur et à mesure le glycérol qui vient s'adsorber sur l'enzyme. Le méthanol est ajouté par étape au milieu réactionnel. Cela réduit les effets inhibiteurs augmentant de ce fait la rentabilité du processus. La production enzymatique est possible en utilisant la lipase intra et extracellulaire.

#### **I.4.2.5. Transestérification à catalyse basique chauffée par les micro-ondes**

Ce type de réaction consiste à utiliser le chauffage par micro-ondes au lieu du chauffage classique. Les micro-ondes font un transfert d'énergie sous forme électromagnétique oscillant qui fait osciller les molécules polaires et les ions qui entrent en collisions et produisent la chaleur. L'effet de ce phénomène se traduit par un chauffage rapide, homogène et plus efficace des réactifs et donc une économie d'énergie [56]. Azcan et Danisman [57] ont étudié la transestérification à catalyse basique sous un champ de micro-ondes de l'huile de colza, ils ont eu des rendements variant entre 88 et 94% et la pureté du biodiesel variait entre 87 et 99%. La température optimale de réaction était 50°C et le temps de réaction était 5 minutes. Lertsathapornsuk et al [58] ont modifié une micro-onde de cuisine de puissance 800 W en un réacteur pour transformer l'huile de palme usagée en biodiesel. Ils ont obtenu une pureté de 97% du biodiesel et ils ont réduit le temps de réaction jusqu'à 30 s. la consommation d'énergie suivant cette méthode était de 74,8 Wh/l contre 222 Wh/l pour une réaction chauffé par la méthode conventionnelle. Les limitations de ce type de réaction sont liées à l'application de cette technologie à l'échelle industrielle [56].

#### **I.4.2.6. Transestérification sous assistance des ondes ultrasonores**

Les ondes ultrasonores sont des ondes inaudibles par les êtres humains. Elles ont des fréquences comprises entre 20 kHz et 100 MHz. Lors du passage de ces ondes à haute fréquence dans un milieu, elles vont comprimer et étendre l'espace intramoléculaire violemment ce qui va mettre les molécules en vibration continue et qui va créer des cavités et des bulles qui vont s'effondrer violemment produisant de l'énergie qui aura des effets mécaniques et chimiques sur ces molécules. L'utilisation de cette technologie dans la transestérification au lieu de l'agitation mécanique minimise la consommation d'énergie durant la réaction et diminue le temps de réaction et l'excès d'alcool nécessaire pour cette réaction [54].



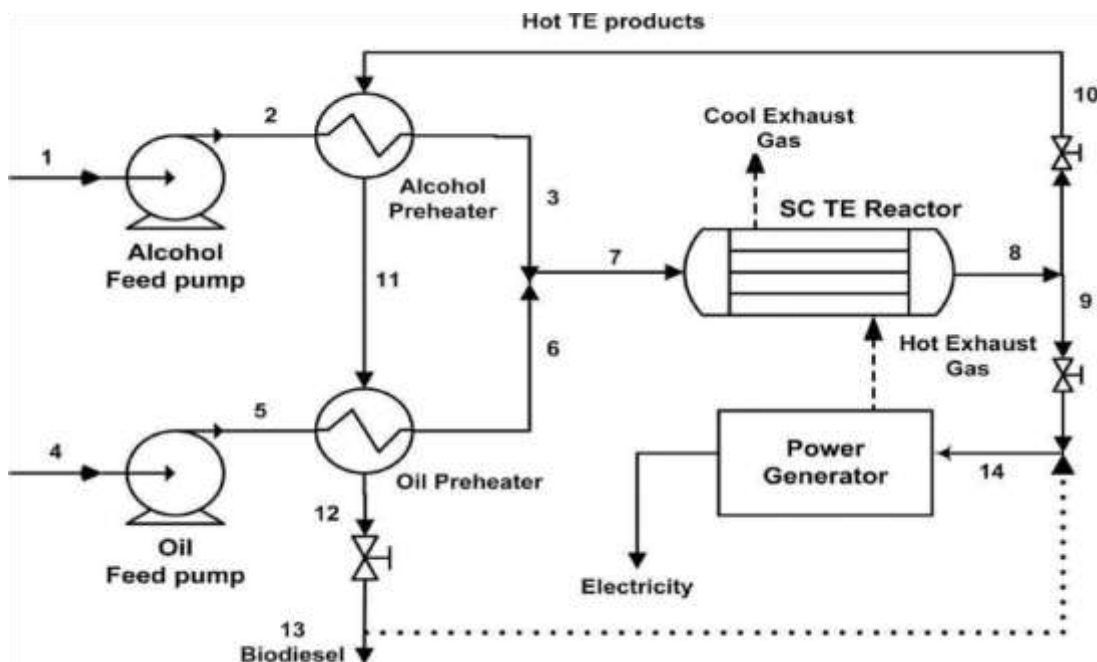
**Figure I.4 :** Schéma proposé par Ji et al. 2006 pour le système ultrasonore  
 1– condenseur; 2 – transducteur; 3 –réacteur ; 4 – support; 5 – thermomètre; 6 – générateur d’ultrasons.

Cette technologie a été étudiée pour différents types de catalyse. Ji et al. [59], ont proposé un réacteur à l'échelle du laboratoire afin de produire du biodiesel suivant la technologie des ondes ultrasonores (figure I.4) à partir de l'huile de soja par catalyse basique. Hanh et al [60], ont étudié la transestérification à catalyse basique de la tri-oléine en utilisant plusieurs types d'alcool en comparant l'agitation mécanique classique avec la vibration par des ondes ultrasonores. Salamatinia et al. [61], ont étudié l'effet des champs ultrasonores sur la transestérification à catalyse hétérogène de l'huile de palme. Yu et al [62], ont étudié la transestérification à catalyse enzymatique sous irradiation et vibration par des ondes ultrasonores. Tous ces auteurs ont constaté que les ondes ultrasonores accélèrent leurs réactions.

#### **I.4.2.7. Transestérification non catalysée**

Cette méthode consiste à faire passer l'alcool à son état supercritique en le chauffant sous haute pression et le mélanger en grand excès avec l'huile ou la graisse. En fait les cinétiques de cette réaction ont montré que la conversion de l'huile de colza est plus rapide dans l'état supercritique du méthanol que l'état sub-critique. En effet le méthanol en état supercritique ayant une nature hydrophobique, il peut former avec les triglycérides une phase homogène tandis que le méthanol liquide étant un solvant polaire et ayant une constante diélectrique plus élevée ce qui explique la vitesse de la réaction en utilisant l'alcool en état supercritique [63].





**Figure I.5 :** Procédé de transestérification supercritique par cogénération [64]

La transestérification supercritique est très rapide et donne des produits purs sans avoir recours à la séparation du catalyseur ou du savon, cette réaction n'est sensible ni à l'eau ni aux acides gras libres ce qui épargne l'étape de prétraitement. En plus cette réaction peut estérifier les acides gras libres [64].

Les désavantages de cette réaction sont liés aux conditions opératoires : hautes températures et pressions et les grands excès d'alcool ce qui nécessite davantage d'études avant son application au niveau industriel [63]. D'autre part, la dépendance de la réaction de plusieurs paramètres mis en compétition rend son optimisation difficile ce qui explique les différences entre les résultats des différents chercheurs ayant travaillé. Dans le tableau I.1 sont notés quelques résultats d'optimisation du procédé de TE SC.

Une augmentation du taux de conversion a été observée lors de l'augmentation de la température de la réaction en état supercritique et la teneur en méthyle esters augmentait avec le rapport molaire huile alcool [41 ; 65]. Par contre, l'augmentation de la température favorise des réactions secondaires liées à la présence de doubles liaisons et diminue les teneurs en esters du produit final, des longs temps de résidence ont les mêmes effets. He et al. [65] ont conduit dans leur laboratoire une réaction de transestérification supercritique de l'huile de soja en présence du méthanol. Ils ont observé qu'à partir de 310°C les réactions secondaires se déclenchaient. En se basant sur leurs expériences, ils ont établi les conditions optimales de leur réaction comme suit : 310°C sous 350 bars avec un rapport molaire alcool : huile de 40:1 et

Pour une durée de 25 minutes. De leur part Joelianingsih et al. [66] ont testé à pression atmosphérique la transestérification supercritique de l'huile de palme. Ils ont enregistré une conversion d'huile maximale à 290°C après 300 minutes, mais la teneur en esters méthylique était 87% ce qui était loin de la spécification de la norme européenne EN 14214. À 250°C ils ont enregistré une teneur de 95% en esters méthyliques mais le taux de conversion était de 55% par masse. Donc ils ont conclu qu'il faut étudier d'avantage l'effet de la température et d'autres paramètres sur la réaction.

*Tableau I.1. Données relatives à la transestérification supercritique [63]*

	T [°C]	Pression [bars]	Rapport molaire alcool : huile	Durée [minutes]	Rendement [%]
<b>Soja</b>	280	143	24	10	<b>98</b>
<b>Canola</b>	450	400	45	4	<b>Près de 100</b>
<b>Colza</b>	350	450	42	4	<b>95</b>
<b>Palm et coco</b>	350	42	190	7	<b>96</b>
<b>Soja</b>	310	350	40	25	<b>96</b>
<b>Soja</b>	235	62	27	600	<b>85</b>
<b>Soja</b>	280	128	24	10	<b>98</b>
<b>Tournesol</b>	350	200	40	40	<b>96</b>
<b>Ricin et lin</b>	350	200	40	40	<b>98</b>
<b>Soja</b>	288	96	64	10	<b>99</b>
<b>Soja</b>	290	110	12		<b>Près de 100</b>
<b>Huiles usagées</b>	280	128	24	17	<b>95</b>
<b>soja</b>	400	100	3	3	<b>Près de 100</b>

#### **I.4.3. L'influence des procédés de production sur les propriétés des biocarburants :**

La transestérification est la méthode la plus couramment utilisée pour la production de biodiesel [67]. Il s'agit d'une réaction chimique entre l'alcool et les triglycérides d'acides gras en présence d'un catalyseur approprié pour former des esters alkylés d'acides gras (biodiesel) et du glycérol. Afin d'obtenir un rendement maximal en biodiesel grâce au processus de transestérification avec un minimum coût et utilisation de produits chimiques, les conditions de fonctionnement optimales sont obligatoires. La plupart des chercheurs et scientifiques ont analysés les paramètres qui affectent la production de biodiesel.

### I.4.3.1. Effet sur le rendement

Il existe quatre paramètres qui peuvent influencer sur le rendement de la réaction de transestérification, à savoir, la concentration du catalyseur, la température de réaction, le rapport molaire alcool/ huile et la durée de réaction. Prerna Goyal et al [68] ont étudiés l'effet de ces quatre paramètres sur le rendement d'esters méthyliques de *Jatropha curcas* (JCO) lors de sa transestérification. Les acides gras libres élevés de JCO (14.6%) ont été réduits à (0.34%) par estérification catalysée, un rendement JCB de 98.3% a été obtenu avec un rapport méthanol / huile (11: 1) en utilisant NaOH comme catalyseur à une température de 55 °C. Yuan et al. [69] ont examinés l'effet des quatre paramètres sur le rendement de biodiesel d'huile de colza, en 30 essais expérimentaux, ils ont obtenus un rendement de 83%, ils ont rapportés que la concentration de catalyseur et le temps de réaction étaient les paramètres principales de la réaction.

Dans une recherche similaire, Jeong et Park [70] ont étudiés plus en détail l'effet de trois variables, à savoir, la température de réaction, le rapport molaire huile-méthanol et la quantité de catalyseur (KOH) sur le rendement en biodiesel de l'huile de ricin en 20 essais expérimentaux, ils ont obtenus environ 92% rendement. L'effet des trois variables ci-dessus sur le rendement en biodiesel à partir de la graisse animale (saindoux) a été étudié par Jeong et al. [71], en 20 expériences, ils ont obtenus un rendement de 97,8%.

Vicente et al. [72], ont optimisés la production de biodiesel à base d'huile de tournesol avec quatre paramètres, rapport molaire méthanol / huile 6: 1, température de réaction de 20 à 50 °C, concentration d'hydroxyde de sodium (NaOH) de 1,3% en poids avec une vitesse d'agitation de 600 tr / min produit une conversion maximale. Jon. Zhang et al. [13] ont montrés que la conversion de l'ester méthylique de l'huile de cuisson usagée dans la transestérification catalysée par l'acide peut atteindre jusqu'à 99%. Ce procédé a été réalisé en utilisant un rapport méthanol / huile très élevé de 250: 1.

A. K. M. Aminul Islam et al. [73], on fait la caractérisation de 15 huiles de graines mixtes de *jatropha*. La réaction de transestérification a été faite en deux étapes : un processus d'estérification catalysé par l'acide ( $H_2SO_4$ ) suivi d'une transestérification catalysée par une base (KOH). Une opération de pré-estérification a été appliquée pour réduire la teneur en acides gras libres et augmenter le rendement en biodiesel. La transestérification de l'huile de graine n'a donné que 21 à 26% d'ester méthylique d'acide gras avant le prétraitement acide. L'analyse par chromatographie en phase gazeuse après transestérification a montré que la conversion en ester

méthylque d'acide gras était atteinte  $\geq 90\%$  pour la plupart des échantillons d'huile. Le rendement en biodiesel variait de 4,45 à 4,85 g / 5 g d'huile parmi les graines mixtes.

Autre recherche sur l'influence de la nature et la concentration du catalyseur, la température et la durée de réaction sont citées dans le tableau I.2

**Tableau I.2 : propriétés influençant sur le rendement du procédé de transestérification**

Matière première	Catalyseur	Alcool	Rapport alcool/huile	Concentration catalyseur	Durée réaction	Temp. réaction	rendement
HFU [19]	CH <sub>3</sub> ONa	méthanol	7.5 :1	1%	60 min	60°C	95%
Tournesol usagée [74]	KOH	méthanol	6 :1	1%	30 min	25°C	Max. rendement
HFU [75]	NaOH	méthanol	48 :1	0.6%	60 min	65 °C	94%
HFU [76]	NaOH/KOH	méthanol	6 :1	1%	180 min	65 °C	96.5%
Jatropha [77]	KOH	méthanol		1.1%	120 min		93%
Kranja [77]	KOH	méthanol		1%	120 min		91%
Palonga [77]	KOH	méthanol		0.9%	120 min		85%
WFU [78]	KOH	ethanol	12 :1	1%	120 min	78 °C	73%
Jojoba [79]	KOH	méthanol	6 :1	1.35%		25°C	83.5%
Jatropha surcas [45]	NaOH	méthanol	20 :1	1%	90 min	60 °C	98%
Soja [80]	sulfate	méthanol	30 :1	5%	48h	60 °C	98.4%
Arachide [81]	CH <sub>3</sub> NaO	méthanol	6 :1	0.5%		60 °C	93%
Graine de coton [81]	CH <sub>3</sub> NaO	méthanol	6 :1	0.5%		60 °C	96%
Tournesol [81]	CH <sub>3</sub> NaO	méthanol	6 :1	0.5%		60 °C	98%
WFU [82]	KOH	méthanol	7 :1-8 :1	0.75%		30-60°C	88-90%

D'après le tableau le rendement peut vari d'une matière première à l'autre. L'augmentation du rapport alcool/ huile augmente le rendement, mais le cout de production augmente aussi. La concentration du catalyseur a un effet positif sur le rendement, mais négatif à la propriété physico-chimique (augmenté l'indice acide), en-outr, elle génère aussi un problème de saponification d'huile. La durée et la température ont un effet positif pour le rendement de réaction, comme elles peuvent provoquées aussi des effets négatives sur les propriétés physico-chimique.

### I.4.3.1. Effet sur les propriétés physico-chimiques

Les paramètres qui peuvent influencer sur le rendement de la réaction de transestérification, influent aussi sur les propriétés physico-chimiques du biodiesel. Ashish Birla et al. [83], ont utilisés les huiles de friture usagées pour produire du biodiesel, la viscosité de l'huile à 40 ° C, la densité et l'indice iode sont passées de (28.08 cSt, 890 kg/m<sup>3</sup>, 0.709 mg KOH/ g huile) de huile vierge, à (35.06 cSt, 896 kg/m<sup>3</sup>, 1.948 mg KOH/ g) huile après friture. Un changement de couleur du jaune pâle au jaune vert, ainsi qu'une augmentation de l'indice d'acide ont également été observés après la friture. Après les réactions de transestérification, le rendement et la conversion du produit ont été optimisés avec la variation du rapport molaire méthanol / huile, la quantité de catalyseur, la température de réaction et le temps. Une conversion de biodiesel de 99,58% a été obtenue avec un rendement de 87,28%. Une diminution des propriétés physico-chimiques du biodiesel à savoir la viscosité, la densité, et l'indice d'acide ont été observées (5.4 cSt, 865 kg/m<sup>3</sup>, 0.48 mg KOH/ g).

Autre recherche sur les densités, indices d'acide et indices d'iode des esters de biodiesel de 6 géotypes parentaux et de leurs 15 hybrides ont été déterminées à 20 ° C avec l'utilisation d'une transestérification en deux étapes [73]. Les densités des esters de biodiesel étaient inférieures à celle de l'huile source (0,899 à 0,916) et variaient de 0,872 à 0,903 g / ml chez les hybrides et de 0,881 à 0,903 g / ml chez les parents. Les mêmes observations ont été enregistrées pour la gravité spécifique. Les indices d'acide variaient du plus bas 0,25 mg NaOH / g pour P1 au plus haut 0,50 mg NaOH / g pour P6 (biodiesel de parent 6). Dans le cas du biodiesel issu d'hybrides, l'indice d'acide varie de 0,14 mg NaOH / g pour P4 × P5 au plus élevé à 0,65 mg NaOH / g pour P2 × P4 [73]. La valeur moyenne d'iode du biodiesel a été calculée à 99,72 (mg / g d'huile) pour les géotypes parentaux et à 96,98 (mg / g d'huile) pour les hybrides. Les esters de biodiesel de P1 avaient l'indice d'iode le plus élevé (108,4 mg / g d'huile) tandis que P5 avait le plus faible (88,48 mg / g d'huile). La majorité des hybrides présentaient un indice d'iode inférieur à 100 mg / g d'huile. La valeur d'iode plus élevée du biodiesel de jatropha est due à son constituant principal d'un acide gras à triple liaison (acide linoléique) [73]. Par conséquent, le biodiesel de jatropha avait un degré d'insaturation significativement plus élevé que le carburant diesel. Le chauffage d'acides gras insaturés plus élevés entraîne la polymérisation des glycérides et cela peut conduire à la formation de dépôts ou à une détérioration du lubrifiant.

Des recherches approfondies ont été menées pour calculer les différentes propriétés physiques des biocarburants issus de déchets de peau de poulet et de graisse de porc et leurs combinaisons avec le carburant diesel conventionnel [84]. Les mélanges préparés sur des bases

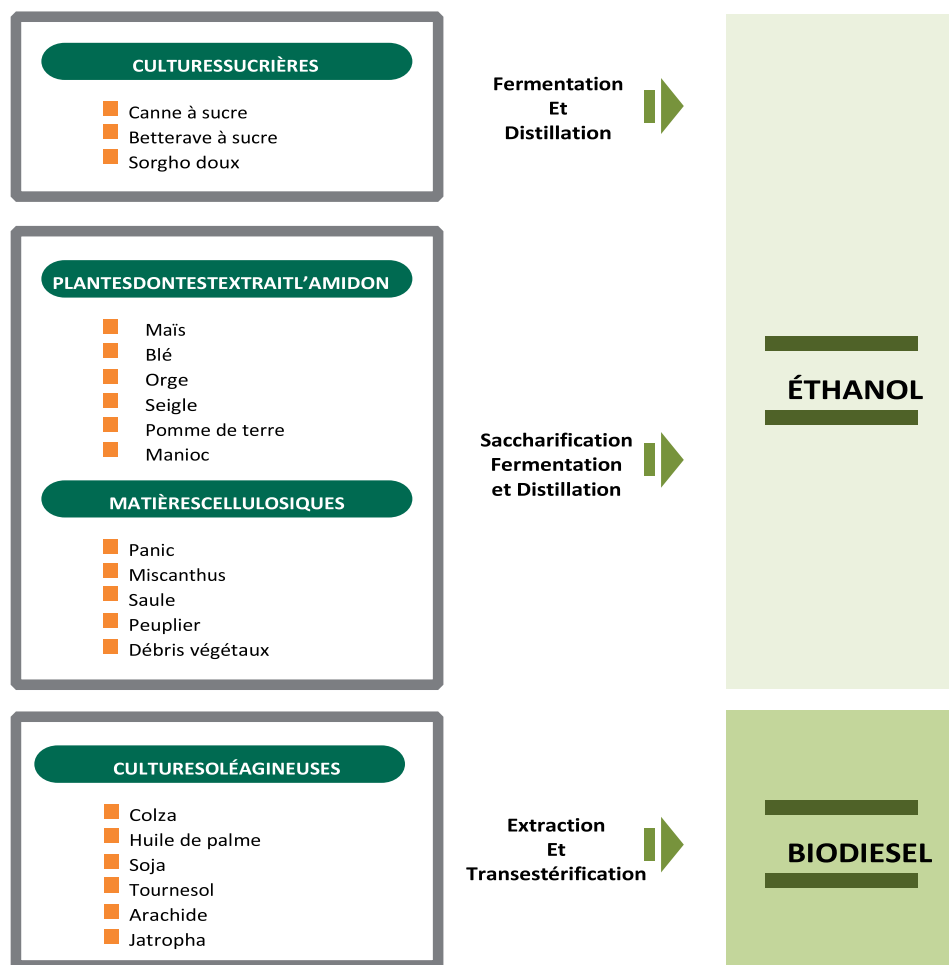
de volume comme CB10, CB20, CB30 et CB40 avec du biocarburant issus de déchets de peau de poulet et PB10, PB20, PB30 et PB40 avec du biocarburant issus des graisses de porc. Les résultats de l'investigation révèlent que la valeur du point d'éclair, de la viscosité est plus élevée pour les deux types de biocarburant pur. Les propriétés du biocarburant et de leurs combinaisons indiquent que le biocarburant pur des deux matières premières présente une densité moindre par rapport à celle du carburant diesel, de viscosité, de point d'éclair élevées. Les résultats des mélanges de biocarburant avec le diesel montre une différence marginale dans toutes les propriétés, en augmentant le pourcentage de biocarburant dans le mélange réduit le pouvoir calorifique [84].

### **I.4.3. Procédé de production des biocarburants de première génération**

Les procédés utilisés pour la fabrication des biocarburants de première génération sont relativement simples. Tout d'abord, les plantes servant à leur production sont spécifiques. Dans le cas du biodiesel, il faut avoir recours à des cultures oléagineuses (le colza, le soja, le tournesol, l'arachide, l'huile de palme et le jatropha). Pour la production de bioéthanol, ce sont plutôt des cultures sucrières ou encore des plantes contenant une quantité importante en amidon qui sont utilisées. La canne à sucre, la betterave et le sorgho sont des exemples de plantes sucrières à forte teneur en sucres. Les plantes comme le maïs, le blé, l'orge, le seigle, la pomme de terre et le manioc contiennent quant à elles de l'amidon (L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture FAO) [85]. La figure I.6 présente un aperçu des plantes pouvant servir à la production de biocarburants, les procédés associés et le type de biocarburant obtenu.

La transestérification est la technique classique de production de biodiesel. Il s'agit d'un procédé dans lequel les huiles végétales, les graisses animales ou les huiles à base de micro-algues sont mélangées à froid à un alcool (éthanol ou méthanol) en présence d'un catalyseur (hydroxyde de sodium ou de potassium). Le méthanol est généralement l'alcool utilisé dans le processus et le carburant qui en résulte est alors un ester méthylique d'huile végétale (EMHV) avec comme sous-produit de la glycérine. L'éthanol peut également utiliser comme alcool d'estérification, mais ce procédé est plus rarement utilisé, ce qui fournit un ester éthylique d'huile végétale (EEHV). Le biodiesel obtenu peut être mélangé au gazole de diverses façons. En France, les normes de commercialisation permettent un carburant standardisé avec un taux maximum de 7 % sans indication à la station de distribution et de 20 % (B20) avec indication la station. Pour utiliser ces carburants (B7 – B20), il n'est pas obligatoire de modifier les

ajustements moteurs. Pour agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), il est disponible de modifier les ajustements moteurs quand le taux atteint 30 % (B30), [86].

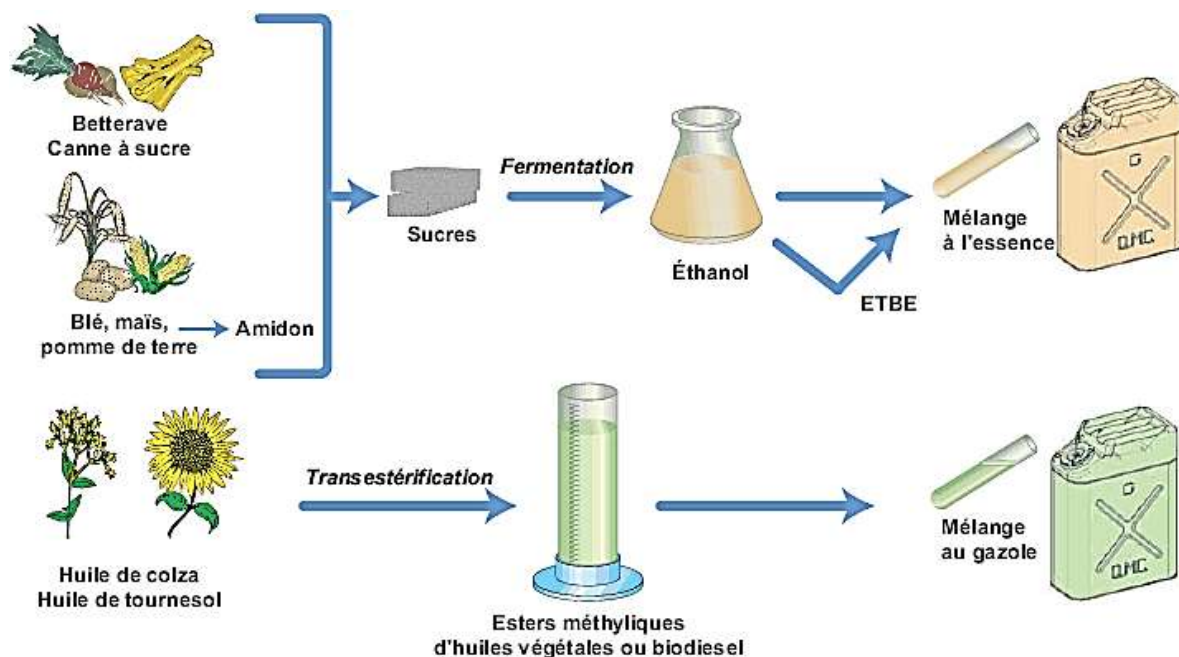


*Figure I.6 : Matières premières, procédés et biocarburants obtenus [85]*

La production de bioéthanol consiste principalement à transformer en alcool les sucres ou l'amidon contenu dans la sève ou les grains de la plante. Dans le cas des cultures sucrières, la fermentation des sucres est effectuée directement à l'aide de levures produisant des enzymes. Concernant les plantes contenant de l'amidon, comme dans le cas des céréales, il faut d'abord broyer le grain. Ensuite la saccharification, qui convertit l'amidon en sucres, puis la fermentation. Dans l'un et l'autre cas, le mélange obtenu est par la suite distillé pour concentrer l'alcool et éliminer l'eau afin d'obtenir le bioéthanol [26, 85]. Selon le pays producteur, diverses pratiques commerciales permettent de le mélanger à l'essence à un taux de 5 % ou 10 % pour un carburant standardisé (E5 ou E10), sans modification du moteur à essence conventionnel.

Par contre, des alliages moteurs différents permettent la résistance à la corrosion pour un taux de 85 % tel le super-éthanol E85, carburant conçu pour les véhicules à carburant modulable, connus sous le terme « *Flex-Fuel* » [50].

La figure I.7 illustre les différentes filières de biocarburants de première génération (biodiesel ou bioéthanol).



**Figure I.7 :** Processus de fabrication des biocarburants de première génération [52]

#### I.4.3.1 Avantages

L'utilisation des biocarburants de première génération comporte de nombreux avantages, qui peuvent à la fois classés en : environnementaux, techniques, économiques et sociaux. Les points forts présentés dans cette section sont aussi, de façon générale, applicables aux deux générations suivantes de biocarburants qui seront abordées ultérieurement.

Les avantages environnementaux sont mis en première lieu lorsque les biocarburants sont mis en point. Il est difficile d'évaluer le bilan environnemental réel, car il est basé sur une analyse de cycle de vie. Certains paramètres sont en effet particulièrement difficiles à prendre en compte, notamment les changements d'affectation des sols associés à la culture des plantes servant à leur production [87]. De façon générale et sans tenir compte de ce facteur, de nombreux gains environnementaux sont démontrés. Il est établi que l'utilisation des différents types de biocarburants liquides permet de diminuer notablement l'utilisation des produits pétroliers reconnus pour être des énergies non renouvelables [87]. Les biocarburants de 1<sup>ère</sup>



génération étant produits principalement à partir de végétaux, ils sont par le fait même considérés comme une ressource renouvelable [26]. Ils permettent également de diminuer la quantité de dioxyde de carbone émise par rapport aux carburants fossiles. En effet, les biocarburants sont considérés comme « carbo-neutres » puisque le CO<sub>2</sub> qui est libéré lors de la combustion du carburant a tout d'abord été capturé par les cultures végétales utilisées pour la production des biocarburants lors de la croissance de celles-ci [26]. Le biodiesel émet également moins d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) que le diesel conventionnel. Les biocarburants contribuent donc à réduire la pollution de l'air. Ils permettent de limiter les émissions de gaz à effet de serre et diminuent le réchauffement climatique engendré notamment par la combustion des combustibles fossiles.

Également, il faut prendre en compte certains avantages techniques reliés aux biocarburants. La technologie sur laquelle est basée la production de biocarburants de première génération est éprouvée et bien maîtrisée [89]. De plus, en tant qu'additifs et carburants, le bioéthanol et l'ETBE (ethyl tert-butyl ether) incorporés à l'essence contribuent à un apport plus important en oxygène. Cela permet donc une combustion du carburant plus complète et une diminution des résidus indésirables. Les polluants primaires sont diminués par cette réaction, mais il est cependant possible de constater une augmentation des polluants secondaires [87]. Dans le cas du biodiesel, son point d'ignition est plus bas que le diesel ordinaire. Utilisé pur, il s'allume donc mieux que le carburant ordinaire [26]. Il permet aussi une meilleure lubrification ce qui diminue le frottement et préserve le moteur de l'usure lorsqu'il est utilisé sans ajout avec du diesel conventionnel.

De plus, les biocarburants, notamment de première génération, comportent divers avantages sociaux et économiques. Leur production génère des coproduits qui peuvent, entre autres, être utilisés pour l'alimentation animale [90]. D'autres coproduits peuvent également être utilisés en chimie, comme le glycérol obtenu lors de la fabrication du biodiesel [87]. La production de biocarburants apporte aussi un débouché additionnel pour les agriculteurs grâce aux cultures exploitées et permet ainsi une diversification du marché [90]. Le fait que les biocarburants peuvent être produits et consommés localement est aussi un point fort à leur Ils permettent de plus de s'affranchir en partie des combustibles fossiles, d'apporter une plus grande indépendance énergétique et de présenter une certaine sécurité en matière d'approvisionnement [26]. Finalement, le développement des biocarburants a permis de sensibiliser les différentes parties, telles que la classe politique, les producteurs, le public et les consommateurs à leurs rôles et pouvoirs d'action concernant les défis écologiques actuels [89].

### I.4.3.2 Critiques

Bien que la production de biocarburants de première génération comporte de nombreux avantages, des importantes critiques ont été enregistrées. Ces points négatifs sont aussi environnementaux, techniques, économiques et sociaux.

Pour établir le bilan environnemental, certains paramètres sont difficiles à prendre en compte. Le changement d'affectation des sols pour produire les biocarburants est un des facteurs complexes à prendre en compte. Effectivement, ces modifications de l'utilisation des terres ne sont pas sans conséquence par rapport aux émissions des gaz à effet de serre [74]. Par exemple, si une forêt ou une zone humide est détruite au profit d'un champ pour la culture de plantes servant à la fabrication des biocarburants, le bilan résultant peut alors s'avérer négatif, en plus de conduire à une perte de biodiversité. Aussi, certains désavantages sont associés directement aux pratiques agricoles pour la culture de ces végétaux [85]. L'utilisation massive de pesticides et d'engrais pour augmenter le rendement des productions agricoles affecte le bilan des émissions de GES [89]. De ce fait, le rendement énergétique est mitigé puisqu'il n'est pas établi que l'énergie procurée par la combustion des biocarburants soit vraiment supérieure à la quantité d'énergie consommée pour la production et la transformation des plantes. Il est également reconnu que ces cultures utilisées pour leur fabrication risquent d'appauvrir les terres, d'utiliser des ressources en eau importantes et d'entraîner l'érosion des sols. Le bilan peut alors être discuté par rapport à celui des carburants fossiles qui n'occasionnent pas ces types d'effets [89]. Également, lors de la production de biocarburants de première génération, une faible fraction seulement des cultures est utilisée, ce qui a pour conséquence d'engendrer une quantité de résidus importante [26].

En plus des inconvénients environnementaux causés par les biocarburants de première génération, certains désavantages techniques doivent aussi être pris en compte. Certaines contraintes par rapport à l'utilisation des biocarburants doivent être considérées. En effet, les moteurs à essence conventionnels ne sont pas compatibles avec un mélange qui contient plus de 10 % de bioéthanol. Il faut les modifier afin qu'ils puissent utiliser un pourcentage plus élevé. De plus, le rendement du super-éthanol est inférieur à celui de l'essence conventionnelle puisqu'une molécule d'alcool fournit une puissance de combustion moindre. L'utilisation du super-éthanol nécessite donc un plus grand volume de carburant pour parcourir la même distance.

Les critiques économiques et sociales sont également importantes et rendent la question des biocarburants de première génération controversée. Un des principaux reproches adressés est la compétition entre les cultures utilisées pour l'alimentation et celles produites pour les biocarburants.

La fraction accordée pour la consommation alimentaire diminue, alors qu'elle augmente pour les biocarburants. Cela peut occasionner l'augmentation des prix des denrées alimentaires, comme ceux des céréales et des plantes oléagineuses, et ainsi mettre en jeu le juste équilibre alimentaire au niveau mondial [92]. Effectivement, d'après la Banque mondiale, 70 % de l'augmentation du prix du maïs et de 40 % pour le soja entre janvier 2002 et juin 2008 seraient attribuables aux biocarburants. Il est fréquent de voir que des cultivateurs délaissent le secteur de l'alimentation plus traditionnel et se tournent vers la production pour les biocarburants qui s'avère être plus lucrative [93]. Dans une hypothèse où la valeur de la matière première utilisée pour les biocarburants dépasse celle des cultures pour l'alimentation, cela deviendrait une économie basée sur l'énergie plutôt que sur l'alimentation. De plus, certains observateurs s'interrogent sur le fait que s'il y avait « une diminution des restrictions sur l'importation des biocarburants externes, cela pourrait se répercuter sur l'approvisionnement en huile de maïs, de blé et de soja ainsi que sur leurs prix ». L'étendue restreinte des superficies cultivables ainsi que la concurrence entre les cultures produites pour l'alimentation et les biocarburants deviennent aussi des limitations à la croissance de la première génération de biocarburants [26]. Elle aura été une technologie initiale, voire de transition, qui mène graduellement à la seconde génération [94].

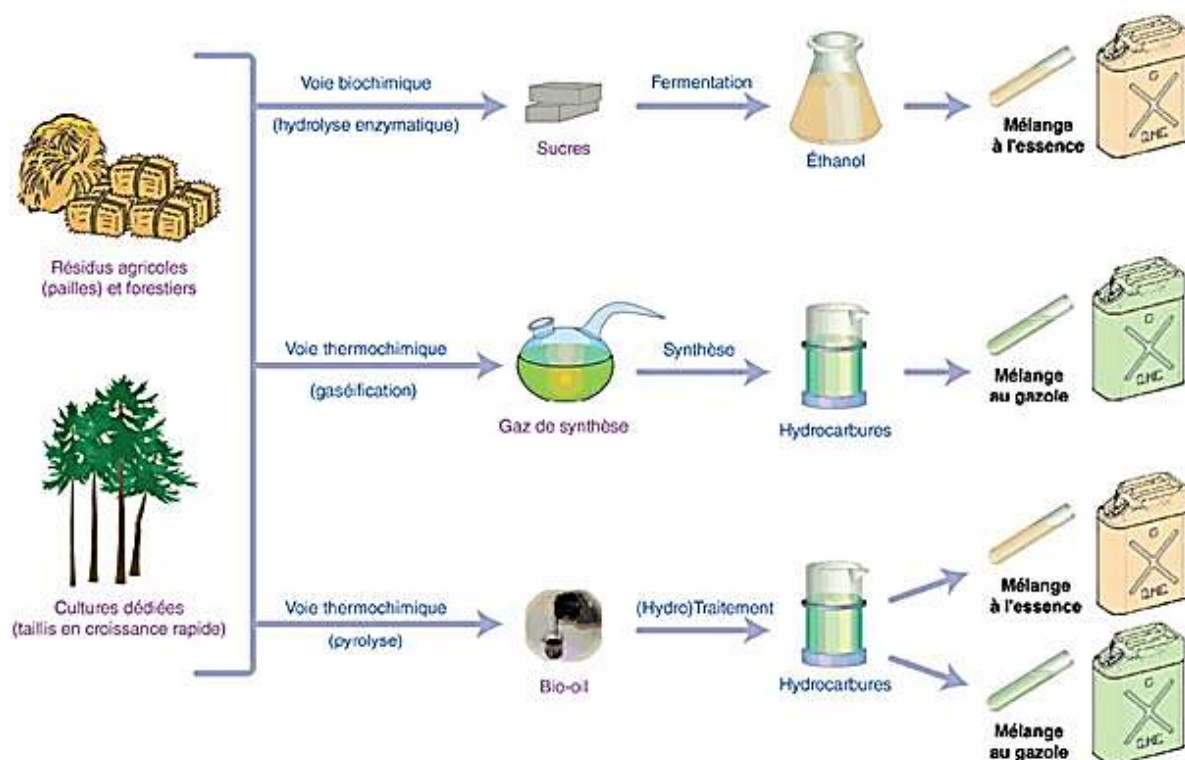
#### **I.4.4. Procédé de production des biocarburants de deuxième génération**

Les procédés servant à la fabrication des biocarburants de deuxième génération sont différents et plus complexes que ceux pour la première génération. Deux méthodes sont principalement utilisées pour ce faire : la voie biochimique ou la voie thermochimique.

La voie biochimique permet la fabrication d'éthanol à partir de la biomasse. Différentes étapes sont nécessaires, d'abord extraire les sucres de la matière première Ligno-cellulosique, pour ensuite les transformer en alcool [90]. Les végétaux utilisés doivent en premier lieu être broyés pour en séparer les constituants désirés, soit la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Vient ensuite l'étape de l'hydrolyse enzymatique de ces éléments qui permet de briser les chaînes des carbohydrates en sucres, qui pourront ensuite être métabolisés [95]. Les sucres obtenus sont fermentés. La distillation permet par la suite d'obtenir l'éthanol qui pourra être

mélangé à l'essence [90]. À noter que certains pays ont choisi de construire et mettre en place des flottes de véhicules utilisant le bioéthanol pur (E100), notamment le Brésil et le Mexique.

La voie biochimique présente l'avantage d'être plus économique en énergie que la voie thermochimique. L'étape de l'hydrolyse enzymatique est cependant coûteuse [96]. Le procédé biochimique de la transformation de la biomasse en bioéthanol est représenté dans la figure I.8.



**Figure I.8 :** Processus de fabrication des filières de deuxième génération [88]

La voie thermochimique permet quant à elle de produire du biodiesel à partir de la biomasse. La matière première doit tout d'abord être prétraitée avant le processus thermochimique puisque la qualité de la biomasse ligno-cellulosique est importante à l'intérieur de ce procédé. Il s'agit ensuite de gazéifier la matière première sous des conditions de chaleur et de pression très élevées (1000 °C et 40 bars) et en présence d'un agent gazéifiant [90]. La biomasse est ainsi transformée en hydrogène et en monoxyde de carbone (CO), appelé gaz de synthèse [96].

Le gaz doit être épuré et permet ensuite d'effectuer des synthèses catalytiques orientées vers différentes familles de composés, dont les alcools et les alcanes [26]. Le résultat obtenu par ce procédé est ensuite traité à nouveau afin d'obtenir le carburant désiré, soit le biodiesel. La production de biocarburants par la voie thermochimique est plus rapide puisqu'il n'y a pas d'étape de fermentation comme dans le cas de la voie biochimique. Elle nécessite cependant

une production de chaleur notable, ce qui a pour effet de diminuer le bilan énergétique du procédé [96].

#### **I.4.4.1. Avantages**

Les biocarburants de deuxième génération offrent de nombreux avantages, notamment lorsqu'ils sont comparés aux points forts ainsi qu'aux critiques de la première. Tout d'abord, les ressources utilisées pour leur production sont à la fois plus abondantes et diversifiées [90]. En effet, puisque la plante peut être utilisée entièrement pour la fabrication de ces biocarburants, il en résulte que le rendement à l'hectare est beaucoup plus élevé qu'en comparaison avec la première génération [26]. De plus, les ressources sont plus variées, puisqu'il est possible d'avoir recours à des résidus agricoles, sylvicoles, forestiers, industriels et même domestiques [90]. Ils permettent donc de réduire considérablement la concurrence de l'usage des sols entre les produits destinés à l'alimentation et les biocarburants. Il faut rappeler que cette compétition était une critique importante concernant les biocarburants de première génération. Il est possible de produire ce type de carburant en fonction des matières premières disponibles, là elles se retrouvent, et ce sans avoir besoin de développer de nouvelles superficies cultivables. Certaines cultures servant à la production peuvent croître sur des terres marginales ou dégradées, ce qui permet une utilisation plus efficace des sols sans entrer en compétition avec les cultures alimentaires, qui nécessitent des terres arables d'une meilleure qualité [97]. Les bilans énergétiques et environnementaux sont par le fait même améliorés puisque la production permet aussi la valorisation de déchets de différents secteurs. Le fait que les besoins en eau et en engrais sont moindres que pour la première génération contribue également à améliorer ces bilans [90]. La plupart des biocarburants de deuxième génération permettent des bénéfices environnementaux et énergétiques importants et les coûts des matières premières sont moindres grâce aux caractéristiques intrinsèques des ressources utilisées [26]. Également, il est envisagé que la production de biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération sera bientôt déployée [97].

#### **I.4.4.2. Critiques**

Malgré les avantages prouvés, certaines inquiétudes sont associées au développement des biocarburants de deuxième génération. Par exemple, bien que les ressources en matières premières soient différentes de celles utilisées pour la première génération et n'entrent plus en compétition avec l'alimentation, leur développement ne doit pas conduire à une nouvelle concurrence causée pour l'obtention des matières ligno-cellulosiques. De plus, les résidus sont aussi utilisés à d'autres fins comme coproduits pour les animaux ainsi que la combustion pour

la production de chaleur ou d'énergie, il peut donc en résulter une compétition entre les différents usages [90]. Les résidus agricoles ne sont pas illimités non plus, la production de biocarburants à partir de ces ressources pourrait conduire à une pression sur la productivité [93].

La matière organique servant à la production des biocarburants de deuxième génération sert naturellement à la fabrication de l'humus, nécessaire à la fertilité des terres et à l'absorption du gaz carbonique par le sol. Il ne faut donc pas que l'utilisation de cette matière conduise à un appauvrissement du sol [93]. Certains soulignent que l'utilisation des ressources forestières ne doit pas entraîner la déforestation ou la concurrence avec les autres usages du bois, comme les matériaux de construction [90, 93]. Les résidus sylvicoles peuvent aussi être utilisés, mais le problème réside dans les systèmes de collecte et d'entreposage de ceux-ci qui doivent être développés [90].

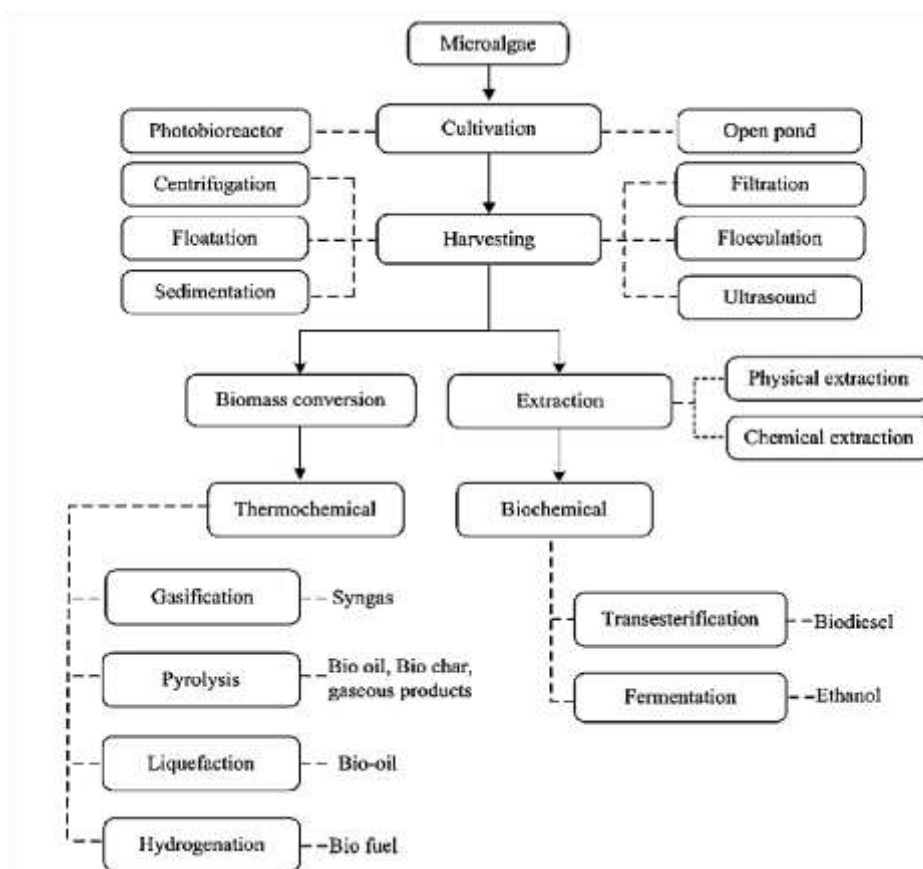
Les technologies pour la fabrication de cette génération de biocarburants sont encore immatures et il est nécessaire de poursuivre les investissements pour la recherche et le développement afin d'atteindre le seuil de la rentabilité [26]. Il est également plus coûteux actuellement de produire ce type de biocarburants que d'utiliser les ressources fossiles. La deuxième génération présente une alternative prometteuse, mais son déploiement à grande échelle commerciale est peu envisageable avant 2020, bien que certaines entreprises aient déjà lancé leur production localement [98].

#### **I.4.5. Procédé de production des biocarburants de troisième génération**

Les procédés pour la production de biocarburants grâce à des algues microscopiques sont plus complexes que pour les deux premières générations. Cette section traite non seulement de la fabrication des biocarburants, mais également des étapes préalables. La culture des algues, leur récolte, leur séchage, l'extraction des lipides puis la transformation en biocarburants sont abordés. La figure I.9 présente le processus général de la culture des algues et la transformation de celles-ci en biocarburants.

Les algues ont besoin pour croître d'une source d'énergie, de nutriments et de carbone. La culture des micro-algues peut se faire par trois méthodes différentes : photo-trophique, hétéro-trophique ou mixo-trophique. La méthode photo-trophique nécessite la lumière du soleil comme source d'énergie et le gaz carbonique comme source de carbone inorganique. Il est donc possible d'améliorer les rendements de la photosynthèse en introduisant une plus grande quantité de CO<sub>2</sub> dans le processus. C'est la seule qui serait techniquement et économiquement

envisageable pour une production à grande échelle [100]. La production est cependant limitée dans les régions où l'intensité des rayons solaires n'est pas constante tout au long de l'année [99]. L'utilisation de photobioréacteurs permet aussi d'accélérer le processus de croissance des micro-algues dans un environnement contrôlé [101]. Le procédé hétérotrophique ne nécessite pas de lumière et utilise plutôt un substrat organique comme le glucose ou le glycérol, à la fois comme source d'énergie et de carbone. Cette méthode représente donc une solution au problème de la régularité de la luminosité puisque les algues peuvent alors croître dans l'obscurité. Par contre, ce ne sont pas toutes les espèces qui peuvent être cultivées selon ce procédé et le risque de contamination par d'autres microorganismes est plus important à cause de la présence du substrat organique [99]. Aussi, lors de la respiration, les algues rejettent du dioxyde de carbone ce qui rend le procédé moins intéressant que la méthode photo-trophique [93]. Avec la méthode mixo-trophique, les micro-algues peuvent se développer avec l'une ou l'autre des méthodes, en fonction de la lumière et du carbone disponible. Les micro-algues peuvent autant avoir recours à la photosynthèse qu'à un matériel organique pour leur croissance [100]. Les micro-algues doivent être cultivées dans des températures entre 20°C et 30°C pour avoir une croissance optimale [103].



**Figure 1.9 :** Processus de la fabrication des biocarburants à partir des micro-algues [99]

Lorsque la culture des algues est effectuée, il faut ensuite les récolter pour les séparer de l'eau. C'est une étape qui pose un défi particulier à cause de la très petite taille des algues microscopiques qui sont en suspension dans l'eau. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour leur récolte. Il est possible de séparer les micro-algues de la suspension par différents moyens comme la sédimentation, la floculation et la flottaison [93]. La floculation permet, par exemple, d'agglomérer les algues ensemble à l'aide de l'ajout d'un flocculant qui perturbe la stabilité des particules et les amène à se regrouper [99]. Il est ensuite nécessaire de les amasser par centrifugation ou filtration. La centrifugation est la méthode généralement choisie pour la récolte des micro-algues puisqu'elle ne nécessite pas l'ajout d'agent chimique [99].

Ensuite, il est primordial de procéder au séchage de la biomasse récoltée. En effet, la présence d'eau pourrait nuire aux procédés des étapes suivantes, comme l'extraction des lipides et leur transformation en biocarburants. Pour ce faire, l'exposition au soleil est considérée comme la meilleure méthode. Cependant, dans les régions où l'intensité solaire n'est pas constante ou est limitée, il peut être nécessaire d'avoir recours à des combustibles fossiles pour produire la chaleur essentielle au séchage des micro-algues [99].

Une fois que les micro-algues sont séchées, il est possible d'en extraire les lipides qui serviront à la production de biocarburants. Cette étape est complexe puisque les cellules des algues retiennent efficacement les lipides. Les méthodes d'extraction des huiles par pression comme pour les graines d'oléagineux terrestres sont inefficaces pour les lipides des algues [93].

Deux procédés sont principalement utilisés pour extraire les lipides de cette biomasse : l'extraction à l'aide d'un solvant et l'extraction par un fluide supercritique [99]. La méthode chimique d'extraction des lipides avec un solvant est utilisée plus fréquemment. Le solvant permet de dissoudre les lipides dans les cellules des algues puis de les extraire ensuite par diffusion. Le désavantage réside dans la toxicité que le solvant représente pour l'environnement et les humains. Les produits qui peuvent être utilisés à cette fin sont par exemple le méthanol, l'éthanol, le n-hexane et un mélange de méthanol et de chloroforme. L'efficacité du solvant à extraire les lipides dépend surtout de la variété des micro-algues en question [93].

La méthode d'extraction à l'aide d'un fluide supercritique consiste à atteindre la phase critique du mélange gaz-liquide d'extraction [99]. À ce point, les propriétés thermo-physiques, comme la densité et la viscosité, changent radicalement en fonction de la température et de la pression. Le fluide modifie sa capacité de solvation et dissout les lipides [93]. Plusieurs fluides supercritiques sont à l'essai, et celui qui semble être le plus intéressant en ce moment



est le CO<sub>2</sub>. Il présente de nombreux avantages en comparaison à l'extraction chimique par un solvant, il est notamment non toxique et ses propriétés permettent d'atteindre facilement le point critique en plus d'éviter la dégradation thermique [99]. Les principaux désavantages de cette méthode sont les coûts d'opération élevés lors de la mise en œuvre d'un fonctionnement industriel en boucle [93]. Lorsque les lipides sont extraits des micro-algues, il est possible d'utiliser cette matière en les transformant en biocarburants. Différentes méthodes permettent la fabrication de biodiesel : la transestérification utilisant des catalyseurs homogènes ou hétérogènes et la transestérification *in situ* [93]. Le procédé général est le même que pour le processus de transformation des végétaux, expliqué précédemment.

#### **I.4.5.1. Avantages et perspectives d'avenir**

La troisième génération de biocarburants présente bien des avantages et des perspectives d'avenir particulièrement intéressantes. Effectivement, les algues microscopiques représentent les formes de vie les plus anciennes présentes sur la planète. Il en existerait entre 200 000 et plusieurs millions d'espèces avec des propriétés différentes. Cela constitue un réel défi scientifique ainsi qu'une grande variété de possibilités pour la production de biocarburants à partir de cette matière première. Elles représentent une alternative prometteuse et supérieure aux deux générations précédentes puisqu'elles permettent le même rendement tout en utilisant de 10 à 30 fois moins de surface de production. Les micro-algues peuvent produire une grande quantité de lipides, de protéines et de carbohydrates dans une période de temps très court [26]. En effet, certaines espèces peuvent contenir jusqu'à 80 % de leur poids sec en lipides, ce qui offre un potentiel considérable d'utilisation de la matière première [102]. De plus, leur vitesse de croissance est environ 50 fois plus rapide que celle des plantes terrestres [99].

Cette technologie est considérée comme une méthode de production de biodiesel renouvelable qui serait une alternative envisageable pour remplacer complètement les ressources pétrolières [102]. La méthode photo-trophique pour la culture des micro-algues permet aussi la capture du CO<sub>2</sub> lors de leur croissance et devient par le fait même un puits de carbone [93]. Elles comportent également d'autres avantages environnementaux. En effet, puisqu'elles nécessitent une grande quantité de nutriments, il est envisageable d'utiliser les eaux usées pour les produire [91]. Dans ce dernier cas, les micro-algues permettent de diminuer la demande chimique en oxygène (DCO) ainsi que la demande biologique en oxygène (DBO) à la condition de pouvoir ensuite récupérer les algues parmi les eaux usées [99]. Les avantages procurés par la production de biocarburants par les micro-algues sont donc potentiellement très intéressants. Certaines critiques sont cependant également adressées à cette nouvelle technologie.

### 1.4.5.2. Critiques

Certaines craintes sont exprimées par rapport à la troisième génération de biocarburants. Celles-ci sont surtout associées aux coûts et aux incertitudes liées à une production à grande échelle de micro-algues. Il existe une incertitude concernant la productivité des micro-algues. La production des lipides, protéines et carbohydrates est en fonction de la lumière du soleil et est donc influencée par les cycles saisonniers [26]. Certaines régions permettraient donc de plus grandes possibilités pour cette technologie alors que d'autres risquent de voir leurs investissements perdus. Également, peu d'analyses de cycle de vie ont été réalisées jusqu'à maintenant pour la production de biocarburants à partir d'algues, puisque certaines données sont toujours manquantes ou mal comprises. Les données obtenues sont basées sur les essais en laboratoires et pourraient être non représentatives lors d'une production à grande échelle [92]. La production de biocarburants à partir de micro-algues nécessite une très grande quantité d'énergie pour la culture, la récolte, le séchage et la transformation. Le bilan énergétique global en souffre et entraîne des coûts élevés [92]. La production de micro-algues est de ce fait plus dispendieuse que la culture des végétaux servant à la fabrication des biocarburants des deux premières générations [101].

À ce jour, la production de biocarburants par les micro-algues n'est pas une alternative viable pour le remplacement des énergies fossiles à cause de la quantité d'énergie élevée requise pour leur culture et leur transformation [92]. Des investissements importants sont nécessaires pour poursuivre la recherche et le développement de cette troisième génération de biocarburants. Il est essentiel d'accroître les connaissances et permettre la création de processus moins coûteux et plus efficaces qui la rendraient techniquement et économiquement viable.

## 1.5. Le biodiesel ailleurs dans le monde

L'Union européenne (UE) est le leader de file mondial pour la production de biodiesel avec une production de près de 7,0 milliards de litres en 2006. Cette production est réalisée à 80 % à partir d'huile de colza. Les principaux pays producteurs sont l'Allemagne, la France et l'Italie. Le développement rapide de la production de biodiesel dans l'UE est attribuable à la mise en place de nombreuses mesures incitatives (ayant atteint jusqu'à 0,47 €/l en Allemagne) et de réglementations imposant des teneurs minimum en biocarburants dans certains pays. Ces incitatifs ont favorisé une demande croissante pour les huiles végétales dans l'UE. En 2005, la valeur des exportations canadiennes d'huile de canola pour la production de biodiesel en Europe s'est élevée à 205 millions de dollars. Par ailleurs, l'Union européenne s'est fixé des objectifs

volontaires très ambitieux en matière de contenu minimum de biocarburant pour l'horizon 2020, soit de 10 % en moyenne pour les carburants de transport. À noter que la proportion de véhicules fonctionnant au diesel est beaucoup plus élevée en Europe qu'en Amérique du Nord [103].

Au Brésil et en Argentine, les usines de biodiesel sont en forte croissance, notamment en raison des quantités abondantes de soya et de colza qui y sont produites et de la volonté de ces pays de développer leur autonomie sur le plan de la production de carburant. Le Brésil est d'ailleurs un précurseur en matière de carburants renouvelables puisque l'éthanol y est utilisé comme carburant pour les véhicules depuis plus d'une trentaine d'années. Depuis le 1er janvier 2008, tout carburant diesel vendu au Brésil doit contenir à la min 2 % de biocarburant [103].

Les États-Unis sont également un important producteur de biodiesel. En 2007, 94 usines produisaient une quantité de biodiesel estimée à près de 3,0 milliards de litres. Par ailleurs, il est prévu que près de 5,0 milliards de litres supplémentaires seront produits dans un futur proche puisque 55 usines sont présentement en construction ou en expansion. Les usines de biodiesel sont localisées principalement à proximité de la matière première, soit dans les États du centre des États-Unis où est concentrée la production de grains oléagineux. En 2006, 90 % de la production de biodiesel des États-Unis a été produite à partir d'huile de soya, ce qui a accaparé près de 10 % de cette production au pays [103]. L'importante croissance de la production de biodiesel aux États-Unis s'explique, tout comme pour la production d'éthanol, par les diverses mesures incitatives mises en place par le gouvernement américain.

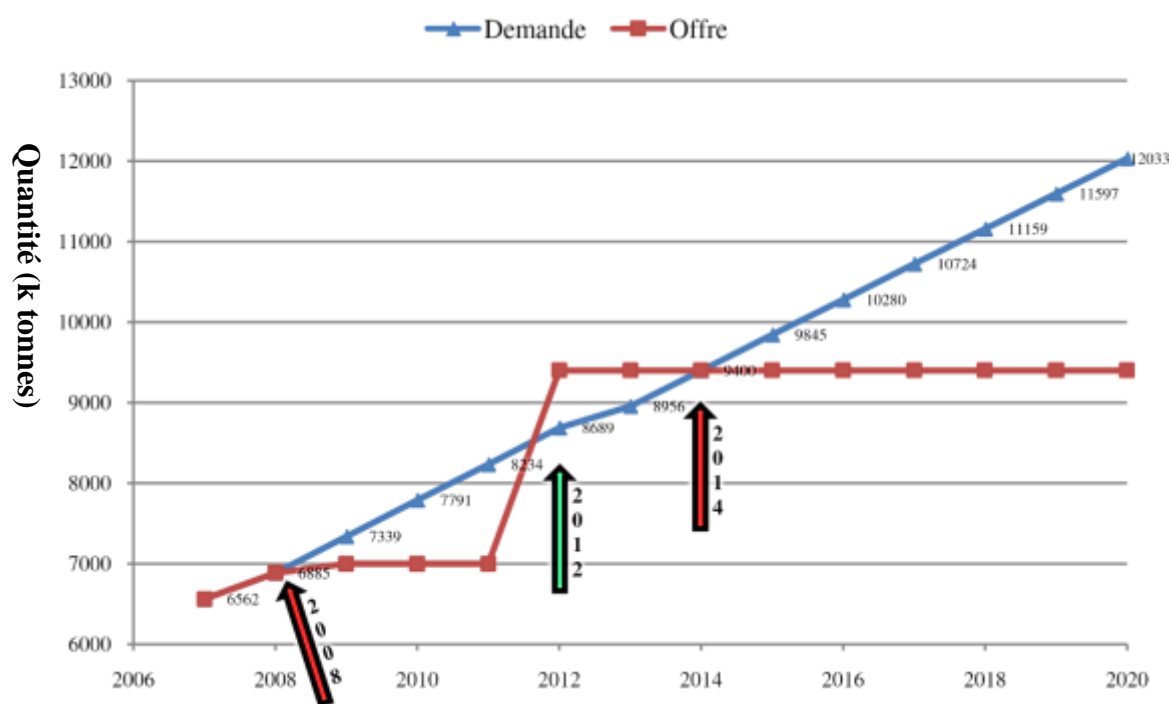
## **I.6. Situation des biodiesels en Algérie et en Afrique**

Certains pays africains ont davantage besoin d'accès à des sources d'énergie propres et renouvelables. Les nations productrices de pétrole comme l'Algérie, comptent sur cette source énergétique afin de satisfaire aux besoins énergétiques et optimiser ses intérêts économiques et industriels. D'autres pays africains dépendent des carburants fossiles, le bois de chauffe et le charbon de bois. Cette situation limite fortement le développement économique et social. À l'heure actuelle, l'industrie africaine des biocarburants paraît être une des solutions aux problèmes énergétiques et économiques du continent [25].

Loin d'être synonyme d'indépendance énergétique (production et consommation) les biocarburants permettraient le développement des économies africaines, actuellement étouffées par la grande demande des énergies fossiles. En outre, l'industrie des biocarburants pourrait créer des emplois et limiter le chômage jusqu'à une certaine mesure.

La richesse de notre pays en hydrocarbures et son appartenance à l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) (plus de 90% des exportations de l'Algérie viennent du pétrole et du gaz naturel) ont freinées toute tentative d'utilisation et d'exploitation des énergies renouvelables, malgré les richesses naturelles solaires, éoliennes, bio-massiques et géothermiques [87].

L'Algérie est située dans une zone vulnérable aux effets néfastes des changements climatiques dus à la pollution et aux déséquilibres environnementaux. Aujourd'hui le secteur du transport est générateur d'un quart des émissions des gaz à effet de serre, responsables de ce déséquilibre climatique, qui pourrait être à l'origine d'un tiers de ces émissions en 2030. De plus, la consommation et la demande en énergie pour une source d'origine fossile et épuisable, vont augmenter par rapport à l'offre. La Figure I.10 représente la comparaison chronologique entre la demande et l'offre pour les carburants Diesel en Algérie [105].



**Figure I.10 :** Evolution de la demande et de l'offre pour le Diesel en Algérie

La Figure I.8 montre un déficit enregistré de 2008 à fin 2011. À partir de 2012, date d'achèvement du programme de réhabilitation et d'adaptation, un excédent en Diesel a été enregistré jusqu'à 2014. Par la suite, une augmentation de la demande par rapport à l'offre est prévue, marquant ainsi un nouveau point de rupture [105].

Pour pallier à ces aléas, les énergies renouvelables sont la meilleure alternative durable, à travers l'utilisation des biocarburants. Les cultures énergétiques donnant naissance aux matières premières de production des biocarburants en Algérie, ne font pas recours à des sources comestibles, d'où l'intérêt pour les biocarburants extraits des huiles de friture usagées.

Consciente de l'intérêt grandissant des énergies renouvelables et de leurs enjeux, l'Algérie a intégré le développement de ce type d'énergie dans sa politique énergétique. L'adoption d'un cadre juridique favorable au développement de ces énergies, la réalisation d'importantes infrastructures dans ce domaine et la planification de projets, en sont l'illustration, malgré un développement en parallèle d'une bioénergie encore à l'échelle expérimentale dans les laboratoires de recherche. Dans le cadre du développement de travaux en biotechnologie, le Haut-Commissariat à la Recherche avait inscrit en 1988 un axe de recherche s'articulant sur l'application des biotechnologies dans la valorisation des déchets agricoles et industriels et ce, pour la production du bioéthanol, la production d'acétone-butanol (par utilisation de la biomasse) et enfin, la production de biogaz.

## **Chapitre II : Propriétés physico-chimique des biocarburants**

## II.1. Introduction

Les biocarburants sont des carburants produits à partir de matériaux organiques renouvelables et non-fossiles. Leur production peut se faire à partir d'huile ou graisse, d'alcool obtenu par fermentation alcoolique de sucres ou d'amidon hydrolyse et de biocarburants gazeux obtenus à partir de la biomasse végétale ou animale (dihydrogène ou méthane), ou de charbon de bois. On distingue aussi les agro-carburants de première et de seconde génération. Cette dénomination est utilisée pour distinguer les carburants issus des agro-ressources à source alimentaire, des carburants issus de source ligno-cellulosique (bois, feuilles, paille, etc.). Aussi on trouve le biocarburant de troisième génération extrait à partir des micro-algues.

La production des biocarburants à partir des matières premières utilisées dans l'alimentation ou dans des utilisations industrielles conduit à une compétition dans le marché et à une hausse de prix de ces matières. Le marché des produits alimentaires a explosé entre 2002 et 2008, suivant une étude publiée par la banque mondiale en 2008, le prix des denrées alimentaires a augmenté de 130% et la production des biocarburants est responsable de 75% de cette hausse de prix [106].

Le présent chapitre a pour objet d'étudier les propriétés des biocarburants, plus précisément le biodiesel, qui possède un indice de cétane plus élevé, une faible teneur en soufre que le diesel conventionnel. Les principaux désavantages de biodiesel sont sa viscosité plus élevée, une plus faible teneur en énergie, point trouble et point d'écoulement plus élevés, les émissions d'oxydes d'azote sont parfois élevés (NOx), et un coût élevé selon le procédé de production et la matière première utilisée.

## II.2. Les Caractéristiques principales des biocarburants

Les carburants doivent subir des tests de caractérisation afin de déterminer leurs propriétés physiques et chimiques. Des normes spécifiques doivent être respectées dans chaque pays et suivant chaque type de carburant. Lors de la caractérisation d'un carburant destiné à l'utilisation dans un moteur, les caractéristiques les plus intéressantes à étudier sont :

**Densité :** la densité d'un carburant a un effet important sur les performances du moteur. En fait les pompes d'injection de carburant sont des pompes volumétriques et le dosage de carburant se fait en calculant la masse du volume injecté en passant par la densité. Un carburant ayant une densité élevée conduit à une masse de carburant injecté plus importante et augmente la consommation.

**a) Viscosité** : la viscosité d'un carburant joue un rôle très important dans la combustion et affecte les performances du moteur et ses émissions polluantes. En fait le rôle de l'injection est de pulvériser le carburant en fines gouttelettes afin d'augmenter la surface de contact avec l'air. La viscosité élevée conduit à une mauvaise pulvérisation ce qui réduit la surface de contact air carburant. Cette mauvaise pulvérisation liée à une mauvaise volatilité provoque une combustion incomplète dans le moteur. Cette mauvaise combustion se traduit par des performances dégradées du moteur et des émissions polluantes plus élevées (suies, monoxydes de carbone et hydrocarbures imbrûlés). D'autre part, une faible viscosité limite la pénétration du jet de carburant dans le moteur et conduit aux mêmes effets qu'une viscosité élevée.

**b) Pouvoir calorifique** : Le pouvoir calorifique mesure la quantité de chaleur libérée lors de la combustion d'une masse donnée du carburant. Le pouvoir calorifique est dit " inférieur " (PCI) lorsque l'eau produit pendant la combustion est supposée restée à l'état de vapeur dans les émissions de combustion. Le pouvoir calorifique est dit " supérieur " (PCS) lorsque l'eau produit lors de la combustion est supposée ramenée à l'état liquide dans les émissions de combustion.

**c) Point d'éclair** : le point d'éclair est la température à laquelle la vapeur d'un carburant s'enflamme en présence de l'air sous l'effet d'une étincelle. En d'autres termes il est un indice de la présence des matières volatiles et inflammables dans le carburant. Un point éclair élevé indique que la matière présente moins de risques de s'enflammer lors du stockage ou de la manipulation.

**d) Point trouble** : le point trouble est la température à partir de laquelle le liquide commence à former des cristaux. Le point trouble est très important pour définir le comportement du carburant pendant l'hiver.

**e) Point d'écoulement** : le point d'écoulement est la température à partir de laquelle le liquide commence à s'écouler.

**f) Indice de cétane** : il indique la qualité de la combustion dans un moteur diesel. Un faible indice de cétane cause une longue durée d'auto-inflammation, une combustion lente et augmente les émissions polluantes dans un moteur diesel.

**g) Composition chimique C, H, N, O** : elle donne une idée sur le pouvoir calorifique et les produits et la qualité de la combustion.



**h) Teneur en soufre** : la présence du soufre dans un carburant provoque la formation des produits dangereux comme les oxydes de soufre qui forment des acides lors de leur contact avec l'eau, ils corrodent les pièces du moteur et favorisent la formation des suies dans les gaz d'échappement.

**i) Teneur en eau** : la présence de l'eau dans le carburant est une cause d'une mauvaise combustion surtout aux charges partielles. Elle peut contribuer à la corrosion des pièces du moteur.

**j) Cendres** : elles proviennent des impuretés qui se trouvent dans le liquide comme des métaux et sels minéraux ou de la boue et de la rouille. Leur présence provoque des dégâts sur les pièces du moteur. A côté de ces caractéristiques communes à tous les carburants compatibles avec le diesel on ajoute pour les biocarburants des caractéristiques concernant la stabilité à l'oxydation et à la corrosion des pièces du moteur.

**k) Indice d'iode** : c'est un indice des doubles ou triples liaisons qui se trouvent dans le carburant. La présence de ces types de liaisons indique l'aptitude de ce liquide à s'oxyder ou former des gommages ou des polymères lors des longues durées de stockage. Des antioxydants sont ajoutés aux carburants ayant des indices d'iode élevés lors de leur stockage à longues durées.

**l) Acidité** : l'acidité ou l'indice d'acide est mesuré par l'équivalence de mg d'hydroxyde de potassium nécessaires pour neutraliser un gramme de carburant. Il indique la teneur du liquide en acides organiques. Les hautes teneurs en acides organiques favorisent la corrosion des pièces du moteur.

**m) Teneur en esters** : théoriquement le biodiesel est composé d'esters (éthylrique ou méthylriques) des acides gras. Mais en pratique le biodiesel contient des impuretés qui viennent soit de l'huile qui n'est pas complètement transformée en esters d'où la génération des mono, di et triglycérides. D'autre part il y a des quantités d'alcool, de glycérine, et des impuretés qui restent dispersées dans le biodiesel.

**n) Teneur en alcool** : la présence d'alcool dans le biodiesel réduit son point d'auto-inflammation et risque de tomber sous les seuils recommandés par les normes.

### II.3. Le biodiesel comme carburant

Le biodiesel est un mélange constitué d'esters éthyliques ou méthyliques d'huile végétale (EEHV ou EMHV) ou de graisses animales. Contrairement au diesel conventionnel, qui est formé de plusieurs hydrocarbures composés uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène, le biodiesel contient de l'oxygène dans sa composition chimique. Le biodiesel est extrait d'une biomasse biodégradable, donc il est biodégradable, ce qui n'est pas le cas du diesel conventionnel [107]. La production et l'utilisation de biodiesel à l'échelle mondiale ont connues une forte croissance en raison des préoccupations environnementales accrues, de l'incertitude concernant la sécurité des réserves de pétrole brut.

La fabrication du biodiesel est une alternative de production de combustibles propres, biodégradables, non toxiques et renouvelables. Il peut à la fois utiliser comme carburant seul ou en mélange avec du diesel conventionnel. Le biodiesel pur ou mélangé, il réduit les émissions de toxines atmosphériques, de CO<sub>2</sub>, de matières particulaires, de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures et de fumée noire que génèrent les véhicules.

A côté de ces avantages, le biodiesel comporte quelques inconvénients comme son point de fusion, son point trouble et point d'écoulement élevés qui rendent son utilisation en hiver sous forme pure difficile sur les véhicules dans les pays à climats froids [39, 108]. Une solution probable de ce problème consiste à l'utiliser sous forme de mélanges ou de le préchauffer avant son injection au moteur, cette deuxième solution est possible sur les moteurs stationnaires à cogénération, une troisième solution consiste à séparer une fraction des méthyles esters saturés à longues chaînes carbonées qui ont des points de fusion et des points troubles élevés. Cette méthode est décrite par Gonzalez Gomez et al [109] qui ont réussi à baisser le point trouble des méthyles esters produites à partir d'une huile de friture usagée de 4°C.

Un autre problème de biodiesel est sa stabilité lors du stockage à longue durée, en fait les liaisons doubles et triples présentes dans les acides gras, sont instables et ont tendance à s'oxyder ou à former des gommages [110-112]. Ce type de problèmes est résolu soit par l'addition des antioxydants [113], soit par l'utilisation directe après la production.

Le principal inconvénient du biodiesel est lié à son prix élevé provenant du prix des huiles végétales constituant de 70 à 95% du prix total. Un autre problème associé est la compétition entre l'alimentation et la production des carburants. D'où la nécessité d'utiliser les déchets gras comme matière première de production du biodiesel.

## II.4. Matières premières utilisés pour la production du biodiesel

Les matières premières utilisées pour la production de biodiesel varient selon les pays, leurs climats et leurs politiques. Mais en général on peut classer ces matières premières en trois catégories : les huiles végétales comestibles, les huiles végétales non comestibles et les déchets graisseux animaux et végétaux.

### II.4.1. Les huiles végétales comestibles

On distingue : l'huile de palme, soja, olive, tournesol, etc. d'autres types d'huiles végétales alimentaires sont des sources possibles pour la fabrication des biocarburants comme les huiles d'arachide, de maïs, de noix de coco, du riz, de sésame etc. Mais elles sont plus chères que les autres types d'huile ce qui rend leur utilisation économiquement non faisable.

L'intérêt de connaître la composition d'une huile est évident, puisque celle-ci va avoir une influence sur les caractéristiques physiques essentielles pour évaluer la qualité du biodiesel qui en résulte comme la viscosité, le point de fusion et la stabilité thermique. De point de vue chimique, la composition des huiles est fonction des variations de conditions de culture (sol, amendement, climat, hygrométrie...). Les huiles végétales sont constituées essentiellement de triglycérides, d'acide gras libres et de produits secondaires [114].

Les acides gras sont répartis en trois catégories : majeurs, mineurs et inhabituels. Les acides gras majeurs sont les plus répandus et en grande quantité dans les plantes : l'acide laurique (C12), myristique (C14), palmitique (C16), stéarique (C18), oléique (C18:1), linoléique (C18:2), et linoléique (C18:3). Les acides gras mineurs, sont des constituants secondaires des corps gras. Les acides gras inhabituels sont des acides gras polyinsaturés à doubles liaisons conjuguées ou écartées, des acides gras acétyléniques (à triple liaison) ou encore des acides gras à fonction secondaire (exemple de la fonction alcool de l'acide ricinoléique mais aussi des fonctions cétones, de groupes époxy et d'acides gras cycliques). Les acides gras des triglycérides diffèrent par la longueur de la chaîne, le degré d'in-saturations et la présence d'autres fonctions chimiques.

Les acides gras sont constitués d'une chaîne linéaire d'un nombre pair d'atomes de carbone allant de 6 à 22 atomes (tableau II.1) [115-117]. D'autres produits secondaires, dont la teneur maximale est de l'ordre de 1 à 4 %, dans une huile brute normale sont essentiellement les tocophérols (antioxydants naturels).

**Tableau II.1 : Composition en acides gras (%) des huiles végétales**

Acide gras	Huile d'arachide [115]	Huile de palmiste [116]	Huile de tournesol [116]	Huile de soja [116]	Huile de palme [116]	Huile de neem [116]	Huile de jatropha curcas [117]
Oléique (18: 1)	58,68	15.4	21.1	23,4	39,2	44,5	44,7
Linoléique (18: 2)	21,77	2.4	66,2	53,2	10.1	18.3	32,8
Palmitique (16: 0)	8.23	8.4	-	11.0	44,0	18.1	14.2
Stéarique (18: 0)	2,46	2.4	4.5	4.0	4.5	18.1	7.0
Palmitoléique (16: 1)	0.11	-	-	-	-	-	0,7
Linoléique (18: 3)	0.34	-	-	7.8	0,4	0,2	0,2
Arachidique (20: 0)	1,83	0,1	0,3	-	-	0,8	0,2
Margarique (17: 0)	-	-	-	-	-	-	0,1
Myristique (14: 0)	0,12	16.3	-	0,1	1.1	-	0,1
Caproïque (6: 0)	-	0,2	-	-	-	-	-
Caprylique (8: 0)	0,01	3.3	-	-	-	-	-
Laurique (12: 0)	0,28	47,8	-	-	0,2	-	-
Caprique (10: 0)	0,01	3.5	-	-	-	-	-
Béhénique (22: 0)	3,89	-	-	-	-	-	-
Saturé	16,81	82,1	11.3	15.1	49,9	37	21.6
Mono-insaturés	58,79	15.4	21.1	23,4	39,2	44,5	45,4
Polyinsaturé	22.11	2.4	66,2	61,0	10.5	18.5	33

#### II.4.2. Les huiles végétales non comestibles

Dans les pays en développement la demande en huiles alimentaires est satisfaite par l'importation, ce qui élimine la possibilité de les utiliser comme matières premières de fabrication des biocarburants. D'où la nécessité d'utiliser des plantes et des arbres oléagineux non comestibles et qui poussent dans des surfaces incultes. On note de ces sources : l'huile de jatropha, l'huile de karanja (*Pongamia pinnata*), l'huile de mahua, l'huile de neem (*Azadirachta indica*), l'huile de jojoba et les micro-algues.

L'utilisation des graisses animales ou des huiles végétales usagées peuvent réduire le prix du carburant. En même temps, l'utilisation des graisses animales et des huiles végétales usagées résout un problème environnemental en les éliminant d'une manière écologique. Les déchets (huiles, graisses) proviennent soit des restaurants comme les huiles végétales et les graisses animales utilisées pour la friture et la cuisine de la viande et du poisson, ou des abattoirs comme les graisses non comestibles restant après la découpe de carapaces et l'huile de poisson provenant des produits de pêche.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été faits sur la production du biodiesel à partir des huiles de friture usagées suivant plusieurs méthodes dont la plupart étant menées sur la transestérification à catalyse basique [13, 118, 119].

#### **II.4.3. Les huiles usées de cuisson comme source de biodiesel**

Comme toutes les activités économiques, le secteur de la restauration est un producteur de déchets et plus particulièrement des huiles alimentaires usagées, essentiellement des huiles de friture. La valorisation de ces huiles usées en biodiesel évite leurs déversements dans le réseau d'assainissement et par conséquent la protection des installations de traitement des eaux et l'environnement. De nombreux chercheurs ont rapportés que la production de biodiesel à partir des huiles de cuisson (friture) usées est plus rentable que celle des huiles vierges.

Le coût de production du biodiesel à partir des huiles usées est de 2,5 à 3,0 fois moins chères que celui des huiles végétales vierges, ce qui pourrait réduire considérablement le coût total de production du biodiesel et le rendre concurrent au diesel conventionnel [42, 120]. Néanmoins, il a été noté que les huiles de friture usagées peuvent présenter certains effets négatifs comme la formation de polymères d'acides et des glycérols. Ces effets entraînent une augmentation de la viscosité de l'huile usée [121] et une augmentation des teneurs en acides gras libres [122]. Par ailleurs, la présence d'une forte teneur en eau dans l'huile usée entraîne une réduction du rendement en biodiesel lors de la transestérification par la réaction concurrente de saponification [122].

#### **II.5. Propriétés physico-chimiques du biodiesel**

A cause de la demande croissante du biocarburant, de nombreux pays du monde s'est accompagné d'élaborer de normes de commercialisation visant à garantir la haute qualité des produits et la confiance des utilisateurs. Certaines des normes de biodiesel sont ASTM D6751 (ASTM signifie « American Society for Testing and Materials » Société américaine pour les tests et les matériaux) et la norme européenne EN 14214, qui a été développée à partir de normes existantes dans différents pays européens [123].

La source de production affecte directement les propriétés du biodiesel, qui sont influencées par la nature des composants issus de la production ou d'autres sources. Typiquement, les composants naturels déterminent en dernier-ressort les propriétés physiques du carburant. Certaines des propriétés mentionnées dans les normes peuvent être attribuées à la structure des esters gras dans le biodiesel. La réaction de transestérification d'une huile ou

d'une graisse conduit à un carburant biodiesel dont le profil en acides gras correspond à celui de l'huile ou de la graisse mère. Par conséquent, le biodiesel est en grande partie composé d'esters gras, chaque composant ester contribuant aux propriétés du carburant [123,124].

Les propriétés de biodiesel qui sont déterminées par la structure de ses esters gras constitutifs et de la nature de ses composants mineurs comprennent la qualité de l'allumage, l'écoulement à froid, la stabilité à l'oxydation, la viscosité et le pouvoir lubrifiant. En Général, comme il s'agit de l'alcool le moins coûteux, le méthanol est utilisé pour produire du biodiesel. Dans la plupart des cas, le biodiesel peut être appelé le méthyl ester d'acide gras (Fatty Acid Methyl Ester FAME) des huiles végétales ou des graisses animales. Cependant, à la fois la chaîne d'acide gras et de la fonctionnalité d'alcool contribuent aux propriétés globales d'un ester gras. Il est nécessaire de prendre en compte les propriétés conférées par d'autres alcools donnant des esters alkylés d'acides gras (Fatty Acid Alkyl Esters FAAE), qui pourraient être utilisés pour la production de biodiesel.

### II.5.1. Indice de cétane

L'indice de cétane (IC) est une mesure des caractéristiques d'auto-inflammation d'un carburant [125]. Généralement, le biodiesel est composé de plusieurs groupes hydrocarbonés à chaîne longue (avec pratiquement pas de ramification ou des structures aromatiques). Typiquement avoir un IC plus élevé que le diesel conventionnel et l'augmentation du pourcentage de biodiesel, cela augmente l'indice de cétane du mélange [126]. IC est mesurée selon la norme EN-ISO 5165, où elle est limitée à 51 au minimum, et selon la norme ASTM D-613, où elle est limitée à 47 au minimum.

Le biodiesel produit à partir de matières premières riches en acides gras saturés (tels que le suif et la palme) a un IC plus élevé que les carburants produits à partir de matières premières moins saturées (telles que le soja et le colza). L'effet de la ramification sur l'IC dans l'alcool utilisé pour produire le biodiesel est très faible et difficile à discerner [126]. L'indice de cétane des molécules d'ester méthylique d'acide gras (EMAG) pur augmente avec la longueur de la chaîne, mais cet effet est masqué lorsque l'on considère des mélanges complexes de carburants EMAG. D'autre part, l'IC des combustibles EMAG varie clairement avec le degré moyen d'insaturation. La littérature rapporte également qu'un degré croissant d'insaturation conduit à un IC plus bas [127, 128]. Laureate et al. [129] ont proposés une équation prédictive pour l'Indice de cétane d'EMAG, largement dictée par le nombre de doubles liaisons dans EMAG (ainsi que par le nombre de carbones d'EMAG) [94]. Ces auteurs ont également noté la forte corrélation entre l'IC et l'indice d'iode (II).

Il est à noter qu'aucune corrélation entre l'indice de cétane (cetane number CN) et l'index de cétane (cetane index CI) n'est apparente et que l'index de cétane n'a pas de corrélation significative avec l'insaturation moyenne ou l'indice d'iode. Ces observations suggèrent que les valeurs de l'index de cétane (CI) rapportées dans la littérature ne sont pas fiables et soulignent le problème qui existe à l'heure actuelle.

### II.5.2. Propriétés d'écoulement à froid

La performance à basse température est l'une des propriétés les plus importantes pour les utilisateurs de biodiesel. Les principaux problèmes associés à l'utilisation de biodiesel sont les propriétés d'écoulement médiocres à basse température, documentées par un point trouble relativement élevé (PT) (*PT est la température à laquelle les cristaux apparaissent pour la première fois*) et un point d'écoulement (PE) (*PE est la température la plus basse que on observe le carburant s'écoule*) [124]. Le PT se produit généralement à une température supérieure à celle du PE, est causée par la température à laquelle une matière grasse devient trouble en raison de la formation de cristaux et de la solidification de composés saturés [123]. Les solides et les cristaux croissent et s'agglomèrent rapidement, obstruons les conduites de carburant et les filtres, posant d'importants problèmes de fonctionnement. Lorsque vous diminuez la température, plus de solides se forment et le matériau se rapproche du PE, la température la plus basse à laquelle le matériau continuera de couler. Les composés gras saturés ont des points de fusion significativement plus élevés que les composés gras insaturés, dans un mélange, ils cristallisent à des températures supérieures à celles des composés insaturés. Ainsi, les carburants biodiesel dérivés de graisses ou d'huiles contenant une quantité importante de composés gras saturés présenteront des PT et des PE plus élevés [124].

Par ailleurs, en plus les tests du point trouble (ASTM D2500) et du point d'écoulement (ASTM D97). Il existe deux méthodes d'essai pour les propriétés d'écoulement à basse température du pétro-diesel, à savoir le test d'écoulement à basse température TEBT (low-temperature flow test LTFT) (utilisé en Amérique du Nord; par exemple, ASTM D4539) et le point de colmatage du filtre à froid PCFF (cold filter plugging point CFPP, c'est-à-dire la température la plus basse à laquelle un véhicule fonctionne) (utilisé en dehors de l'Amérique du Nord; par exemple, la norme européenne EN 116). Ces méthodes ont également été utilisées pour évaluer le biodiesel et ses mélanges. Les tests de filtrabilité basse température ont été jugés nécessaires en raison de leur corrélation avec les tests d'opérabilité du PT et du PE [123]. Toutefois, pour les formulations de carburant contenant au moins 10% en volume d'esters

méthyliques, TEBT et PCFF sont des fonctions linéaires de la PT [30]. Une analyse statistique supplémentaire a montré une forte corrélation 1: 1 entre TEBT et PT [131].

Plusieurs approches des problèmes d'esters à basse température ont été étudiées, notamment le mélange avec le pétro-diesel, l'hivernisation, les additifs, les esters à chaîne ramifiée et les substituants volumineux dans la chaîne. Cette dernière approche peut être considérée comme une variante de l'approche additive, car les composés correspondants ont été étudiés dans le biodiesel à des niveaux additifs.

En comparaison, le point trouble du soja méthylique se situe autour de 0 °C [132, 133]. Cependant, en termes économiques, seuls les esters isopropylique semblent attrayants en tant qu'esters à chaîne ramifiée, même s'ils sont plus coûteux que les esters méthyliques. La ramification dans la chaîne ester n'a aucun effet négatif sur les composés d'IC, comme décrit ci-dessus.

La hivernisation [134-136], est basée sur les points de fusion inférieurs des composés gras insaturés par rapport aux composés saturés. Cette méthode élimine par filtration les solides formés lors du refroidissement des esters d'huile végétale, laissant un mélange avec une teneur plus élevée en esters gras insaturés et donc avec des PT et PE plus faibles. Les composés gras saturés, dont les IC sont supérieurs à ceux des composés gras insaturés, font partie des principaux composés éliminés par hivernisation. Ainsi, l'IC du biodiesel diminue pendant l'hivernisation. La perte de matière est réduite lorsque l'hivernisation est effectuée en présence d'améliorant d'écoulement à froid ou de solvants tels que l'hexane et l'isopropanol [136].

### II.5.3. Densité

La densité est définie comme la masse par unité de volume d'un fluide. Les conditions standard adoptées par l'industrie pétrolière sont 60 ° F (15,5 ° C) et 1 atm [137]. Pour un carburant la densité est une propriété clé qui influe sur la performance et les émissions polluants du moteur [138]. Étant donné que les pompes d'injection de carburant mesurent le carburant en volume, et non en masse, une masse grande ou petite de carburant est injectée en fonction de sa densité. Ainsi, le rapport air-carburant et la teneur énergétique dans la chambre de combustion sont influencées par la densité du carburant. La densité est mesurée selon la norme EN-ISO 3675/12185 où elle est limitée à 860-900 kg/m<sup>3</sup>, et selon la norme ASTM-1298 où la limite de densité de biodiesel est de 880 kg/m<sup>3</sup>.

Normalement, les densités du biodiesel sont légèrement supérieures à celles du diesel à base de pétrole, l'augmentation du pourcentage de mélanges de biodiesel augmente la densité



du mélange. Comme le montre la figure II.1, la densité d'ester méthylique d'acide gras (EMAG) est fortement affectée par le degré d'insaturation, une insaturation plus élevée conduisant à une densité accrue (plus élevée) [138].

Kent H. a signalé dans son article [138] que la longueur de la chaîne influe également sur la densité du biodiesel, une longueur de chaîne plus élevée entraînant une densité de carburant plus faible. Cependant, cela ne semble pas être le cas pour l'ensemble des 12 carburants biodiesel étudiés dans la figure II.1.

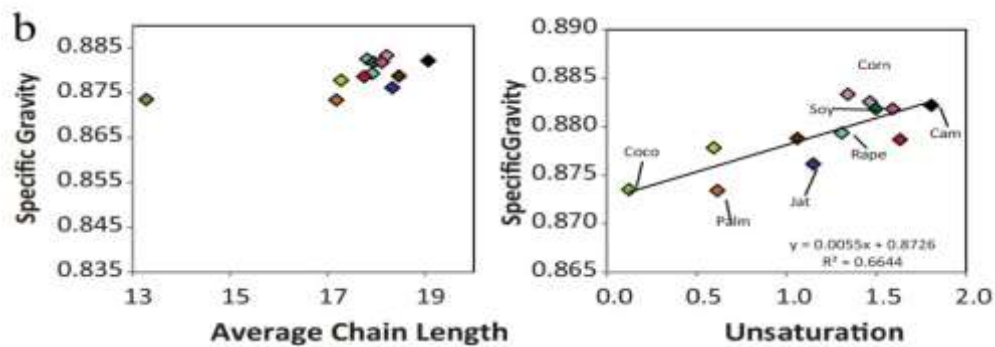


Figure II.1. Poids spécifique,  $T = 15,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  [138]

#### II.5.4. Viscosité

La viscosité affecte la pulvérisation du carburant lors de l'injection dans la chambre de combustion, ce qui va influencer sur la formation de dépôts dans le moteur [123]. Plus la viscosité est élevée, le carburant a une tendance à causer de tels problèmes. La viscosité d'une huile transestérifiée (biodiesel) est inférieure d'environ un ordre de grandeur à celle de l'huile mère [123, 124]. La viscosité élevée est la principale raison pour laquelle les huiles végétales non diluées ont été largement abandonnées en tant que substituts du diesel conventionnel. La viscosité cinématique a été incluse dans la plupart des normes de biodiesel. La différence de viscosité entre l'huile mère et les dérivés d'ester alkylique peut être utilisée pour contrôler la production de biodiesel [139]. L'effet de la viscosité sur les mélanges de biodiesel et de diesel conventionnel a également été étudié [140], et une équation a été dérivée pour calculer la viscosité de tels mélanges.

La viscosité cinématique est définie comme le rapport entre la viscosité absolue (dynamique)  $\mu$  et la densité absolue  $\rho$  à la même température. Les valeurs de viscosité cinématique sont généralement mesurées et rapportées à deux températures de référence,  $38 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $100 \text{ } ^\circ\text{F}$ ) et  $99 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $210 \text{ } ^\circ\text{F}$ ). Cependant, d'autres températures de référence,  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $104 \text{ } ^\circ\text{C}$ ),  $50 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $122 \text{ } ^\circ\text{F}$ ) et  $60 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $140 \text{ } ^\circ\text{F}$ ) sont également utilisées pour mesurer les viscosités cinématiques

du carburant [137]. La viscosité cinématique est mesurée selon la norme EN-ISO 3104, où elle est limitée de 3,5 à 5,0 mm<sup>2</sup>/s, et selon la norme ASTM D-445, où elle est limitée de 1.9 à 6,0 mm<sup>2</sup>/s.

La prédiction de la viscosité des matières grasses a fait l'objet d'une attention considérable dans la littérature. Les valeurs de viscosité du 'biodiesel / mélanges d'esters gras' ont été prédites à partir de la viscosité des composants individuels par une équation logarithmique de la viscosité dynamique [141]. La viscosité augmente avec la longueur de la chaîne (nombre d'atomes de carbone) et avec l'augmentation du degré de saturation. Ceci est également valable pour la fraction alcool car la viscosité de l'ester éthylique est légèrement supérieure à celle de l'ester méthylique [142]. Des facteurs tels que la configuration de la double liaison influencent la viscosité (la configuration de la double liaison cis donne une viscosité inférieure à celle de la configuration trans) ; « dans une chaîne de molécules, si les principaux groupes fonctionnels sont situés du même côté (cis, 'ensemble') ou au contraire de part et d'autre (trans, 'à travers') » ; tandis que la position de la double liaison a un effet moindre sur la viscosité [142]. Ainsi, une matière première telle que l'huiles de friture usées, qui est plus saturée et contient certaines quantités de chaînes d'acides gras trans, à une viscosité supérieure à celle de l'huile mère. La ramification dans la partie ester a peu ou n'a pas d'influence sur la viscosité, ce qui montre encore qu'il s'agit d'une approche techniquement prometteuse pour améliorer les propriétés à basse température sans affecter significativement les autres propriétés du carburant.

### II.5.5. Point d'éclair

Le point d'éclair est défini comme la température la plus basse à laquelle un carburant dégage suffisamment de vapeurs, pour qu'une fois la vapeur soit mélangée avec l'air s'enflamme momentanément [124]. Le point d'éclair du biodiesel est utilisé comme propriété pour limiter le taux d'alcool restant et qui n'a pas réagi dans le carburant final. Le point d'éclair est également important pour les exigences légales et pour les précautions de sécurité impliquées dans la manipulation et le stockage du carburant, il est normalement spécifié dans les réglementations en matière d'assurance et de prévention des incendies.

Le point d'éclair du biodiesel pur est considérablement plus élevé que les limites prescrites, mais peut diminuer rapidement avec l'augmentation de l'alcool résiduel. Etant donné que ces deux aspects sont fortement corrélés, le point d'éclair peut être utilisé comme indicateur de la présence de méthanol dans le biodiesel. Le point d'éclair est utilisé comme une régulation pour catégoriser le transport et le stockage des carburants, avec des seuils différents d'une région à

l'autre. Par conséquent, l'alignement de la norme exigerait peut-être un alignement correspondant des réglementations [124]. Le point éclair est mesuré conformément à la norme EN-ISO 3679, où il est limité à 101 °C minimum, et à la norme ASTM D-93, où il est limité à 130 °C au minimum.

### **II.5.6. Stabilité oxydation**

La stabilité à l'oxydation du biodiesel a fait l'objet de nombreuses recherches [123, 143, 144]. Ce problème affecte le biodiesel principalement pendant le stockage prolongé. L'influence de paramètres tels que la présence d'air, de chaleur, de traces de métal, d'antioxydants et de peroxydes ainsi que la nature du conteneur de stockage a été étudiée dans les études susmentionnées. En règle générale, des facteurs tels que la présence d'air, des températures élevées ou la présence de métaux facilitent l'oxydation. Les études réalisées avec la méthode automatisée de l'indice de stabilité d'huile (oil stability index OSI) ont confirmé que l'effet catalyseur des esters gras, en particulier l'insaturation, était encore plus important [145]. De nombreuses autres méthodes, y compris non seulement les produits chimiques humides tels que l'indice d'acide et l'indice de peroxyde, mais également l'analyse calorimétrique différentielle sous pression, la résonance magnétique etc., ont été appliquées aux études d'oxydation du biodiesel.

L'indice d'acide et la viscosité sont deux méthodes simples pour évaluer la qualité du biodiesel stocké, car elles augmentent toutes les deux de manière continue avec la dégradation croissante du carburant, c'est-à-dire la dégradation de sa qualité. L'indice de peroxyde est moins approprié car il atteint un maximum et peut ensuite diminuer à nouveau en raison de la formation de produits d'oxydation secondaires [146].

Une norme européenne (EN 14112; méthode Rancimat) concernant la stabilité à l'oxydation a été incluse dans les normes américaine et européenne sur le biodiesel (ASTM D6751 et EN 14214). Les deux normes de biodiesel prévoient la détermination de la stabilité à l'oxydation à 110 °C. Cependant, la norme EN 14214 prescrit un temps d'induction minimum de 6 heures avec la méthode Rancimat, tandis que la norme ASTM D6751 en prescrit 3 heures. La méthode Rancimat est presque identique à la méthode OSI, qui est une méthode AOCS (American Oil Chemists Society).

En plus de prévenir l'exposition des matières grasses à l'air, l'ajout d'antioxydants est une méthode courante pour résoudre le problème de la stabilité à l'oxydation. Les antioxydants

courants sont les matériaux synthétiques tels que la *tert*-butylhydroquinone (TBHQ), le butyle d'hydroxytoluène (BHT), butyle d'hydroxyanisole (BHA) et le propyl gallate (PG) ainsi que des matériaux naturels tels que les tocophérols. Les antioxydants retardent l'oxydation mais ne l'empêchent pas, car l'oxydation commence une fois que les antioxydants contenus dans un matériau ont été consommés.

### II.5.7. L'indice d'iode

Dans les normes européennes de biodiesel, l'indice d'iode (II) [123] est l'un des facteurs permettant de résoudre le problème de la stabilité à l'oxydation et de la propension de l'huile ou de la graisse à polymériser et à former des dépôts dans le moteur. L'indice d'iode est une mesure de l'insaturation totale d'une matière grasse mesurée en grammes d'iode pour 100 g d'échantillon lors de l'ajout formel d'iode aux doubles liaisons. Une valeur d'II de 120 a été spécifiée dans les normes EN 14214 et 130 dans la norme EN 14213, ce qui exclurait en grande partie les huiles végétales telles que les huiles de soja et de tournesol en tant que matière première de biodiesel. La norme d'indice d'iode n'a pas été incluse dans les normes relatives au biodiesel aux États-Unis et en Australie et est limitée à 140 dans la norme sud-africaine (ce qui permettrait l'utilisation des huiles de tournesol et de soja); la norme brésilienne provisoire exige seulement que cela soit noté.

L'indice d'iode de l'huile végétale ou de la graisse animale est presque identique à celle des esters méthyliques correspondants. Cependant, l'II des esters alkyliques diminue avec les alcools élevés utilisés dans leur production car la II dépend du poids moléculaire. Par exemple, l'II de méthyle, d'éthyle, de propyle et de butyle linoléate est respectivement de 172.4, 164.5, 157.4 et 150.8 [147].

L'utilisation d'un mélange de l'II à ces fins ne prend pas en compte le fait qu'un nombre infini de profils d'acide gras peuvent donner le même II et que différentes structures d'acide gras peuvent donner le même II, bien que la propension à l'oxydation puisse différer de manière significative [147]. D'autres nouvelles structures, appelées équivalentes positions allyliques et équivalentes positions bis-allyliques (allylic position équivalent APE, bis-allylic position équivalent BAPE), qui sont basées sur le nombre de ces positions dans une chaîne d'acide gras et indépendantes du poids moléculaire, sont probablement plus appropriées que les valeurs II [147]. L'indice BAPE distingue correctement que les mélanges ayant une II presque identique par-rapport au temps d'indice de stabilité de leurs l'huile. Notez que l'indice BAPE est indice décisif par rapport à l'APE car il concerne les positions bis-allyliques plus réactives.

Les essais de performance du moteur avec un mélange d'huiles végétales et de différents indices d'iode ont données des résultats qui auraient justifié un faible indice d'iode [128, 148]. Dans une autre étude sur le biodiesel, aucune relation entre l'indice d'iode et la stabilité d'oxydation n'a été observée avec une gamme étendue de l'indice d'iode [145].

### **II.5.8. Lubricité**

La lubricité fait référence à la réduction du frottement entre les surfaces solides en mouvement relatif. La lubricité des carburants diesel est de plus en plus importante cela est dû à la croissance des carburants diesel à base de pétrole à faible teneur en soufre [123]. La désulfuration du pétro-diesel réduit ou élimine la lubricité inhérente à ce carburant, essentiel au bon fonctionnement des composants vitaux du moteur, tels que les pompes à carburant et les injecteurs. Plusieurs études [126,139, 141, 143] sur la lubricité du biodiesel ou de ses composés gras ont montré l'effet bénéfique de ces matériaux sur la lubricité du pétro-diesel, en particulier du carburant à base de biodiesel à faible teneur en soufre. L'ajout de biodiesel à un niveau bas (1 à 2%) rétablit la lubricité des dérivées du diesel à faible teneur en soufre. Cependant, l'effet de biodiesel améliorant la lubricité à de faibles niveaux de mélange est principalement dû à des composants du biodiesel tels que les acides gras libres et les mono-acyl-glycérols [129], qui possèdent des groupes COOH et OH libres. D'autres études [149, 150] soulignent également l'effet bénéfique des composants mineurs sur la lubricité du biodiesel, mais ces études ne sont pas tout à fait d'accord sur les espèces responsables [129, 149]. Ainsi, le biodiesel est requis à des niveaux de 1 à 2% dans le pétro-diesel à faible lubricité, afin que les composants mineurs soient des agents améliorant l'efficacité de la lubricité [129]. À des taux de mélange supérieurs, tels que 5%, les esters sont suffisamment efficaces sans la présence de composants mineurs.

Bien que la longueur de la chaîne d'acide gras n'affecte pas de manière significative la lubricité, l'insaturation améliore légèrement la lubricité ; ainsi, un ester tel que le méthyl linoléate améliore davantage la lubricité que le stéarate de méthyle [125, 129]. Conformément à l'observation sur l'effet des groupes OH libres sur la lubricité, l'huile de ricin présente une meilleure lubricité que d'autres esters d'huile végétale [125, 150, 151]. Les esters éthyliques ont une lubricité améliorée par rapport aux esters méthyliques [150].

### **II.5.9. Autres propriétés**

#### **II.5.9.1. Cendres sulfatées**

Teneur en cendres décrit la quantité de contaminants inorganiques tels que des solides abrasifs et les résidus de catalyseur, ainsi que la concentration de savons métalliques solubles

contenus dans le carburant. Ces composés sont oxydés pendant le processus de combustion pour former des cendres, ce qui peut contribuer à l'injecteur, la pompe à carburant, l'usure des pistons et des segments, et aussi de dépôts dans les moteurs [124]. La quantité de cendres sulfatées est mesurée selon la norme EN-ISO 3987 et ASTM D-874 et limitée à 0,02% en maximum de la masse.

### **II.5.9.2. Soufre**

L'effet de la teneur en soufre sur l'usure et les dépôts du moteur semble varier considérablement en importance et dépend en grande partie des conditions de fonctionnement. La teneur en soufre du carburant peut également affecter les performances du système de contrôle des émissions et diverses limites ont été imposées pour des raisons environnementales. Le biodiesel est essentiellement sans soufre [124]. La quantité de soufre est mesurée selon la norme EN-ISO 20846/20884 où elle est limitée à 10,0 mg.kg<sup>-1</sup> et selon la norme ASTM D-5453 / D-4294 où elle est limitée à 15/500 mg.kg<sup>-1</sup>.

### **II.5.9.3. Métaux alcalins de la terre**

Les ions métalliques sont introduits dans le carburant biodiesel pendant le processus de production ou pendant le stockage. Alors que les métaux alcalins sont introduits à partir de résidus de catalyseur, les métaux alcalino-terreux peuvent provenir d'un lavage à l'eau dure. Le sodium et le potassium sont associés à la formation de cendres dans le moteur, les savons au calcium sont responsables du collage de la pompe d'injection. Ces composés sont partiellement limités par les cendres sulfatées, mais des contrôles plus stricts sont nécessaires pour les véhicules équipés de pièges à particules [124]. Les quantités de métaux du groupe I (Na et K) sont mesurées selon les normes EN 14108/14109 et ASTM sont conformes à la méthode EN 14538 dans la mesure où elles sont limitées à 5 mg.kg<sup>-1</sup>. Les quantités de métaux du groupe II (Ca et Mg) sont mesurées à la norme EN 14538, où elles sont limitées à 5 mg.kg<sup>-1</sup>.

### **II.5.9.4. Contenu du méthanol ou de l'éthanol**

Le méthanol ou l'éthanol peut provoquer la corrosion du système de carburant, une faible lubricité et des effets néfastes sur les injecteurs en raison de leur grande volatilité. Le méthanol et l'éthanol sont également nocifs pour certains matériaux dans les systèmes de distribution de carburant et les systèmes de carburant pour véhicules. Le méthanol et l'éthanol ont tous deux une incidence sur le point éclair des esters [124]. La quantité de méthanol ou d'éthanol est mesurée conformément à la norme EN 14110 et est limitée à 0,20% m / m, et conformément à

la norme ASTM selon la méthode EN 14538 où elle est limitée à 0,20 % masse (MeOH).

#### **II.5.9.5. Corrosion de bande de cuivre**

Ce test sert à mesurer les difficultés possibles avec les pièces en cuivre, en zinc, en laiton ou en bronze qui font partie du système de carburant. La présence d'acides ou de composés soufrés peut ternir la bande de cuivre, ce qui provoque la corrosion. Une bande de cuivre est chauffée à 50 °C dans un bain de carburant pendant trois heures, puis comparée à des bandes standard pour déterminer le degré de corrosion. La corrosion résultant du biodiesel pouvant être induite par certains composés soufrés et par des acides, de sorte que ce paramètre est corrélé avec un indice d'acide [124]. La corrosion des bandes de cuivre est mesurée conformément à la norme EN-ISO 2160 dont le degré est limité à 1 et à la norme ASTM D-130 où le degré est limité à 3.

#### **II.5.9.6. Teneur en phosphore**

Le phosphore dans les FAME provient des phospholipides (matières animales et végétales) et des sels inorganiques (huiles de friture usagée) contenus dans la matière première. Le phosphore peut endommager les convertisseurs catalytiques utilisés dans les systèmes de contrôle des émissions et son niveau doit être maintenu bas. Les convertisseurs catalytiques deviennent de plus en plus courants sur les équipements alimentés au diesel à mesure que les normes d'émissions sont resserrées, de sorte que les faibles niveaux de phosphore gagnent en importance. Il a été démontré que le biodiesel produit à partir de sources américaines avait une faible teneur en phosphore (inférieure à 1 ppm), de sorte que la valeur maximale spécifiée de 10 ppm ne pose pas de problème. Le biodiesel provenant d'autres sources peut contenir ou non des niveaux plus élevés de phosphore. Cette spécification a été ajoutée afin de garantir que tout le biodiesel, quelle que soit sa source, présente une faible teneur en phosphore [124]. La teneur en phosphore est mesurée conformément aux normes EN 14107 et ASTM D-4951 où elle est limitée à 10 mg.kg<sup>-1</sup>.

#### **II.5.9.7. Résidus de carbone Conradson**

Les résidus de carbone de Conradson sont définis comme la quantité de matière carbonée laissée après évaporation et pyrolyse d'un échantillon de carburant dans des conditions spécifiques. Le résidu de carbone donne une idée des tendances en matière de dépôt de carbone d'un huile-carburant. Ce paramètre sert à mesurer la tendance d'un échantillon de carburant à produire des dépôts sur les pointes d'injecteur et à l'intérieur de la chambre de combustion quand

il est utilisé comme carburant automobile. Il est considéré comme l'un des plus importants critères de qualité du biodiesel, car elle est liée avec beaucoup d'autres paramètres. Pour ces raisons, les résidus de carbone sont limités dans les spécifications du biodiesel [124]. Les résidus de carbone de Conradson sont mesurés conformément à la norme EN-ISO 10370, où elle est limitée à 0,30% maximum (10% d'échantillon), et à la norme ASTM D-4530, où elle est limitée à 0,050% m maximum (100% d'échantillon).

#### **II.5.9.8. Teneur d'ester**

Ce paramètre est un outil important pour déterminer la présence d'autres substances, et dans certains cas, respecter la définition légale du biodiesel (c'est-à-dire des esters mono-alkyliques). Les faibles teneurs en ester des échantillons de biodiesel pur peuvent provenir de conditions de réaction inappropriées ou de divers composants mineurs dans la source d'huile d'origine. Une concentration élevée en matières insaponifiables telles que les stérols, les alcools résiduels, les glycérides partiels et le glycérol non séparé peut conduire à des valeurs inférieures à la limite. Comme la plupart de ces composés sont éliminés lors de la distillation du produit final, les esters-alkyle distillés présentent généralement des teneurs en ester plus élevées que celles non distillées [124].

#### **II.5.9.9. Température distillation**

La température de distillation (récupérée à 90%) est un outil important, comme la teneur en ester, pour déterminer la présence d'autres substances et, dans certains cas, répondre à la définition légale du biodiesel (c'est-à-dire des esters mono-alkyliques). La température de distillation (récupérée à 90%) est mesurée conformément à la norme ASTM D-1160 où elle est limitée à 360 °C. Il n'y a pas de méthode ni de limite européenne pour la température de distillation (récupérée à 90%).

#### **II.5.9.10. Contamination totale**

La contamination totale est définie comme la quantité de matière insoluble retenue après la filtration d'un échantillon de carburant dans des conditions normalisées. Par conséquent, la contamination totale est un critère de qualité important, car le biodiesel à forte concentration d'impuretés insolubles a tendance à bloquer les filtres à carburant et les pompes d'injection. Les concentrations élevées de savons et de sédiments sont principalement associées à ces phénomènes [124]. La contamination totale est mesurée selon la norme EN-ISO12662, elle est limitée à 24 mg.kg<sup>-1</sup>, Il n'y a pas de méthode ASTM ni de limite pour la contamination totale.



### II.5.9.11. Eau et Sédiments

L'eau peut être introduite dans le biodiesel au cours de la dernière étape de lavage du processus de production et doit être réduite par séchage. Étant donné que le biodiesel est hygroscopique, il peut absorber de l'eau jusqu'à 1000 ppm pendant le stockage. Une fois la limite de solubilité dépassée (environ 1500 ppm d'eau dans les carburants contenant 0,2% de méthanol), l'eau se sépare à l'intérieur du réservoir de stockage et s'accumule au fond. Des quantités appréciables d'eau et de sédiments dans un huile-carburant ont tendance à encrasser les installations de traitement du carburant et à causer des problèmes au système d'alimentation en carburant d'un brûleur ou d'un moteur. Une accumulation de sédiments dans les réservoirs de stockage et sur les tamis filtrants peut entraver la circulation de l'huile entre le réservoir et la chambre de combustion. L'eau contenue dans les carburants de distillat moyen peut provoquer la corrosion des réservoirs et de l'équipement, et en présence de détergent, l'eau peut provoquer des émulsions ou une apparence brouillard. L'eau est nécessaire pour soutenir la croissance microbologique aux interfaces carburant-eau dans les systèmes de carburant. De plus, des teneurs élevées en eau sont également associées à des réactions d'hydrolyse, convertissant en partie le biodiesel en acides gras libres, et sont liées au blocage du filtre à carburant. Les faibles concentrations en eau, qui ne posent aucun problème pour les carburants à base de biodiesel pur, peuvent devenir problématiques dans les mélanges avec du diesel fossile, dans la mesure où une séparation de phases risque de se produire [124]. Pour ces raisons, la teneur en eau maximale est indiquée dans les spécifications standards. La teneur en eau et les sédiments sont mesurés selon ASTM D-2709 et sont limités à 0,050% en volume. La teneur en eau est mesurée conformément à la norme EN-ISO 12937 et est limitée à 500 mg.kg<sup>-1</sup>.

### II.5.9.12. Indice d'acide

L'indice d'acide ou l'indice de neutralisation est une mesure de la quantité d'acides gras libres contenus dans un échantillon de combustible frais, d'acides gras libres et d'acides provenant de la dégradation d'échantillons vieillis. Cet essai est utilisé pour déterminer les constituants acides du biodiesel. Si les acides minéraux sont utilisés dans le processus de production, leur présence en tant qu'acides dans le carburant fini est également mesurée avec l'indice d'acide. Il est exprimé en mg de KOH nécessaire pour neutraliser 1 g de FAME. L'échantillon est dissous dans un mélange de toluène et de propan-2-ol (Isopropanol) contenant une petite quantité d'eau et titré par potentiométrie avec du KOH alcoolique. Les points finaux sont notés et des lectures des volumes de solution de titrage sont prises et utilisées dans une formule pour calculer l'indice d'acide total de l'échantillon de biodiesel.

L'acidité peut en revanche être générée au cours du processus de production. Le paramètre caractérise le degré de vieillissement du carburant pendant le stockage, car il augmente progressivement en raison de la dégradation du biodiesel. L'acidité élevée du carburant a été discutée dans le contexte de la corrosion et de la formation de dépôts dans le moteur, raison pour laquelle elle est limitée dans les spécifications du biodiesel [124]. L'indice d'acide est mesuré selon les normes EN 14104 et ASTM D-664 où il est limité à 0,5 mg de KOH par g.

#### **II.5.9.13. Glycérol libre**

La teneur en glycérol libre dans le biodiesel dépend du processus de production et des valeurs élevées peuvent provenir d'une séparation ou d'un lavage insuffisant du produit ester. Le glycérol peut se séparer dans le stockage une fois que son solvant (méthanol) s'est évaporé. Le glycérol libre se sépare du biodiesel et tombe au fond du réservoir de stockage ou du réservoir de carburant du véhicule, attirant d'autres composants polaires tels que l'eau, les mono-glycérides et les savons. Celles-ci peuvent se loger dans le filtre à carburant du véhicule et endommager le système d'injection de carburant du véhicule. Des niveaux élevés de glycérol libre peuvent également provoquer une cokéfaction des injecteurs. Pour ces raisons, le glycérol libre est limité dans les spécifications [124]. Le glycérol libre est mesuré selon les normes EN 14105/14106 et ASTM D-6584 où il est limité à 0,02% maximum de la masse.

#### **II.5.9.14. Glycérine totale**

La méthode de la glycérine totale est utilisée pour déterminer le niveau de glycérine dans le carburant et comprend la glycérine libre et la partie glycérine de toute huile ou graisse n'ayant pas réagi ou ayant subi une réaction partielle. De faibles niveaux de glycérine totale garantissent la conversion élevée de l'huile ou de la graisse en esters mono-alkyliques. Des niveaux élevés de mono-, di- et triglycérides peuvent provoquer des dépôts d'injecteur et peuvent affecter défavorablement le fonctionnement par temps froid et le colmatage du filtre [124]. La glycérine totale est mesurée selon la norme EN 14105, où elle est limitée à 0,25% de la masse et selon la norme ASTM D-6584 où elle est limitée à 0,24% de la masse.

#### **II.5.9.15. Mono-glycéride, di-glycéride et triglycéride**

Comme pour la concentration en glycérol libre, la quantité de glycérides dépend du processus de production. Combustibles à haute teneur en glycérides sont susceptibles de déposer sur la formation des buses d'injection, les pistons et les soupapes. Les mono-glycérides sont mesurées selon la norme EN-ISO 14105 où ils sont limités à 0,80% en maximum de la masse.

Les di-glycérides et les triglycérides sont également mesurés selon la norme EN-ISO 14105, où ils sont limités à 0,20% en maximum de la masse [124]. Il n'y a pas de méthodes ou de limites ASTM pour les mono-, di- ou tri-glycérides.

#### **II.5.9.16 Ester méthylique d'acide linoléique et contenu de poly-insaturation**

La limitation des acides gras insaturés est nécessaire en raison du fait que le chauffage plus élevés d'acides gras insaturés résulte la polymérisation des glycérides. Cela peut conduire à la formation de dépôts ou à la détérioration des propriétés de lubrification. Trois esters non saturés ou plus ne constituent qu'une part mineure du profil en acides gras de diverses huiles de graines prometteuses, qui ont été exclus en tant que matières premières selon certaines normes régionales en raison de leur valeur élevée d'indice d'iode. Certains experts en biodiesel ont suggéré de limiter la teneur en esters méthyliques d'acide linoléique et de biodiesel polyinsaturé plutôt que le degré total d'insaturation exprimé par l'indice d'iode. Les huiles de soja, de tournesol et de pépins de raisin respectent la teneur en ester méthylique de l'acide linoléique (C18: 3) imposée par la norme UNE-EN 14214, mais la teneur en ester méthylique de l'acide linoléique, avec deux doubles liaisons dans la chaîne carbonée, était très élevée. Par conséquent, un degré d'insaturation supérieur à 137 signifiait que les huiles ne satisfaisaient pas à la norme EN pour l'indice d'iode. En Espagne, le degré d'insaturation maximal est de 160,31. L'huile de palme, riche en esters d'acides gras saturés tels que les acides palmitique (C16: 0) et stéarique (C18: 0), a une indice d'iode inférieure. La teneur en acide linoléique est mesurée conformément à la norme EN 14103, où elle est limitée à 12,0 mg.kg<sup>-1</sup>. Il n'y a pas de méthode ASTM ni de limite pour la teneur en acide linoléique [124]. La teneur en ester méthylique polyinsaturé ( $\geq 4$  doubles liaisons de carbone) est limitée dans EN à 1 mg.kg<sup>-1</sup> mais une méthode de mesure est toujours en cours de développement. Il n'y a pas de méthode ou de limite ASTM pour le contenu polyinsaturé.

#### **II.6. Effet de la matière première sur les propriétés physiques et chimiques du biodiesel**

La production du biodiesel, le choix de la méthode de traitement et les conditions opératoires sont fortement liés à la matière première utilisée. La présence de l'humidité ou des acides gras libres réduisent le rendement de la transestérification à catalyse basique ce qui nécessite des prétraitements ce qui augmente le prix de production.

D'autre part la composition chimique des huiles joue un rôle très important dans la définition des caractéristiques physiques et chimiques du biocarburant résultant. Par exemple,

l'indice de cétane, le paramètre le plus important pour la combustion dans les moteurs diesel, croît avec la longueur de la chaîne carbonée des acides gras et décroît avec les acides gras non saturés. La stabilité à l'oxydation diminue avec la présence des liaisons doubles et triples dans les acides gras, par exemple le biodiesel de soja présente une faible stabilité à l'oxydation tandis que les biodiesels des huiles de palme et d'olive présentent les meilleurs stabilités.

A noter que la présence des impuretés comme les oxydes des métaux et les peroxydes favorisent l'oxydation. D'autre part les propriétés d'écoulement à basses températures se dégradent avec la longueur de la chaîne de carbone et s'améliorent avec la teneur en acides gras non saturés. La densité du biodiesel croît avec la présence des liaisons doubles et triples [152].

## **II.7. Propriétés physico-chimiques des biocarburants et fonctionnement des moteurs**

Les performances et les émissions liées au fonctionnement des moteurs diesel dépendent principalement des propriétés physico-chimiques du carburant utilisé, ces derniers dépendent de la composition de la matière première (acides gras) telles que la saturation, les types de double liaison (trans ou cis), la longueur de la chaîne. D'autre part, les caractéristiques de performance sont également directement affectées par les paramètres de fonctionnement telles que la pression d'injection, le taux de compression, le délai d'auto-inflammation, la durée de combustion, le rapport air-carburant, la turbulence du mélange air-carburant à l'intérieur de la chambre de combustion et d'autres facteurs. La plupart du temps, le biodiesel mélangé avec du carburant diesel conventionnel peut être utilisé dans le moteur à allumage par compression sans aucune modification. L'effet d'utilisation de biocarburant (pur ou mélange avec diesel conventionnel) peut être analysé en déterminant les caractéristiques de performance, combustion, et les émissions polluantes.

### **II.7.1. Effet sur la performance du moteur**

#### **II.7.1.1. Effet sur la puissance (BP)**

Afin de comparer le rendement et les émissions d'un moteur avec utilisation de différents carburants, il est nécessaire que les essais soient effectués dans les mêmes conditions de fonctionnement du moteur. Tsolakakis [153] a comparé des carburants diesel à très faible teneur en soufre et le biodiesel à base de colza dans un moteur diesel monocylindre à injection directe, avec le réglage du régime et de la charge du moteur. Différents tests moteurs ont été réalisées couvrant sur des charges de 25%, 50%, 75% et 100% et divers régimes moteur [153-155]. Les résultats ont montrés que pour les mêmes conditions de consommation de carburant, de

pleine charge et de régime moteur, le biodiesel présentait une réduction de 8% de puissance par rapport au carburant diesel. Cette diminution de la puissance est due au faible pouvoir calorifique du biodiesel.

Les essais utilisation du biodiesel d'huile de tournesol dans un moteur à différents régimes et à charge moyenne et pleine, ont montrées une perte de couple et de puissance comprise entre 5% et 10% par rapport au diesel, avec l'augmentation du régime moteur [156]. Lorsque l'on compare le biodiesel d'huile usagée et les carburants diesel dans des conditions de moteur à pleine charge, la perte de couple n'était que de 3% à 5% avec le biodiesel [157]. Les résultats des essais d'un diesel à très faible teneur en soufre, du biodiesel d'huile de palme pur et un mélange de 20% de biodiesel de palme dans un moteur ont montrés une réduction de puissance de 3,5% pour le biodiesel pur et de 1% pour le mélange [158]. Peu de chercheurs ont également trouvés une augmentation de la puissance et du couple pour les moteurs au biodiesel. Une augmentation du couple de 6,1% a été signalée pour un moteur alimenté en un mélange de 70% de biodiesel (B70) par rapport au diesel [159]. Ils ont expliqués que l'augmentation du couple était due à l'indice de cétane plus élevé du biodiesel, à une densité et une viscosité plus élevées et à une combustion améliorée par rapport à celle du diesel.

Certains auteurs ont signalés une réduction de la puissance et du couple lorsque du biodiesel à faible pouvoir calorifique était utilisé dans un moteur diesel. Il a été signalé une réduction de 3% à 8% du couple et de la puissance du moteur pour le biodiesel de graines de coton par rapport au diesel [160]. Ils ont expliqués que la diminution de l'efficacité du moteur était due à des difficultés d'atomisation du carburant. Randall von Wedel [161] a signalé une réduction de la puissance de moteur pour un mélange de 20% de biodiesel et de biodiesel pur, de 2% et 8% respectivement par rapport au diesel. Des essais sur un moteur 6 cylindres alimenté par l'huile de colza, de l'huile de soja et du biodiesel d'huile de coton ont été réalisées à un régime de 1200 tr/min et 2000 tr/min. Les résultats ont montrés une puissance de moteur similaire pour le biodiesel par rapport à celle du diesel [162].

La réduction de la puissance et du couple des moteurs à biodiesel a été considérée comme étant due à la viscosité plus élevée du biodiesel par rapport à celle du diesel. Les tests ont été réalisés dans un moteur turbocompressé alimenté au biodiesel en utilisant différentes pompes d'injection. Dans un régime moteur de 1400 tr/min et à pleine charge, il a été observé que le volume de biodiesel injecté à l'aide de deux pompes d'injection différentes était élevé avec 1,2% et 3,2% par rapport à celui du diesel [163]. Pour que le biodiesel soit injecté dans le cylindre

avec la même viscosité que celle du diesel, la température d'injection du biodiesel a été augmentée. Dans ces conditions de fonctionnement du moteur, les résultats ont montrés une augmentation du volume de diesel injecté en raison de sa faible densité par rapport à celle du biodiesel [164]. La viscosité élevée du biodiesel qui conduit à un démarrage avancé de l'injection [163, 165, 166].

Les conclusions tirées de l'étude de la littérature étaient que l'utilisation du biodiesel dans les moteurs diesel entraînait une diminution de la puissance du moteur, et l'augmentation de la consommation de carburant compenserait le pouvoir calorifique inférieur du biodiesel par rapport au diesel. Cependant, certains chercheurs ont signalé une légère amélioration de l'efficacité du moteur en raison de la propriété de lubrification du biodiesel.

### **II.7.1.2. Effet sur l'efficacité thermique (BTE)**

L'efficacité thermique ou le rendement effectif est définie comme le rapport entre la puissance obtenue dans le vilebrequin sur la puissance de carburant fournie au moteur. Satputaley et al. [167] ont convertis l'huile de micro-algues (*Chlorella protothecoides*) en biodiesel par le procédé de transestérification. Les essais moteurs avaient été effectués sur un moteur diesel à injection directe (DI) à quatre temps alimenté par l'huile de micro-algues et l'ester méthylique de micro-algues. Une réduction maximale de 5,6% et 3,09% BTE sur une puissance de 5,15 kW a été observée pour l'huile de micro-algues et son ester méthylique respectivement. La réduction du BTE a été attribuée à une mauvaise atomisation du carburant des carburants d'essai en raison de leur viscosité élevée par rapport au carburant diesel. Jayaprabakar et al. [168] ont menés une expérience sur un moteur diesel monocylindre à injection directe utilisant l'algue (*Gracelaria-verrucossa*) et des mélanges de son de riz au biodiesel en variant les moments d'injection à vitesse constante. L'ester méthylique de son de riz a montré une BTE supérieure à l'ester méthylique d'algue en raison de son pouvoir calorifique élevé. La BTE augmente légèrement pour tous les carburants d'essai lorsque le calage de l'injection est passé de - 23 ° PMH à - 26 ° PMH. Singh et al. [69] ont étudiés le cycle transitoire européen (European Transient Cycle) d'un moteur diesel de grande puissance alimenté par le biodiesel de *Chlorella variabilis* et par biodiesel de *Jatropha curcus*. Il a été observé que la BTE du moteur était la plus mauvaise dans les conditions de conduite urbaine, alors que le mode rural une BTE le plus élevée a été enregistrée pour tous les carburants d'essai. La BTE la plus élevée a été obtenu en mode rural pour le biodiesel *Chlorella variabilis* et la plus bas a été enregistrée en mode urbain pour le carburant pétro diesel.

Atmanli [170] a étudié les effets des mélanges d'alcools d'ordre supérieur avec le biodiesel dérivé d'huile usagée sur les performances du moteur et les caractéristiques d'émissions. À partir des essais, il a été observé que le biodiesel pur avait une BTE plus élevée de 1,89% que le carburant diesel, mais que l'ajout 50% de diesel au biodiesel (D50B50) réduit légèrement la BTE de 0,24%. Il a également été signalé que l'ajout d'alcools augmente considérablement la BTE. Parmi les carburants d'essai, le mélange de butanol à 20% a montré une BTE supérieur qui était 5,58% plus élevée que celui du mélange D50B50. D'autre part, une addition de 20% de pentanol a augmenté la BTE à 4,94% plus que le mélange D50B50. Cette tendance accrue du BTE avec l'ajout d'alcools, cela est attribuée à la présence d'une teneur élevée en oxygène dans les alcools avec une amélioration de la combustion et une réduction des pertes de chaleur par rapport au diesel [170]. Une nouvelle méthode de préparation de biodiesel à partir d'huile de moutarde usagée utilisant un réacteur à rayonnement infrarouge a été proposée par Pradhan et al. [171]. Une tendance à la baisse du BTE a été observée lorsque le mélange de biodiesel à 10% avait été utilisé, avec une réduction moyenne de 7,78% du BTE a été enregistrée à une charge partielle et la même mesure a été trouvée pour un mélange de biodiesel à 20%.

Une investigation avait été réalisée par Zare et al. [172], en ajoutant de la tria-cétine comme additif oxygéné avec du biodiesel d'huile de cuisson usagée dans un moteur diesel turbo à six cylindres. La BTE la plus élevée a été enregistrée pour le biodiesel pur qui possède une teneur en oxygène de 10,93%. Il a été noté que l'ajout de tria-cétine au biodiesel détériore les valeurs BTE en raison de la viscosité plus élevée, de PCI et de la densité élevée de l'additif tria-cétine [172]. Les caractéristiques de combustion d'un moteur diesel alimenté par des mélanges de biodiesel-pentanol (BP) d'huile de cuisson usagée ont été analysées dans diverses conditions de chargement par Zhu et al. [173]. Il a été déduit que l'addition de pentanol améliore la BTE en raison de la teneur élevée en oxygène dans le carburant qui améliore la combustion. Il convient également de noter que l'ajout de 20% et 30% de pentanol au biodiesel diminue la BTE ce qui est attribuée à une période de combustion plus longue. Isik et al. [174] ont rapportés que l'ajout de 10% de n-butanol et de 10% de biodiesel d'huile de cuisson usagée au diesel pur présentait une BTE le plus élevée par rapport aux mélanges de biodiesel à 20% en raison de la viscosité moindre du mélange de butanol.

Awad et al. [175] ont effectués des tests moteur sur un biodiesel extraie à partir de résidus de graisse animale (RGA) dans un moteur diesel monocylindre à 1500 tr/min. Les résultats expérimentaux ont montrés que les échantillons de biodiesel de RGA présentaient une augmentation subtile du BTE à des charges plus élevées, tandis qu'une tendance à la baisse était

observée à des charges plus petites par rapport au carburant diesel. Ce phénomène a été attribué au début de combustion du biodiesel de RGA à faibles charges qui prolonge la durée de combustion et à la durée de combustion plus courte dans des conditions de charge plus élevées.

Gnanasekaran [176] a prédit les performances d'un moteur à allumage par compression à différents moments d'injection ( $21^\circ$ ,  $24^\circ$ ,  $27^\circ$  avant PMH) alimenté avec du biodiesel d'huile de poisson. A partir des essais expérimentaux, il avait été observé que, pour  $21^\circ$  APMH, la BTE pour le biodiesel pur (B100) varie de 15,4% à 29,6% de faible charge à pleine charge respectivement. De même, à  $24^\circ$  APMH, des variations d'environ 14,5 à 29,6% ont été observées et à  $27^\circ$  APMH des variations d'environ 15 à 29,6% ont été observées pour le biodiesel B100. Il a été clairement déduit que la BTE du B20 et du B40 était proche du diesel, tandis que le B60, le B80 et le B100 montrent une diminution du BTE par rapport au carburant diesel. La principale raison signalée pour cette tendance à la baisse du BTE était un délai d'auto-inflammation plus court.

Behçet et al. [177] ont étudiés les performances d'un moteur diesel commercial fonctionnant avec de l'ester méthylique d'huile de poisson et de l'ester méthylique d'huile de cuisson. Les résultats ont montrés que l'efficacité thermique atteint son apogée à un régime moteur de 2000 tr/min alors qu'il y avait une faible baisse de l'efficacité thermique après cette plage de régimes. Il a été également déduit que le mélange de biodiesel d'huile de poisson présentait une meilleure BTE que le mélange de biodiesel d'huile de friture. Le pouvoir calorifique inférieur, la viscosité et la densité plus élevées des mélanges de biodiesel seraient les raisons de la déclinaison des performances des mélanges de biodiesel.

Sakthivel et al. [178] ont étudiés la faisabilité d'utiliser du biodiesel d'huile de poisson dans un moteur diesel dans des conditions de charge variables. Les résultats ont montrés que la valeur moyenne du BTE de B40, B60, B80 et B100 est inférieure à environ 1,8%, 6,4%, 11,3% et 12,4% respectivement. Le délai d'auto-inflammation plus court avec augmentation dans le rapport de mélange provoque un début de combustion plus rapide que le diesel, ce qui augmente le travail de compression avec la perte de chaleur et diminue ainsi l'efficacité du moteur [178]. Un biodiesel préparé à partir d'huile de truite a été utilisé comme carburant dans un moteur diesel monocylindre à injection indirecte pour analyser ses caractéristiques de performance par Buyukkaya et al. [179]. La valeur maximale du BTE a été observée pour le mélange B50 qui était de 4,05% plus élevée que celle du diesel pur, tandis que le BTE du mélange B10 était plus proche du diesel dans les gammes de vitesses faibles. Avec l'augmentation de la fraction de



biodiesel dans le mélange, la BTE a augmentée, ce qui est due à la combustion complète et au pouvoir lubrifiant du biodiesel.

Ravikumar et al. [180] ont testés un biocarburant extraie à partir de peau de poulet jetable et de suif de porc non comestibles dans un moteur à allumage par compression. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité thermique de tous les mélanges de carburant diminue par rapport à celle du carburant diesel. Le diesel a enregistré une efficacité thermique de 17,11% tandis que les mélanges de carburant D90, D80 et D70 fournissent 15,81, 14,79 et 13,32% d'efficacité thermique à pleine charge respectivement. La raison de ce faible rendement est que les carburants générés à partir de la graisse ont une densité et de pouvoir calorifique moindre que celle du diesel à grande vitesse. L'atomisation et la vaporisation du carburant sont fortement affectées par la viscosité et la densité plus élevées du mélange de carburant qui conduisent à une réduction de l'efficacité de la combustion, ce qui réduit encore l'efficacité thermique globale du moteur testé.

Outre résultats de nombreux chercheurs ont signalé que l'efficacité thermique de tous les biodiesels et mélanges sont moindres par rapport au carburant diesel pur [181-185]. Ces principales raisons sont confirmées par un pouvoir calorifique inférieur, une densité élevée et une viscosité élevée des mélanges de carburant, ce qui entraîne une mauvaise atomisation, un démarrage précoce de la combustion.

### **II.7.1.3. Effet sur la consommation spécifique du carburant (BSFC)**

La consommation spécifique du carburant (CSC ou BSFC) est définie comme le rapport entre la consommation totale de carburant et la puissance générée par le moteur. C'est l'une des paramètres majeurs pour évaluer les effets des carburants sur les performances des moteurs [186]. Lorsque le moteur est alimenté en huile micro-algale et en ester méthylique d'huile micro-algale, Satputaley et al. [167] ont observés que les CSC pour les deux carburants d'essai étaient élevées par rapport au diesel dans toutes les conditions de chargement. Il a été signalé que la tendance à la hausse valeurs des CSC était due au pouvoir calorifique inférieure du carburant d'essai, ce qui entraînant une consommation de plus de carburant pour produire une puissance de sortie constante [167]. Les mélanges de biodiesel *Gracelaria-verrucosa* ont montrés moins de consommation de carburant que les mélanges d'ester méthylique de son de riz à tous les moments d'injection dans le travail expérimental réalisé par Jayaprabakar et al. [168]. La baisse du taux de consommation de carburant a été attribuée au pouvoir calorifique plus élevée du biodiesel algal par rapport au biodiesel de son de riz [168]. Le biodiesel de

*Chlorella variabilis* et le biodiesel de *Jatropha* ont montrés une augmentation du CSC de 4% et 11% par rapport au diesel dans le test du cycle transitoire européen (ETC) [169]. Il a également été conclu que le mode de fonctionnement rural présentait une CSC minimum par rapport aux modes urbains pour tous les carburants d'essai pris en considération.

Atmanli [170] a déduit que l'ajout de butanol et de pentanol au mélange de biodiesel d'huiles usagées réduisait la CSC de 0,89% et 0,95% par rapport au mélange de biodiesel à 50% (B50). D'autre part, l'ajout de propanol a augmenté la CSC de 5,28%, ce qui a été attribué à la diminution du pouvoir calorifique du mélange de propanol. Pradhan et al. [171] ont testés le biodiesel d'huile de moutarde usagée dans un moteur diesel monocylindre Kirloskar AV-1. Ils ont constatés que les mélanges de biodiesel B10 et B20 présentaient une CSC élevée dans toutes les conditions de chargement. D'autre part, le moteur consommait moins de carburant à des charges élevées lorsqu'il était alimenté en biodiesel pur.

Dans les tests de performances réalisées par Zare et al. [172], il a été rapporté qu'un diesel pur avec 0% d'oxygène, enregistre la plus basse CSC, tandis que l'ajout de biodiesel et oxygène augmentent les valeurs des CSC [172]. L'ajout de pentanol au biodiesel d'huile de cuisson usagée et son utilisation dans un moteur diesel a augmenté les valeurs CSC à des charges faibles et élevées du moteur [173]. Isik et al. [174], ont constatés que le mélange de biodiesel d'huile de cuisson usagée B20 présentait les valeurs CSC les plus élevées par rapport à tous les carburants d'essai utilisés dans un moteur diesel à injection directe, tandis que, le mélange butanol et B20 réduisait les valeurs BSFC. Cette tendance a été attribuée à la teneur élevée d'oxygène dans le biodiesel et au comportement de combustion à basse température du carburant mélangé au butanol.

Sanli et al. [186], ont démontrés que les esters méthyliques et éthyliques des huiles de cuisson usagées présentaient une CSC plus élevée que le pétro-diesel en moyenne de 14,17% et 11,44%. Lors de l'ajout de 20% de diesel aux esters méthyliques et éthyliques, la CSC a baissée à une moyenne de 3,71% et 4,22%. Cette tendance a été attribuée au pouvoir calorifique inférieur du mélange d'ester méthylique (15,7% moins) et du mélange d'ester éthylique (13,1% moins) que le pétro-diesel. Behçet et al. [177] ont étudiés les effets de l'ester méthylique d'huile de poisson et de l'ester méthylique d'huile de cuisson sur les caractéristiques de performance d'un moteur diesel Rainbow-186. Les auteurs ont signalés que la CSC des deux carburants à base d'EM était plus élevée que le carburant diesel commercial. En comparant les carburants esters, le biodiesel d'huile de poisson a montré une CSC inférieure à celle de la graisse de poulet.

Buyukkaya et al. [179] ont constaté que la CSC de l'ester méthylique d'huile de truite et de ses mélanges était plus élevée que celui du carburant diesel standard. Les valeurs moyennes de la CSC se sont avérées être de 1,47%, 1,1%, 1,04% et 0,45% pour les mélanges de biodiesel B50, B40, B20 et B10 par rapport au carburant diesel. Des pouvoirs calorifiques plus faibles des carburants esters mythiques déclarés comme la principale raison de l'augmentation du taux de consommation de carburant.

Sunil Kumar et al. [181] ont analysés les paramètres de performance d'un moteur diesel alimenté par un biodiesel extrait de l'huile de jatropha-algues. Des essais moteurs indiquent que la consommation du carburant spécifique diminue avec la charge, et que le biodiesel de jatropha-algues a une CSC plus grande que le pétrole diesel. La valeur la plus basse a été enregistrée pour le diesel (340,2 g / kW.h) à pleine charge.

Avec l'ajout des résultats ci-dessus, la plupart des chercheurs ont affirmés que la CSC du moteur a augmentée lorsqu'il a été alimenté en biodiesel et ses mélanges indépendamment des conditions de travail [182, 184, 185, 187,]. Tandis que, très peu de chercheurs ont signalés que la CSC avait diminuée par rapport au diesel pur avec l'ajout des mélanges de biodiesel [183, 188].

## **II.7.2. Effet sur la combustion**

### **II.7.2.1. Effet sur la pression cylindrique et température de combustion**

La pression cylindrique du moteur et la température de combustion cèdent les informations sur l'efficacité de la combustion. La pression du cylindre dépend de la fraction de combustible brûlé pendant la phase initiale de combustion. La pression du cylindre caractérise la capacité du carburant à bien se mélanger à l'air et à brûler dans de bonnes conditions [189]. En effet, la combustion d'un carburant dans un moteur à combustion interne se traduit par un pic pression et un taux de montée en pression qui correspondent à une grande quantité de carburant brûlée en combustion pré-mélangée.

Senthil Kumar et al [189] ont testés la variation de la pression cylindrique dans un moteur diesel à différentes puissances. La pression atteint respectivement la valeur maximale de 95 ; 89 et 86 bars avec le diesel, l'émulsion de graisse animale et la graisse animale pure. L'explication qui a été donnée pour ces résultats est principalement due à une viscosité élevée des graisses animales que le diesel, ce qui conduit à une mauvaise atomisation. Cependant, les émulsions de graisse animale augmentent le pic pression et la vitesse de montée en pression et

améliorent les performances de combustion. Awad et al. [175] ont analysés les paramètres de la combustion d'un moteur diesel à injection directe en utilisant du biodiesel produit à partir de résidus de graisses animales (BRGA) et un diesel conventionnel. Il a été constaté que la température des gaz d'échappement, la pression cylindre et la durée de combustion augmentent avec la charge du moteur pour les deux carburants, ce qui nécessite l'injection de plus grandes quantités de carburant. La corrélation entre les paramètres de combustion et les propriétés des carburants a montrée que il existe des effets opposés entre la viscosité élevée et la faible volatilité de BRGA d'une part et de la teneur en oxygène d'autre part sur la combustion [175].

La variation des pressions cylindriques par rapport à l'angle de vilebrequin pour les différents mélanges de biodiesel de micro-algues, d'huile de friture usagée et de pétrole diesel à différentes charges moteur a été examinée par M. A. Islam [190]. Il a été remarqué que pour une charge du moteur de 25%, le pic pression du cylindre de diesel pur était jusqu'à 8% plus élevé que les mélanges de biodiesel, cela pourrait être dû à la viscosité élevée du biodiesel qui est défavorable pour la combustion [191]. Les pressions maximales de B10, B15, B20 et B100 d'ester méthyle de marotti ont été mesurées comme étant : 75 ; 71 ; 78,5 et 69,25 bars, respectivement, alors que pour le diesel pur était de 81,75 bars à pleine charge [192]. Dans un moteur à allumage par compression, le pic de pression dépend du taux de combustion dans les étapes initiales (pré-mélange), qui à son tour est influencé par la quantité de carburant existant dans la chambre de combustion. La phase de combustion pré-mélangée ou incontrôlée est régie par la période de retard d'allumage (délai d'auto-inflammation) et par la préparation du mélange pendant la période de retard. Ainsi, la viscosité élevée et la volatilité plus faible des mélanges EM de marotti, qui conduisent à une mauvaise atomisation et à une mauvaise combustion [192, 193].

Aakash G. et al. [194] ont testés les caractéristiques de performance, les émissions et la combustion d'un moteur diesel alimenté en ester méthylique d'huile de micro-algues. Les résultats montrent que avec un angle d'injection de 23 ° avant PMH, la pression cylindre maximale obtenue à pleine charge est plus élevée pour le diesel (66,57 bars), alors que pour les mélanges B75 (63,62 bars), B50 (63,58 bars), B100 (63,56 bars) et B25 (63,23 bars). Pour tous les carburants la pression maximale est enregistrée après 12 ° de PMH. La pression maximale de des mélanges de biodiesel est inférieure à celle du diesel dans les mêmes conditions de fonctionnement. L'explication donner par les auteurs, c'est au le pouvoir calorifique moindre des mélanges par rapport au diesel.

R. Pradeepraj et al. [195] ont réalisés une étude expérimentale sur l'effet de la pression d'injection sur les performances d'un moteur diesel avec utilisation du biodiesel de moringa oleifera (MO). La pression dans le cylindre était considérée comme le paramètre le plus important pour déterminer les caractéristiques de combustion des carburants. La variation de la pression du cylindre dépend de la quantité de carburant injecté dans le cylindre et de sa qualité. Il a été constaté que la pression maximale dans le cylindre du biodiesel B25 de MO est légèrement inférieure à la pression maximale du diesel. Dont, la pression maximale du cylindre est de 69,4 et 66,7 bars pour le diesel et le B25 respectivement à une pression d'injection de 200 bars. Pour les pressions d'injection de 220 ; 240 et 260 bars le B25 a enregistré une pression cylindre de 68,9 ; 70,4 et 66,5 bar respectivement. L'explication donnée, pour l'augmentation de la pression dans le cylindre du B25 à une pression de 240 bars est due à une meilleure atomisation et mélange air-carburant, ce qui se traduit par une meilleure combustion. La conclusion tirée, la pression maximale du cylindre pour B25 augmente avec l'augmentation de la pression d'injection de 200 à 240 bars de manière marginale. Une pression d'injection de carburant plus élevée au-delà de 240 bars n'a pas d'effet significatif sur la pression maximale du cylindre en raison d'une plus grande quantité de carburant injectée dans le cylindre, ce qui entraîne une mauvaise combustion.

En général, la pression cylindrique maximale et la température de combustion maximale pour le biodiesel était inférieure à celle du diesel conventionnel. L'explication qui a été donnée par les auteurs, le pouvoir calorifique de biodiesel était inférieur à celui du diesel conventionnel [184, 196], la pression et la température dépendent du taux de combustion, qui à son tour est influencée par la quantité de carburant présente dans la phase de combustion pré-mélangée, cette phase régie par le délai d'auto-inflammation (DAI) et par la préparation du mélange pendant la période de retard (DAI). Ainsi, la viscosité élevée et la volatilité plus faible du biodiesel, qui conduisent à une mauvaise atomisation et à une mauvaise préparation du mélange avec de l'air pendant le DAI [192, 193, 197].

De plus, le taux de dégagement de chaleur est calculé à partir de la pression dans le cylindre selon la première loi de la thermodynamique. Le taux de dégagement de chaleur maximal du biodiesel de calophyllum inophyllum est inférieur à celui du carburant diesel. Ce taux de dégagement de chaleur plus faible est principalement dû au délai d'allumage plus court du biodiesel en raison de l'indice de cétane plus élevé [198]. En outre, la viscosité élevée et la mauvaise atomisation par pulvérisation jouent également un rôle dans la réduction du taux de dégagement de chaleur du biodiesel. Le taux de dégagement de chaleur est un indicateur des

détails des étapes de combustion. Le premier et le deuxième pic désignent la phase de combustion pré-mélangée et la phase de combustion mixte [199]. Le taux de dégagement de chaleur du biodiesel est inférieur par rapport au diesel et il augmente avec l'augmentation du pourcentage de diesel dans le mélange biodiesel-diesel [200].

### **II.7.2.2. Effet sur le délai d'auto-inflammation et la durée de combustion**

Le délai d'auto-inflammation d'un carburant est par définition, le temps nécessaire à ce carburant pour s'enflammer dans des conditions de température et de pression données. Une série de processus physiques et chimiques, se produisent pendant le délai d'auto-inflammation avant la combustion. Il se calcule à partir du moment d'injection du combustible dans la chambre de combustion, et à l'instant où la combustion débute. Après la période d'auto-inflammation, le mélange air-carburant pré-mélangé brûle rapidement en dégageant de la chaleur à une vitesse très rapide, après une combustion par diffusion a lieu, où la vitesse de combustion est contrôlée par la disponibilité du mélange air-combustible, suivie par une phase de combustion tardive. La qualité d'allumage d'un carburant est généralement caractérisée par son indice de cétane ou indice de cétane. Un indice de cétane élevé signifie généralement un délai d'allumage plus court [201]. Zare et al. [172] ont également signalés que l'ajout d'additif tri-acétine au biodiesel augmentait le délai d'allumage, en raison de son IC le plus bas.

L'effet de la puissance du moteur sur le délai d'auto-inflammation pour le diesel conventionnel, ester méthylique de honge (EMH), jatropha (EMJ) et sésame (EMS) a été testée par B. Ashok et al [202]. Il a été observé que le délai d'injection des biodiesels était plus long que celui du diesel, et que le délai d'auto-inflammation diminuait avec l'augmentation de la puissance de moteur. Les valeurs du délai d'auto-inflammation étaient respectivement de 11,5°, 10,5°, 11°, et 9,91° degré de vilebrequin pour EMJ, EMS et EMH, et diesel pur à 80% de charge moteur. La durée de la combustion a été calculée en fonction de la durée entre le début de la combustion et le dégagement de chaleur cumulé à 90%. La durée de combustion augmente avec l'augmentation de la puissance. Cela est dû à l'augmentation de la quantité de carburant injecté. Une durée de combustion plus élevée a été observée avec tous les esters par-rapport au diesel en raison de la phase de combustion diffusion plus longue [197, 202].

Les délais d'auto-inflammation de biodiesel à base de résidus de graisses animales (BRGA) et un diesel conventionnel ont des tendances à la baisse par rapport à la pression effective moyenne [175]. Lorsque la charge du moteur augmente, plus de carburant est injecté, ce qui entraîne une augmentation des températures des parois du cylindre et des gaz résiduels.

Puisque l'auto-inflammation des carburants s'améliore avec l'augmentation de la pression et de la température [203], et diminuera avec la charge. Le délai d'auto-inflammation de BRGA est inférieur à celui de diesel à toutes les charges, ce qui peut être attribué à l'indice de cétane plus élevé des esters myrétiques [204]. Mais les écarts de DAI diminuent quand la charge du moteur augmente, à charge 20%, la différence est d'environ 15% et elle est inférieure à 6% à des charges plus élevées, ce qui reflète une sensibilité de DAI de BRGA par rapport à la charge. À faibles charges, une viscosité élevée et une faible volatilité réduisent la combustion prémélangée et prolongent la durée de la combustion. Cependant, à des charges élevées, la combustion se produit principalement par diffusion et l'effet de l'oxygénation de BRGA est le plus important et conduit à un raccourcissement de la durée de la combustion [175].

Senthil Kumar et al [189] ont constatés que le délai d'auto-inflammation est plus long avec de la graisse animale pure (Triglycéride de GA) par rapport au diesel pur en raison du faible IC. Avec la GA pure, en raison d'une mauvaise atomisation et vaporisation, le délai physique devient plus long par rapport au diesel pur. Le délai d'auto-inflammation correspond à un angle de vilebrequin de  $6^\circ$  avec du diesel pur et de  $8^\circ$  avec de la graisse animale pure à température normale. Le délai d'auto-inflammation augmente encore avec les émulsions de graisse animale par rapport à la graisse animale pure et au carburant diesel pur. L'émulsion de graisse animale correspond à  $9^\circ$  d'angle de vilebrequin au méthanol et à  $10^\circ$  d'angle de vilebrequin à l'éthanol à la puissance de sortie maximale. L'augmentation du délai d'auto-inflammation avec les émulsions de graisses animales est due à l'eau et du méthanol / éthanol dans les émulsions. La vaporisation d'eau et d'alcools réduit la température de l'air d'admission et du carburant. De plus, la présence d'eau et de méthanol / éthanol entraîne une réduction de l'indice de cétane global des émulsions. Par conséquent, le délai est plus long avec les émulsions par rapport à la graisse pure. Cependant, le délai d'allumage diminue avec la graisse préchauffage ( $7^\circ$  d'angle de vilebrequin).

La durée de combustion est calculée en obtenant 95% de taux de dégagement de chaleur cumulé. Une durée de combustion plus longue est observée avec les graisses pures que le diesel pur. Ceci est dû à l'injection de plus grandes quantités de graisse animale que le diesel pour la même condition de charge car le pouvoir calorifique de la graisse animale est inférieur à celui du diesel. Cependant, la durée de combustion est réduite à la fois avec les émulsions de graisse animale par rapport à la graisse pure. En raison du long délai d'auto-inflammation. Par conséquent, le dégagement de chaleur pendant la période de combustion par diffusion est réduit et entraîne une durée de combustion réduite [189].

Dans l'ensemble des tests, il a été constaté que le biodiesel a un délai d'auto-inflammation plus court, cela est dû à l'indice de cétane plus élevé du biodiesel que le carburant diesel conventionnel. Le délai d'auto-inflammation diminuait avec l'augmentation du pourcentage de biodiesel dans les mélanges en raison de l'augmentation de l'indice de cétane [196]. Un délai d'auto-inflammation plus court entraîne un taux de dégagement de chaleur maximal plus faible. Par conséquent, le dégagement de chaleur de combustion pré-mélangée est plus élevé pour le diesel, qui est responsable au pic pression plus élevée par rapport au biodiesel. Le délai d'auto-inflammation dépend de la viscosité du carburant, ce qui entraîne une mauvaise atomisation, une mauvaise combustion du mélange. Un régime moteur plus élevé conduit à un mélange plus rapide entre le carburant et l'air et un allumage plus court se produit [201].

### **II.7.3. Effet sur les émissions polluantes**

#### **II.7.3.1. Hydrocarbures imbrulés (HC)**

Les émissions d'hydrocarbures sont le résultat notable d'une combustion incomplète des molécules de carburant à l'intérieur de la chambre de combustion. Les conditions de fonctionnement du moteur, la conception de la chambre de combustion, la structure du carburant sont les principaux paramètres qui influent sur les émissions de HC [186]. Satputaley et al. [167] ont rapportés qu'un indice de cétane plus élevé de l'huile de micro-algues et de son ester méthylique réduit les émissions de HC de 4% par rapport au diesel dans toutes les conditions de chargement. Une réduction des émissions de HC a été observée par Jayaprabakar et al. [168], en utilisant du biodiesel dérivé du son de riz et Algues *Gracelaria-verrucosa*. Il a également été expliqué que les carburants biodiesel amélioraient le processus de combustion à tous les moments d'injection et produisaient moins de HC par rapport au diesel. Singh et al. [169] ont déduits que l'addition de carburants biodiesel réduisait considérablement les émissions de HC d'un moteur diesel. Le biodiesel de jatropha et le biodiesel de micro-algues dérivé de la *Chlorella variabilis* réduisent les émissions de HC de 40% et 33% respectivement par rapport au carburant pétro diesel. Cette tendance à la baisse a été attribuée à un indice de cétane plus élevé et à une teneur en oxygène élevée des carburants biodiesel.

Atmanli et al. [170] ont observés les effets des alcools à chaîne longue sur les émissions d'un moteur diesel alimenté au biodiesel d'huile usagée. Il a été constaté que le biodiesel pur montrait en moyenne 78,84% d'émissions de HC en plus à toutes les charges, sauf 9 kW, par rapport au diesel. L'ajout de 20% de butanol et de pentanol aux mélanges de biodiesel a réduit les HC de 17,37% et 17,5% respectivement. Tandis que, l'ajout de propanol a augmenté les



émissions de HC de 34,47% par rapport au mélange de 50% de biodiesel [170]. Le biodiesel d'huile de moutarde usagée a amélioré la combustion et réduit considérablement les émissions de HC. En particulier, le mélange B10 a montré le moins d'émissions de HC par rapport à tous les autres mélanges de carburant pris pour les tests par Pradhan et al [171].

Les émissions de HC dépendent principalement de la teneur en oxygène et de l'indice de cétane des carburants d'essai. Le biodiesel d'huile cuisson usagée avec un indice de cétane plus élevé et une teneur en oxygène de 11% a généré les émissions de HC les plus faibles, alors que le diesel pur sans teneur en oxygène a montré les émissions de HC les plus élevées. Zhu et al. [173] ont prouvé que l'indice de cétane moindre des mélanges de biodiesel d'huiles de friture et de pentanol fournit un temps supplémentaire pour la vaporisation du carburant, ce qui conduit à l'augmentation des émissions de HC du moteur diesel. Lors de l'utilisation d'un additif au butanol pour le biodiesel d'huile de cuisson usagée dans un moteur diesel à injection directe, Isik et al. [174] ont observés qu'il y avait une région étendue aux extrémités de la chambre de combustion dans laquelle les molécules de carburant non brûlées s'accumulaient et donc l'émission de HC était augmentée. D'autre part, l'utilisation du mélange de biodiesel B20 réduit les HC, ce qui est dû à la teneur en oxygène qui existe dans le biodiesel.

Sanli et al. [186] ont observés qu'à une vitesse de 1700 tr/min d'un moteur Ford turbocompressé, les émissions de HC étaient 39,5 ppm, 25,2 ppm et 20,8 ppm pour le diesel, le biodiesel ester méthylique et le biodiesel ester éthylique respectivement. À des régimes de moteur élevés, la durée de combustion réduite contribue à augmenter les émissions de HC. L'ester méthylique et l'ester éthylique provenant d'huile de cuisson usagée ont présentés 29,36% et 38,29% d'émissions de HC en moins par rapport au carburant diesel. L'ajout de diesel pur à l'ester méthylique et éthylique a réduit les HC de 21,47% et 26,30% par rapport au carburant diesel pur. Étant donné, que la durée de combustion des biocarburants était relativement plus élevée, plus de temps était disponible pour oxyder les particules de carburant, ce qui réduisait les émissions de HC à l'échappement. Mikulski et al. [207] ont constatés que l'augmentation du pourcentage d'ester méthylique de saindoux porcine dans le carburant réduisait les émissions de HC. Au régime moteur de 3000 tr/min, la réduction correspondante de HC pour les mélanges B25, B50 et B75 était de 25%, 56% et 54% par rapport au carburant diesel pur. Cette tendance des émissions de HC a été expliquée par la puissance calorifique inférieure des mélanges de biodiesel, un délai d'auto-inflammation plus faible et une teneur en oxygène plus élevée des composants du biodiesel.

Alptekin et al. [205] ont déclarés que le biodiesel d'huile de rinçage et son mélange de B20 réduisaient les émissions de HC de 2,3% et 21,5% par rapport au pétro-diesel. Tandis que, le biodiesel de graisse de poulet a montré une augmentation de HC d'environ 9,2% et son mélange B20 a réduit les HC d'environ 14,1% par rapport au carburant diesel. Il convient de noter que les auteurs ont conclu que l'augmentation de la concentration de bioéthanol n'avait aucun impact sur les émissions de HC.

Même si les émissions de HC ne sont pas directement liées à la vitesse et à la charge nominale du moteur, elles dépendent de la géométrie de la chambre de combustion et du système d'injection de carburant. En testant le mélange B25 de biodiesel d'huile de poisson et de biodiesel d'huile de cuisson, Behçet et al. [177] ont observés que les mélanges de biodiesel présentaient des émissions de HC inférieures d'environ 19,81% par rapport au carburant diesel. Buyukkaya et al. [179] ont constatés que le biodiesel d'huile de truite réduisait les émissions de HC d'environ 45% selon les conditions de chargement. Un indice de cétane et une température élevée du gaz ont été notés comme les raisons de la réduction des HC.

La plupart des résultats de la recherche, mis à part les résultats ci-dessus, décrivent clairement que les émissions de HC ont diminuées lors de l'utilisation de biodiesel dans toutes les conditions d'exploitation [177, 178, 183, 184, 187, 188, 205]. D'autre part, très peu de chercheurs ont affirmés que les HC augmentaient avec l'ajout de biodiesel [170, 182, 206].

### **II.7.3.2. Monoxyde de carbone (CO)**

Le monoxyde de carbone est le produit de la combustion intermédiaire de combustibles qui est produit par des facteurs tels que le manque d'oxydants, le mélange inefficace de l'air et du carburant, le temps insuffisant pour la post-oxydation, etc. [183, 186]. Une réduction des émissions de CO a été observée par Satputaley et al. [167], lorsque l'huile d'algue et l'ester méthylique d'algues étaient testés dans un moteur diesel dans des conditions de charge variables. Les principales raisons de la baisse des émissions seraient la teneur élevée en oxygène du carburant d'essai qui convertit le CO en CO<sub>2</sub>. La teneur élevée en oxygène d'environ 10,37 à 12,25% et l'indice de cétane élevé de biodiesel améliore le processus de combustion qui à son tour réduit les émissions de CO des carburants biodiesel algues et jatropha, comparé au pétro-diesel, le jatropha et le biodiesel algal réduisent les émissions de CO de 32% et 27% respectivement. Les deux carburants biodiesel ont montrés les plus faibles émissions de CO en mode rural où la charge du moteur était la plus faible [169].

L'utilisation de biodiesel d'huile de cuisson usagée dans un moteur diesel à injection indirecte a entraînée une augmentation de 33,28% des émissions de CO par rapport au carburant diesel. L'ajout d'alcools d'ordre supérieur au biodiesel a considérablement augmenté les émissions de CO à une moyenne de 39,95%, 38,83% et 12,6% pour le propanol, le butanol et le pentanol. L'ajout de pentanol améliore la concentration d'oxygène, ce qui réduit la formation de CO par rapport à d'autres mélanges d'alcools [170]. Pradhan et al. [171] ont observés que l'utilisation de biodiesel d'huile de moutarde pur usagée réduisait les émissions de CO de 75% à faibles charges et de 70,58% à planes charges. Zare et al. [172] ont utilisés la tri-acétine comme additif oxygéné avec du biodiesel d'huile de cuisson usagée dans un moteur diesel. Les résultats indiquent que les émissions de CO avaient augmentées à la charge 25% en raison du rapport air/carburant élevé et de la combustion pauvre du mélange de carburant. Les auteurs ont également notés qu'à toutes les autres conditions de chargement, les émissions de CO étaient inférieures à celles du pétro diesel.

La teneur en oxygène plus élevée du mélange de biodiesel butanol-huile de cuisson usagée a éliminé les zones riches en carburant dans la chambre de combustion et réduit ainsi les émissions de CO d'un moteur diesel à injection directe [174]. Sanli et al. [186] ont révélés que le biodiesel ester éthylique émettait 28,84% et le biodiesel ester méthylique émettait 22,30% moins de CO que le carburant diesel à base de pétrole. Les rapports air-carburant et le pouvoir calorifique plus élevés du mélange d'ester éthylique ont été mentionnés comme la raison de cette variation des émissions de CO. Mikulski et al. [207] ont observés que la réduction de CO la plus élevée (47%) pour le mélange de biodiesel B75 à 1500 tr/min et la plus faible (16%) pour le mélange B25 à 3000 tr/min. À un régime moteur de 1500 tr/min, une réduction moyenne de CO de 37%, 38% et 27% a été observée pour les mélanges B75, B50 et B25 respectivement. Pour un régime moteur de 3000 tr/min, les réductions moyennes de CO se sont vraies respectivement de 30%, 25% et 19% pour les B75, B50 et B25. La réduction du CO a été expliquée par la présence d'oxygène, une viscosité, une densité et une qualité de mélange plus élevées.

Alptekin et al. [205] ont observés que le biodiesel à base d'huile de rinçage et le biodiesel à base de graisse de poulet présentaient une réduction de 21% et 12% des émissions de CO. Tandis que, les B20 des deux biodiesels ont montrés une diminution des émissions de CO d'environ 10% et 11% par rapport au diesel pur. De plus, avec l'ajout de bioéthanol dans le mélange de biodiesel, les émissions de CO ont légèrement diminuées à des pleines charges en raison de la teneur élevée en oxygène du bioéthanol. Gnanasekaran [176] a analysé les effets

des temps d'injection sur les émissions de CO lorsque le moteur est alimenté au biodiesel d'huile de poisson. Pour le biodiesel à base d'huile de poisson, à 24 ° APMH s'était entre 21 à 34% alors qu'il y avait une augmentation de 18 à 25% à 27 ° APMH par rapport au moment d'injection de 21 ° APMH. Cette tendance du CO a été attribuée au dégagement de chaleur élevé des carburants biodiesel.

Behçet et al. [177] ont constatés que les émissions de CO du moteur diesel Rainbow-186 étaient plus élevées à faibles charges pour tous les carburants d'essai, tandis qu'à des vitesses élevées il y avait une baisse des émissions de CO d'environ 16,54% pour les carburants biodiesel. La baisse des émissions a été signalée en raison de la teneur élevée en oxygène des mélanges de biodiesel. Buyukkaya et al. [179] ont rapportés qu'avec l'augmentation du pourcentage de biodiesel d'huile de truite, les niveaux d'émissions de CO chutent par rapport au diesel. Les auteurs ont également notés que le B50 a montré une réduction de CO d'environ 9% pour une faible charge et de 17,2% pour des conditions de pleine charge. Cette tendance a été attribuée à la forte teneur en oxygène du biodiesel et au rapport C/H élevé du biodiesel.

De nombreux chercheurs ont signalé que l'ampleur des niveaux de CO dans les gaz d'échappement était réduite lorsque le carburant contient une fraction de biodiesel dans toutes les conditions de fonctionnement [171, 175, 178, 182-185, 188]. Tandis que, très peu de chercheurs indiquent que les émissions de CO affichent une tendance à la hausse avec l'ajout de biodiesel [187, 206].

### **II.7.3.3. Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)**

Le dioxyde de carbone est l'un des principaux gaz à effet de serre dont la formation est une indication des émissions de la combustion et de l'efficacité de la combustion [182, 207]. Le comportement commercial du CO et du CO<sub>2</sub> ont été observés par Piasy Pradhan et al. [171] de telle sorte qu'une augmentation linéaire du CO<sub>2</sub> a été observée par rapport à la charge pour tous les carburants d'essai, ce qui représente l'uniformité de la combustion. Zare et al. [172] ont étudiés expérimentalement les caractéristiques d'émission d'un moteur diesel alimenté avec du biodiesel de l'huile de cuisson usagée et un additif la tri-acétine. Les auteurs ont constatés que les concentrations de CO<sub>2</sub> augmentent en augmentant le taux d'oxygène, la charge et en diminuant la vitesse du moteur. Le biodiesel d'huile de cuisson usagée pur avec tri-acétine a montré une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 2,5% par rapport au carburant diesel. L'existence de suffisamment d'oxygène dans la chambre de combustion et une température de postcombustion élevée augmente les niveaux de CO<sub>2</sub> dans les gaz d'échappement du moteur.

Sanli et al. [186] ont étudiés les variations des caractéristiques d'émission des esters méthyliques et éthyliques du biodiesel d'huile de cuisson usagée dans un moteur diesel. Les émissions de CO<sub>2</sub> ont montrées une tendance à la baisse de 10,16% à 9,1% et de 10,06 à 9,14% pour les carburants biodiesel ester méthylique et ester éthylique respectivement lorsque le régime du moteur a été augmenté à 1700 tr/min. En comparant les carburants à base d'ester, l'ester méthylique a montré une émission prédominante de 2,08% plus élevée que le pétrodiesel, alors que l'éthyle n'a montré qu'une hausse de 1,86%. De plus, l'addition de 20% de diesel aux mélanges d'esters a augmenté les émissions de CO<sub>2</sub> de 0,64% et de 0,92% respectivement pour les esters méthyliques et éthyliques. Les émissions de CO<sub>2</sub> plus élevées des carburants biodiesel sont attribuées à des teneurs en oxygène et en carbone plus élevées des carburants d'essai par rapport au diesel pur.

Mikulski et al. [207] ont analysés les variations des émissions de CO<sub>2</sub> d'un moteur diesel turbo à 4 temps alimenté avec des mélanges de biodiesel de saindoux de porc. A un couple moteur de 100 N.m et un régime de 1500 tr/min, les auteurs ont observés une forte baisse des émissions de CO<sub>2</sub> de 6%, 3% et 2% respectivement pour les mélanges B75, B50 et B25. Lorsque le couple a été augmenté à 150 N.m, la différence moyenne des émissions a été trouvée 0,3% pour tous les carburants. Parallèlement, pour la vitesse de 3000 tr/min, les émissions de CO<sub>2</sub> ont été réduites de 6%, 3% et 1% pour les mélanges de biodiesel B75, B50 et B25 respectivement. Une réduction maximale de 4% pour le B75 a été observée à un régime moteur de 3000 tr/min et un couple de 150 Nm. Alptekin et al. [205] ont révélés que le biodiesel d'huile de rinçage, le biodiesel de graisse de poulet et leurs mélanges B20 correspondants présentaient une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> de 1,1%, 2,52%, 0,9% et 0,1% en moyenne par rapport au carburant diesel pur. D'autre part, l'ajout de bioéthanol a un impact négatif sur les émissions de CO<sub>2</sub> qui a montré une diminution de 5,8% et 7,1% pour le mélange B20 des deux biodiesel pris en compte. Cette diminution a été attribuée au mauvais rapport C/H du bioéthanol.

Behçet et al. [177] ont constatés que le B25 du biodiesel d'huile de poisson présentait les émissions de CO<sub>2</sub> les plus faibles, tandis que le carburant diesel présentait les niveaux d'émissions les plus élevés. De plus, les niveaux maximum d'émissions de CO<sub>2</sub> pour tous les mélanges de carburants ont été observés à un régime moteur de 2000 tr/min. Kalargaris et al. [208] ont déclarés que l'huile de pyrolyse plastique possède un rapport C:H de 10,34, supérieur à celui du diesel (C:H = 6,47). Par conséquent, les émissions de CO<sub>2</sub> d'échappement ont augmentées lors de l'utilisation d'huile plastique dans le mélange de carburant.

Une opinion mitigée a été enregistrée dans le cas du CO<sub>2</sub> lorsque le moteur est alimenté avec des mélanges de biodiesel. Certains auteurs ont rapportés que les niveaux de CO<sub>2</sub> étaient élevés à l'échappement [178, 183, 188, 206] alors que d'autres ont déclarés que les niveaux d'émission diminuaient avec l'ajout de biodiesel [187, 209].

#### **II.7.3.4. Oxydes d'azote (NOx)**

Les oxydes d'azote sont les polluants les plus toxiques des moteurs formés en raison de la température élevée de la flamme, du temps de réaction et de la teneur en oxygène du carburant [184]. Une tendance à la baisse des NOx a été observée par Satputaley et al. [167] avec l'utilisation d'huile d'algue et de son ester méthylique dans toutes les conditions de chargement. La diminution maximale de 38 ppm et 21 ppm à 5,15 kW de puissance de moteur a été observée pour l'huile de micro-algue et son ester méthylique respectivement. Jayaprabakar et al. [168] ont rapportés que l'avancement du moment de l'injection améliore la formation de NOx pour le biodiesel de *Gracelaria-verrucosa* et de son de riz, le fait de retarder le moment d'injection réduit considérablement la formation de NOx. Mais malgré-tout, les valeurs de NOx des carburants biodiesel étaient plus élevées que celles du carburant diesel dans toutes les conditions. Un indice d'iode et une teneur en oxygène plus faibles du biodiesel *Chlorella variabilis* diminuent la valeur NOx de 17% moindre à celle du biodiesel *Jatropha* dans des conditions d'essai standard. Aussi, le biodiesel des algues a montré une réduction des NOx en mode urbain, qui est respectivement de 2,61% et 1,17% de moins qu'en mode rural et en mode autoroutier [169].

Atmanli [170] a signalé que le biodiesel d'huiles de cuisson usagées et son mélange B50 réduisaient les émissions de NOx dans un moteur diesel à injection indirecte de 1,68% et 9,74% par rapport au pétro diesel classique. Cette diminution des NOx a été attribuée à un plus faible indice de cétane des carburants d'essai et au délai d'auto-inflammation qui oblige les gaz chauds à rester dans le cylindre à haute température pour former moins de NOx. Il a également constaté que l'ajout d'alcools à chaîne longue réduisait les émissions de NOx dans la plage de 27,44%, 19,27% et 15,05% pour le pentanol, le butanol et le propanol par rapport à un mélange de 50% de biodiesel. La raison de cette tendance est que les alcools ont un indice cétane inférieure par rapport aux carburants testés.

Pradhan et al. [171] ont étudiés les caractéristiques d'émission d'un moteur diesel alimenté avec du biodiesel d'huile de moutarde usagée. Il a été constaté que le biodiesel pur présentait

des émissions maximales de NO<sub>x</sub> par rapport aux autres carburants d'essai. Parmi les mélanges de biodiesel, les auteurs ont suggérés que le carburant B10 était sans danger pour l'environnement en raison de ses valeurs d'émissions de NO<sub>x</sub> les moins élevées. Zare et al. [172] ont constatés que les émissions de NO<sub>x</sub> dépendent fortement du taux d'oxygène, de la charge du moteur et de la vitesse. Le biodiesel d'huiles de cuisson usées pur et ses mélanges ont montrés des valeurs de NO<sub>x</sub> dominantes, sauf à une charge de 75%. La variation la plus élevée a été observée dans des conditions à pleine charge dans lesquelles les NO<sub>x</sub> des mélanges de carburants oxygénés sont de 19 à 31% supérieurs à ceux du carburant diesel pur. Cette tendance à l'augmentation des NO<sub>x</sub> a été attribuée à la teneur accrue en oxygène des carburants biodiesel, qui est lors mélanger bien avec l'air en phase de précombustion, ce qui entraîne une température plus élevée dans le cylindre.

Zhu [173] a observé que l'ajout de 10% et 20% de pentanol au biodiesel d'huile de cuisson usagée réduit les émissions de NO<sub>x</sub>, alors qu'un ajout de 30% augmentait les NO<sub>x</sub> lorsqu'ils étaient testés dans un moteur diesel à quatre cylindres à injection directe. Les variations des caractéristiques d'émission ont été attribuées à un indice de cétane plus faible, à une teneur en oxygène et à une chaleur moins élevée de vaporisation des carburants d'essai. La production de NO<sub>x</sub> lors de l'utilisation d'un carburant biodiesel peut être retardée en réduisant la température de combustion. Isik et al. [174] ont déclarés que l'utilisation d'un mélange B20 de biodiesel d'huile de cuisson usagée dans un moteur diesel entraîne plus d'émissions de NO<sub>x</sub> et que cela est dû au fait que le biodiesel contient plus d'oxygène. Les auteurs ont utilisés un additif pour réduire les NO<sub>x</sub>, ils ont réussis de réduire la température du cylindre. Il convient de noter que les auteurs ont également signalés que l'indice d'iode et l'indice de cétane du biodiesel contribuent à une émission plus élevée de NO<sub>x</sub> du carburant biodiesel.

Sanli et al. [186] ont observés que les émissions de NO<sub>x</sub> d'un moteur Ford turbocompressé ont augmentées jusqu'à la vitesse 1400 tr/min, après cette vitesse, les valeurs de NO<sub>x</sub> ont diminuées. Les carburants d'esters mélanges présentaient des NO<sub>x</sub> élevés dans toutes les conditions de chargement par rapport au carburant diesel. En moyenne, une augmentation des émissions de NO<sub>x</sub> de 11,32%, 10,8%, 3,13% et 3,03% a été observée pour l'ester méthylique, l'ester éthylique et leur mélange correspondant à 20% diesel respectivement. Cette tendance à l'augmentation des NO<sub>x</sub> a été attribuée à la teneur plus élevée en oxygène des carburants d'essai en raison des rapports air/carburant élevés, de la viscosité, de la densité, de l'indice d'iode et de l'indice de cétane inférieur des carburants d'essai.

Lors de l'utilisation d'esters méthyliques de saindoux de porc dans un moteur diesel turbocompressé, Maciej Mikulski et al. [207] ont constatés que les émissions de NOx augmentaient par rapport aux conditions de chargement pour tous les mélanges de carburant d'essai. Pour les mélanges B50, une augmentation des émissions de NOx de 12,5%, 5,6% et 15% a été observée à 1500 tr/min sous 150 Nm, 100 Nm et 50 Nm respectivement. Pour les mêmes conditions, une augmentation de 22%, 10% et 12% a été observée pour le mélange B75. Cette tendance à la hausse des NOx a été attribuée à une pression de combustion élevée et à la température à l'intérieur de la chambre de combustion. Alptekin et al. [205] ont montrés que les émissions de NOx du biodiesel à base de graisse de poulet et du biodiesel d'huile de rinçage étaient de 16% et 15,2% plus élevées en moyenne que celles du pétro-diesel. La teneur en oxygène enrichi, le démarrage précoce de l'injection de carburant et les pressions de cylindre élevées de carburant biodiesel étaient la raison citée par les auteurs pour les niveaux élevés de NOx dans les gaz d'échappement. Les résultats ont également prouvés que l'ajout de bioéthanol réduisait les émissions de NOx par rapport aux mélanges B20 à des charges du moteur inférieures. Cette tendance a été attribuée à l'effet de refroidissement et à la chaleur latente de la vaporisation de l'éthanol.

Gnanasekaran [176] a découvert que le mélange B20 de biodiesel d'huile de poisson présentait le taux de NOx le plus bas en raison de son pouvoir calorifique inférieur moindre et de sa viscosité plus élevée. Behçet et al. [177] ont signalés que les émissions de NOx des carburants à base d'huile de poisson et d'ester méthylique d'huile de cuisine étaient plus élevées que celles du carburant diesel dans toutes les conditions. Il a été également noté que les NOx ont augmentés jusqu'au régime moteur de 2000 tr/min, après ce régime, une baisse des NOx observée par les auteurs a été attribuée à la durée de combustion insuffisante. En comparant les deux carburants esters, il a été conclu que le biodiesel à base de graisses animales produisait moins de NOx que les carburants biodiesel à base d'huiles végétales.

Comme les résultats mentionnés ci-dessus corrèlent fortement les NOx avec la température de combustion, la plupart des résultats de recherche indiquent que l'ajout de biodiesel augmente les émissions de NOx [182-185, 188, 209] alors que d'autres recherches prouvent que les émissions de NOx ont montrées un comportement variable en fonction des conditions de fonctionnement [175,187]. Tandis que, peu de résultats ont signalés une réduction des NOx avec l'ajout de biodiesel [167, 178].



### II.7.3.5. Fumée et particules (PM)

Les émissions de fumée et de PM montrent les signes d'une combustion inefficace, où l'émission de PM a trois composants à savoir les sulfates, les hydrocarbures lourds absorbés ou condensés sur la suie [188]. La diminution de l'opacité de la fumée a été observée lors de l'avancement du calage d'injection d'un moteur diesel alimenté en *Gracelaria-verrucosa* et en ester méthylique de son de riz. Cette tendance à la baisse progressive a été observée en raison de la teneur en oxygène du carburant qui améliore le processus de combustion. Singh et al. [169] ont observés que l'utilisation de biodiesel d'algues et le biodiesel de jatropha dans un moteur diesel réduisent les émissions de PM de 23% et 50% respectivement par rapport au pétro-diesel. Il a été attribué à la teneur élevée en oxygène du carburant biodiesel qui améliore le processus de combustion et également à la teneur en soufre négligeable des carburants d'essai.

Zare et al. [172] ont rapportés que la combustion de la flamme de diffusion, le rapport d'oxygène et la charge du moteur sont les principaux paramètres qui régissent l'ampleur des émissions de particules dans un moteur diesel. Le diesel pur avec une teneur nulle en oxygène a présenté des émissions de PM la plus élevée alors que les émissions les plus faibles ont été enregistrées par le biodiesel mélangé à la tri-acétine hautement oxygéné (14,23%). Étant donné que les carburants oxygénés facilitent le processus d'oxydation de la suie et réduisent la formation de PM pendant le processus de combustion. Zhu et al. [173] ont montrés que l'ajout de pentanol au biodiesel réduisait considérablement les PM à des charges moyennes et élevées en raison de la teneur en oxygène enrichi du mélange de biodiesel. D'autre part, l'ajout de pentanol produit des radicaux libres comme OH, H, O qui encourage l'oxydation et supprime la formation de précurseurs de suie.

Cheung et al. [210] ont étudiés les émissions massiques de particules d'un moteur diesel à injection directe de 4 cylindres alimenté par du biodiesel d'huile de cuisson usagée et ses mélanges. Il a été constaté que la teneur en oxygène du biodiesel réduisait les particules de suie même à des pleines charges. Gnanasekaran [176] a déclaré que l'ampleur de la fumée dépend de la disponibilité de l'oxygène, de la qualité de combustion et de la formation du mélange. Il a également constaté que la fumée augmentait de 2 à 8% à un angle d'injection 21 °APMH et diminuait de 4 à 8% à 27 °APMH par rapport à 24 °APMH pour le biodiesel d'huile de poisson pur. Cette diminution de la fumée par rapport à l'avancée de l'injection a été attribuée à la dominance de la phase de combustion pré-mélangée.

Behçet et al. [177] ont constatés que les niveaux d'opacité de la fumée élevés étaient pour le carburant diesel et diminuaient pour les carburants biodiesel. Les esters méthyliques d'huile de poisson et d'huile de cuisine ont montrés une baisse de l'opacité de la fumée de 15,36% et 7,81% en moyenne par rapport au diesel. Cette diminution a été attribuée à l'enrichissement en oxygène du biodiesel qui a compensé le manque en oxygène dans les zones riches en carburant. Tout en alimentant le moteur diesel avec du biodiesel d'huile de truite à des concentrations de B50, B40, B20 et B10. Buyukkaya et al. [179] ont observés une réduction des niveaux de fumée de 60,5%, 29%, 17,3% et 6,2% respectivement. L'oxydation complète du carburant dans les zones riches en carburant de la chambre de combustion pour le carburant biodiesel entraîne une réduction des niveaux de fumée à l'échappement.

Indépendamment des résultats ci-dessus, certains auteurs ont signalés des niveaux de fumée élevés avec l'ajout de biodiesel [178], mais la plupart des résultats de recherche indiquent clairement que la fumée et les particules dans les gaz d'échappement des moteurs sont réduites avec l'ajout de biodiesel aux carburants [178, 182,183, 185].

# **Chapitre III : Corrélations entre les propriétés physico-chimiques des biodiesels**

### III.1. Introduction

L'une des particularités du biodiesel par rapport aux autres biocarburants est le fait qu'il est produit à partir d'une variété de matières premières. Étant donné que, la source d'origine de chaque huile ou graisse est caractérisée par une composition différente (acides gras), il n'est pas surprenant que les propriétés de l'ester final diffèrent (parfois substantiellement) d'un endroit à l'autre, en grande partie en fonction de la matière première utilisée, mais également de l'alcool utilisé dans l'estérification et le processus chimique d'extraction [211]. À cette effet, des spécifications auxquelles doivent répondre les esters méthyliques (biodiesels) destinés à être utilisés dans les moteurs à allumage par compression sont mise au point (ASTM-D6751, EN-14214). En ce qui concerne ces spécifications, les principaux problèmes techniques liés à l'utilisation du biodiesel en tant que carburant pour les moteurs diesel, à part du coût de production élevé (principalement en raison du coût élevé de la matière première), sa sensibilité à l'oxydation ainsi que sa mauvaises propriétés à basse température, ce qui nécessitant des additifs sous forme d'antioxydants et d'améliorants de l'écoulement à froid.

Plusieurs recherches sur les propriétés physico-chimiques du biodiesel ont été faites, soit sous forme d'expérimentation ou simulation [212-215], ou des investigations statistiques [5, 216], elles ont mis en évidence certains aspects importants concernant l'interdépendance de la composition du biodiesel et (de certaines) de ses propriétés physico-chimiques. L'objectif du présent chapitre est, de regrouper les différentes matières premières utilisées pour la production des biodiesels ainsi que leurs propriétés physico-chimiques, afin de les analyser statistiquement pour établir des corrélations entre les propriétés physico-chimiques de l'ester méthylique, pour de sortir le minimum des propriétés qui portants la majorité d'informations.

### III.2. Méthode d'analyse

Pour faire une analyse statistique des données, Il existe plusieurs approches, les plus couramment utilisés sont l'*Analyse en Composantes Principales* (ACP) et la *régression linéaire*, pour les données quantitatives ; l'*Analyse des Correspondances Multiples* (ACM) et l'*analyse de variance* (ANOVA), pour les données qualitatives factorielles.

#### III.2.1. Analyse en composantes principales

L'Analyse en Composantes principales (ACP) fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles. Ces méthodes qui sont apparues au début des années 30 ont été surtout développées en France dans les années 60, en particulier par Jean-Paul Benzécri qui a beaucoup exploité les aspects géométriques et les

représentations graphiques. Dans la mesure où ce sont des méthodes descriptives, elles ne s'appuient pas sur un modèle probabiliste, mais elles dépendent d'un modèle géométrique. L'ACP propose, à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de  $p$  variables quantitatives pour  $n$  unités (appelées aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. Les représentations des unités permettent de voir s'il existe une structure, non connue a priori, sur cet ensemble d'unités. De façon analogue, les représentations des variables permettent d'étudier les structures de liaisons linéaires sur l'ensemble des variables considérées. Ainsi, on cherchera si l'on peut distinguer des groupes dans l'ensemble des unités en regardant quelles sont les unités qui se ressemblent, celles qui se distinguent des autres, *etc.* Pour les variables, on cherchera quelles sont celles qui sont très corrélées entre elles, celles qui, au contraire ne sont pas corrélées aux autres.

### III.2.2. Régression linéaire

La régression est un ensemble de méthodes statistiques très utilisées pour analyser la relation d'une variable par rapport à une ou plusieurs autres. Lorsqu'un diagramme de dispersion suggère que les variations d'une variable sont proportionnelles à celles de l'autre variable, l'analyse de régression linéaire permet de déterminer la droite approchant au mieux cette variation proportionnelle. Sur un graphique, cela revient à chercher la droite de laquelle tous les points sont aussi peu éloignés que possible de cette droite. La formule mathématique de cette droite de régression est la suivante : valeur de la variable dépendante = intercept +  $R^2 \cdot x$ , où  $R^2$  est le coefficient de régression et  $x$  la valeur de variable indépendante. Le coefficient de régression indique dans quelle mesure la valeur d'une variable dépendante varie avec la variation de la valeur de la variable indépendante (aussi appelée variable explicative). L'intercept (= ordonnée à l'origine) est la valeur obtenue lorsque la variable indépendante vaut zéro.

Plusieurs logiciels d'analyse statistique existent dans le marché, parmi-lesquels on peut citer STATISTICA, IBM-SPSS, TANAGRA et XLSTAT. Dans la présente étude le logiciel XLSTAT a été utilisé, dans les individus (observations) sont les matières premières utilisées dans la production du biodiesel, ainsi que les variables sont les propriétés physico-chimiques du biodiesel.

### III.3 Matières premières et propriétés

Les biodiesels les plus largement utilisés sont l'ester méthylique de colza en Europe, et l'ester méthylique de soja (soja) aux États-Unis, mais il existe de nombreuses autres matières

premières populaires telles que le palmier (en particulier l'Asie), le tournesol, les graines de coton, la graisse jaune et les esters méthyliques de suif. Ceux-ci sont collectivement connus sous le nom d'esters méthyliques d'acides gras (FAME), étant donné que le méthanol est principalement utilisé dans le procédé de transestérification à cause de son faible coût par rapport aux autres alcools. Il est bien établi aujourd'hui que les carburants mélangés au biodiesel parviennent dans une large mesure à réduire la quantité de particules émises ou les émissions polluantes des moteurs diesel. En général, des effets positifs similaires ont été observés en ce qui concerne les émissions de HC et de CO (bien que des résultats contradictoires ont été signalés, en particulier si des mesures sont prises après le catalyseur d'oxydation pour diesel), alors qu'un impact généralement modérément négatif est ressenti concernant les NO<sub>x</sub> [28, 217,218]. Les autres avantages notables des FAME par rapport à leurs homologues (pétrodiesel) sont leurs biodégradabilités, un stockage plus sûr en raison de leurs points d'éclair plus élevés, une lubricité améliorée et une faible toxicité. Afin d'analyser statistiquement les propriétés physiques et chimiques du biodiesel à partir de diverses matières premières, le tableau III.1 représente une synthèse de diverses propriétés physiques et chimiques du biodiesel pour toutes les matières premières à analysées.

#### **III.4. Analyses statistiques des propriétés des biodiesels :**

Pour d'effectuer l'analyse statistique, 34 matières premières ont été retenues (tableau III.1), à savoir quatre graisses animales (suif de bœuf, poulet, saindoux et poisson), 28 huiles dérivées de diverses plantes (canola, ricin, noix de coco, maïs, graine de coton, croton, noisette, karanja, jatropha, lin, mahua, neem, olive, palme, arachide, colza, son de riz, graines de caoutchouc, carthame, soja et tournesol, calophyllum inophyllum, ceiba pentandra), 2 algues, ainsi que de l'huiles de cuisson usées. Ces 34 matières premières ont finalement fournies des séries de données différentes.

La composition chimique du biodiesel dépend de la longueur de la chaîne et le degré d'insaturation des chaînes alkyle d'acide gras. À quelques exceptions (ex. l'huile de poisson), les acides carboxyliques (gras) sont tous des composés à chaîne droite dont la taille varie de 8 à 20 atomes de carbone. Les acides peuvent être saturés (impossible d'ajouter chimiquement un atome l'hydrogène), ce qui signifie qu'ils ne contiennent que des liaisons simples, ou insaturés (peuvent être hydrogénés), ce qui signifie qu'ils contiennent au moins une double liaison. Pour chaque double liaison, une molécule d'hydrogène peut être ajoutée par acide gras [28,219].

**Tableau III.1** : Résumé des différentes propriétés physico-chimiques du biodiesel pour toutes les matières premières à analysées [190, 216, 220-223]

	IC	Densi	Visco	PCI	PCS	PE	P Ecoule	P	PCFF	O Sta	I Acide	T Soufre	TD	TD90%	C	H	O	I Iode	DI ap1	DI ap2	DI Ap3	LC
Suif de bœuf	60,9	874,3	4,83	37,22	40,04	157,2	10	13,8	12,2	0,45	0,3	14,3	329,2	344,2	76,0	12,6	11,3	54,5	0,52	0,58	0,59	17,37
Canola	54,8	881,6	4,4	37,98	39,975	159	-8	-1,8	-8,8	11	0,22	2,2	352	354,3		12,8	11,0	104	0,92	1,24	1,33	17,99
Ricin (Castor)	42,1	917,6	14,52	37,63	39,9	160,9	-23,4	-15,1	5,9	12,9	0,39	0,5	337	381,6				85,2	0,97	1,03	1,03	17,99
Graisse de poulet	57	876,3	4,81	37,61	39,89	162,2	4,4	7,5	2,7	8,7	0,32							78,7	0,68	0,88	0,89	17,42
Noix de coco	61	870,8	2,78	35,98	38,985	127,7	-3,8	-1,2	-4,7	11	0,16	3,3			72,7	11,6		7,8	0,09	0,12	0,12	13,22
Maïs	52,5	882,2	4,32	38,6	40,19	165,7	-5,1	-3	-7,5	3	0,19	3		345,8	76,7	11,5	10,9	120,3	0,86	1,45	1,45	17,79
Graine de coton	53,3	879	4,7	38,17	40,48	165,4	-0,2	1,2	4,8	1,8	0,29	5,3		349,5	76,8	11,8	11,2	105,7	0,71	1,27	1,27	17,46
Croton	50,6	883,2	4,48	37,82	40,28	174,5	-6,3	-4	11	4	0,31		352	358	77,8	11,9	10,2	142	0,90	1,76	1,74	17,86
Poisson	51	887,3	4,3	38,8	40,55	162,6	-4	-0,3	-3	8,2	0,39	5,7	339	360,2	77,4	11,8		142,6	0,96	1,15	2,1	16,72
Noisette	53,8	877,9	4,55	37,23	39,8	163,5	-14	-12	-10,2	7,6	0,22				76,5	11,9		92,5	0,90	1,01	1,01	17,87
Jatropha	55,7	878,7	4,72	38,05	40,38	158,5	-0,9	5,7	-1,2	5	0,34	12,9	333,3	341,2	76,5	12,2	11,3	99	0,78	1,15	1,15	17,79
Karanja	55,4	882,9	5,04	36,49	40,275	163,6	2,5	7,6	-7	4,1	0,44	13,5	334	345,4	76,3	11,9	11,5	85,2	0,75	1,02	1,04	18,08
Saindoux (porc)		873	4,89	36,91	39,95	153,5	11	15	9		0,36		329	337	76,0	12,1	11,7	64,5	0,60	0,74	0,74	17,40
Graine de lin	51,3	891,5	4,06	37,83	40,41	170,3	-8	-1,7	-7,7	0,4	0,29	8,2	338	361	77,7		11,2	184,5	0,91	1,61	2,15	17,91
Mahua	56,9	874,5	5,06	36,88	40,18	150,6	4	4		2,1	0,41							70,8	0,54	0,69	0,69	17,57
N neem	54,2	876,2	4,72	37,15	39,96	162,5	6,1	11,6			0,26				76,7	12,1	10,7	86,3	0,64	0,83	0,83	17,66
Olive	58,9	881,2	5,05	37,29	40,28	171	-5	-2	-5,3	1,7	0,37	7,8						80,3	0,85	0,96	0,97	17,79
Palme	61,2	874,7	4,61	37,08	39,985	161,9	11,8	13,3	11,4	11,4	0,27	3,1	327,7	339,3	76,0	12,4	11,2	53,1	0,51	0,62	0,62	17,08
Arachide	54,9	882,9	4,77	38,05	39,93	174,5	-2,7	4,3	16,3		0,19	5,9						80,5	0,82	1,16	1,16	18,04
Colza	54,1	882,2	4,63	37,62	40,335	164,4	-9,7	-3,3	-11,3	7,4	0,24	4,6	340,7	344,3	77,0	11,8	10,9	111,7	0,93	1,24	1,32	18,08
Son de riz	56,3	880,9	4,7	38,04	40,475	157,8	-0,9	5	0,3		0,28	5,3	336	346	76,2	12,3	11,2	93,2	0,78	1,14	1,15	17,64
Graines	50,4	882,3	4,79	37,82	40,35	158,3	-7	3,6	-1	7,2	0,22							139,7	0,80	1,36	1,54	17,80
Carthame	51,8	883,8	4,1	38,14	40,155	169,9	-8,1	-4,9	-8,3		0,32							136,7	0,90	1,65	1,65	17,85
Soja	51,8	882,8	4,29	37,75	40,02	158,8	-3	0,1	-3,6	5	0,32	2,7	336,3	345	77,0	11,9	10,9	126	0,84	1,44	1,51	17,79
Tournesol	51,9	882,9	4,53	37,8	40	172	-3,8	0,9	-3,5	1,3	0,32		355,7	356,5	76,9	11,8	10,9	128,6	0,89	1,57	1,57	17,92
Cuisson usagées calophyllum	56,2	880,6	4,75	37,88	39,805	161,7	-0,3	5,3	-2,8	5	0,41	8,6	340,4	350,3	76,9	12,0	10,7	85,2	0,76	1,07	1,09	17,69
Graine colza	51	884	4,7	37,23		150	-10		-16		0,03	3			77,2	11,8	10,9	112				
Algue		880,5	3,16		40,66	150	-2,7	1			0,5											
Jatropha1	57	862	4,8		39,23	135	2	6			0,4											
Micro-algue	54,5	860	3,6		39	115	-6				0,395							19				
Ceiba pentandra	57,2	876,9	4,16		40,49	156,5	2,5	3	1	4,42	0,38	13,97				12	11,6	107				
Micro algue 1	46,5	912	5,06	37,42	39,86	95	-6	16,1			0,14	7,5			78,4	11,1	10,4		0,69			
Jatropha curcas 2	58,2	860	4,08		40,22	160,5	2	2,8	1	9,41	0,28	8,01				12,8	11,8	105				

### III.4.1 Statistiques descriptives des propriétés :

Comme il a été mentionné précédemment, pour réaliser l'analyse statistique 22 propriétés physico-chimiques ont été prises en considération pour 34 matières premières. Pour faire l'analyse le logiciel XLSTAT a été utilisée, sur les données du (tableau III.1).

Le tableau III.2 représente la statistiques descriptives des propriétés physico-chimiques (nombre d'observations, maximum, minimum moyenne, l'écart-type). Le commentaire le plus évident concernant les tableaux III.2 est l'écart-type élevé observé pour l'indice d'iode (34,562), cela est dû à l'utilisation d'une variété de matières premières de moins insaturée (noix de coco ; degré d'insaturation 9%) au plus insaturé (grain de lin ; degré d'insaturation 97%). Pour la majorité des matières premières examinées, les acides insaturés primaires soient les acides oléique, linoléique et linoléique [216], il existe quelques exceptions notables. Par exemple, le castor ou le ricin est riche en acide ricinoléique mono-insaturé (contenant un groupe hydroxyle), responsable de la haute (viscosité 14,52 mm<sup>2</sup>/s ; et densité 917,6 kg/m<sup>3</sup>) de cette huile.

**Tableau III.2 : Statistiques descriptives des propriétés**

Variable	Observations	O données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
IC	34	0	42,100	61,200	54,438	4,020
Densité	34	0	860,000	917,600	880,447	11,155
PCI	34	0	35,985	38,800	37,589	0,549
PCS	34	0	38,985	40,660	40,065	0,388
Viscosité	34	0	2,780	14,520	4,771	1,796
PE	34	0	95,000	174,500	157,015	16,580
P Ecoule	34	0	-23,400	11,800	-2,371	7,134
P Troub	34	0	-15,100	16,100	2,516	6,819
PCFF	34	0	-16,000	16,300	-0,904	7,146
O Stabi	34	0	0,400	13,080	6,090	3,322
I Acide	34	0	0,030	0,500	0,306	0,100
T Soufre	34	0	0,500	14,300	6,877	3,338
TD 90%	34	0	337,000	381,600	350,565	7,488
TD 50%	34	0	327,700	355,700	338,687	5,567
C (%)	34	0	72,750	78,410	76,672	0,846
O (%)	34	0	10,200	11,800	11,145	0,327
H (%)	34	0	11,120	12,840	12,059	0,327
LC	34	0	13,220	18,080	17,530	0,813
I Iode	34	0	7,800	184,500	97,123	34,554
DI ap1 (%)	34	0	0,090	0,970	0,759	0,169
DI app.2	34	0	0,120	1,760	1,105	0,327
DI app.3	34	0	0,120	2,150	1,181	0,404



### III.4.2. Degré d'insaturation

Un paramètre très déterminant de la matière première du biodiesel est son degré d'insaturation, sa mesure habituelle est l'indice d'iode. Dans la littérature, trois approches sont principalement utilisées pour évaluer le degré d'insaturation. La première compte les pourcentages pondéraux saturés et insaturés, sans distinction entre les acides gras mono-insaturés et polyinsaturés (tableaux III.1). Dans la deuxième approche, tous les acides gras avec 3 doubles liaisons ou plus sont considérés comme ayant un poids égal à ceux avec 2 doubles liaisons (appelé degré d'insaturation «partiellement pondéré») [224]. Dans la troisième approche, chaque acide gras insaturé pèse en fonction du nombre de doubles liaisons dans sa molécule (degré d'insaturation «pleinement pondéré») [216].

Les valeurs des trois approches utilisées pour le calcul de degré d'insaturation des différentes matières premières examinées, surtout, les corrélations entre les divers degrés d'insaturation avec l'indice d'iode et la longueur de la chaîne sont représentées dans la figure III.1.

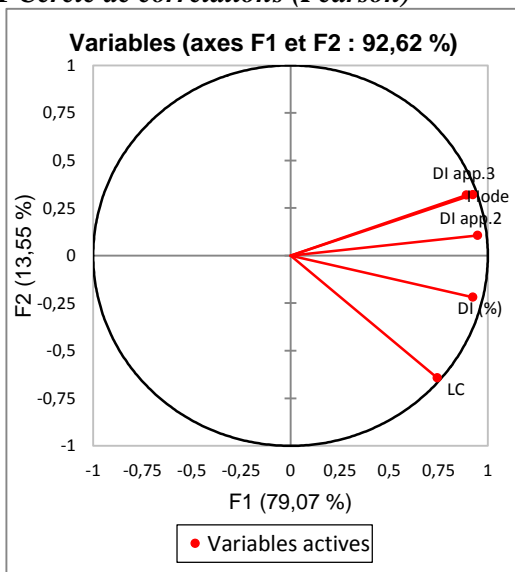
D'après ACP, On constate que l'indice d'iode présente une corrélation positive avec le degré d'insaturation du première approche (DI) d'ordre (71,2%), de plus des fortes corrélations avec la deuxième approche (DI app.2) et la troisième approche (DI app.3) d'ordre (83,4% ; 88,5%) respectivement. Ainsi que, des corrélations moins fortes des trois approches de calcul du degré d'insaturation avec la longueur de la chaîne(LC). Du cercle de corrélations de la figure III.1-a, on peut résulter que l'indice d'iode ; DI ; DI-app.2 ; DI-app.3 ; et LC sont représentés respectivement (89,2% ; 92,3 % ; 94,8 % ; 92,4% ; 74,3%) sur l'axe1, dans les informations sont représentées d'ordre de (79,07%) sur cet axe et (92,62%) les deux axes.

Pour la régression linéaire, et selon la figure III.1.b, on peut voir que l'indice iode est corrélé avec DI, DI app.2, et DI app3 d'un coefficient de régressions ( $R^2$ ) d'ordre (0,722 ; 0,8365 ; 0,9427) respectivement. On peut conclure que l'indice d'iode a des fortes corrélations avec le degré d'insaturation, surtout avec le DI app.3, et une corrélation plus faible avec la longueur de la chaîne. L'indice d'ode et le degré d'insaturation porte la même information.

### III.4.3. Indice d'iode

L'indice d'iode (II) est un paramètre utilisé pour déterminer le degré d'insaturation dans une huile végétale ou une graisse animale. Ce nombre indique la masse d'iode ( $I_2$ ) en grammes, qu'il est nécessaire de saturer complètement des molécules de 100 g d'une huile utilisée, au moyen d'une réaction stœchiométrique [128].

a.1 Cercle de corrélations (Pearson)



a.2 Nuage des points

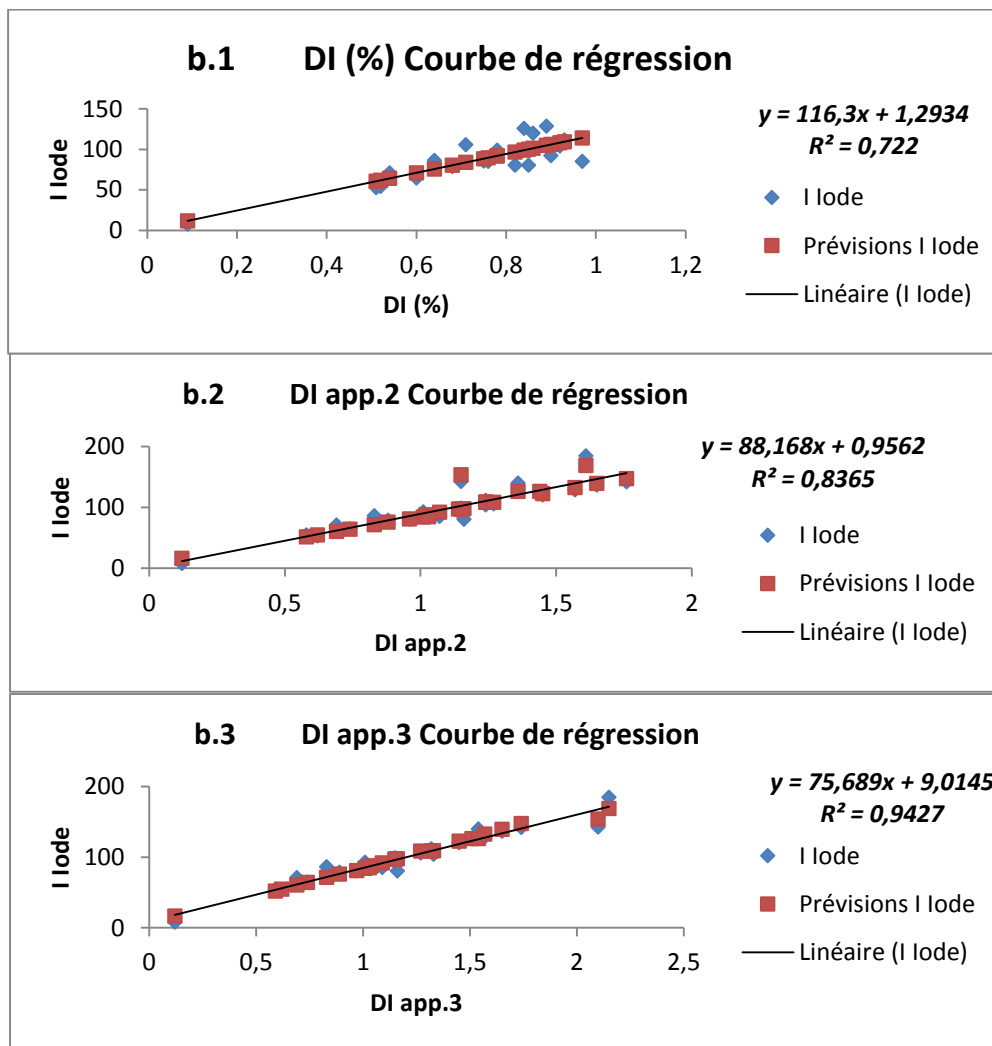
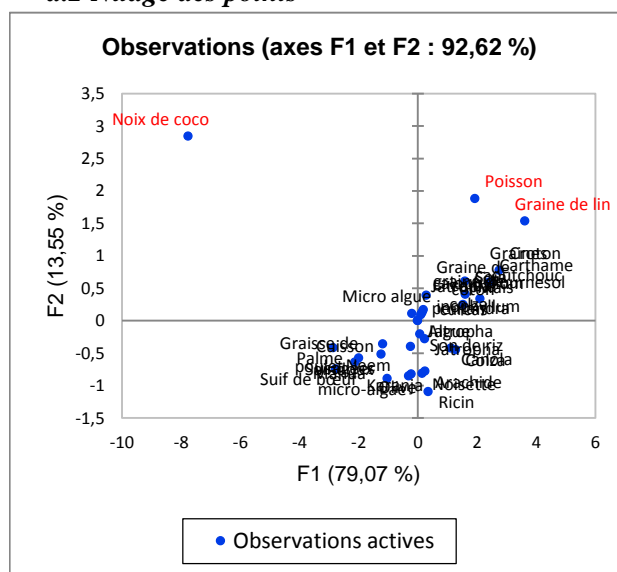


Figure III.1 : Corrélations entre l'indice iode et les approches de calcul de degré d'insaturation en ACP et Régression linéaire

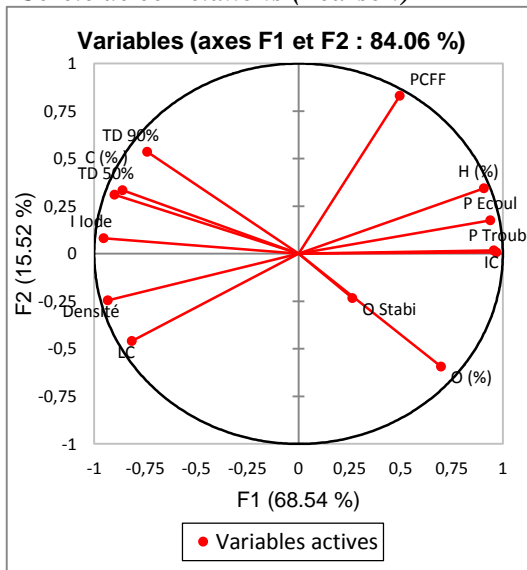
Les indices d'iode (moyenne) des matières premières examinées vont de ; ester méthyle de plus saturé (7,8 la noix de coco) à le plus insaturé (184,5 la graine de lin), avec une valeur moyenne globale de 98,335 (tableau III.2). Il n'y a pas de spécification pour l'indice d'iode dans la norme ASTM, alors que les spécifications européennes EN exigent que les biodiesels utilisés dans les moteurs à allumage par compression aient une valeur maximale d'II de l'ordre de 120. L'idée sous-jacente à cette spécification est que des valeurs élevées d'iode dans le carburant indiquent une propension à la polymérisation entraînant la formation de dépôts [28]. Cela signifie que beaucoup des EMAG (FAME) étudiés doivent être exclus de l'utilisation sous forme pure en norme EN comme, croton, poissons, graines de lin, les graines de caoutchouc et de carthame, tandis que le maïs, le soja et le tournesol ne sont que marginalement acceptés (voir tableau III.1) ; Par ailleurs, l'ester méthyle le plus utilisé en Europe le colza (II-colza=112), cette valeur est assez proche de la limite de spécification EN.

Comme illustré dans la figure III.1, une très forte corrélation existe entre II et le degré d'insaturation, confirmant les résultats de recherches antérieures sur des échantillons plus petits [5, 212, 218]. En fait, ce sont les 2 matières premières "extrêmes" (la plus saturée, la noix de coco ; et la plus insaturée graine de lin), ainsi que le poisson qui est plus insaturé (DI) et sa longueur de chaîne est la plus petite des matières examinées, qui ne différencient que de la relation linéaire presque parfaite entre le nombre moyen de doubles liaisons et l'indice d'iode. Des valeurs élevées d'indice d'iode ont également été associées à des problèmes de stabilité au stockage [213].

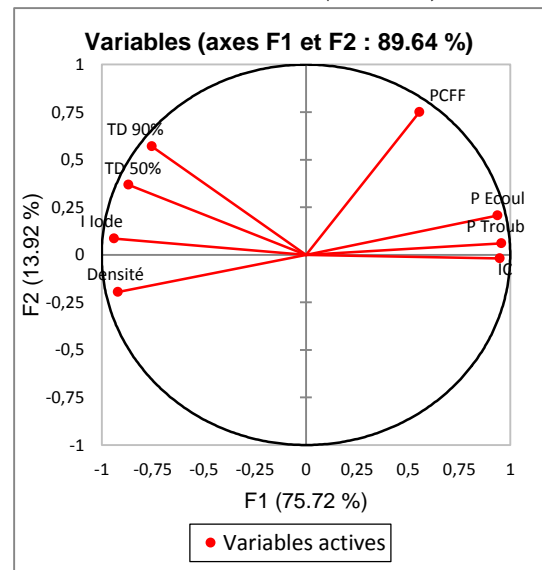
#### III.4.4. Indice de cétane

L'une des propriétés les plus importantes du carburant diesel est l'indice de cétane (IC), qui représente l'inflammabilité du carburant, ce qui est particulièrement critique lors de conditions de démarrage à froid. Les faibles indices de cétane conduisent un long retard à l'allumage, c'est-à-dire un long délai entre l'injection de carburant et le début de la combustion (délai d'auto-inflammation). Par conséquent, plus l'IC est bas, plus la phase de combustion pré-mélangée est abrupte, ce qui entraîne également un bruit élevé lors de la combustion [225]. D'autre part, des indices de cétane plus élevés favorisent l'auto-inflammation plus rapide du carburant et conduisent souvent à une réduction des émissions de NO<sub>x</sub> [224, 226], en particulier à faible charge du fonctionnement du moteur [217, 223]. De nombreux chercheurs préfèrent fournir l'index de cétane (CI) au lieu de combiné avec l'indice de cétane (CN). L'indice de cétane est calculé en fonction de la densité du carburant et de la courbe de distillation.

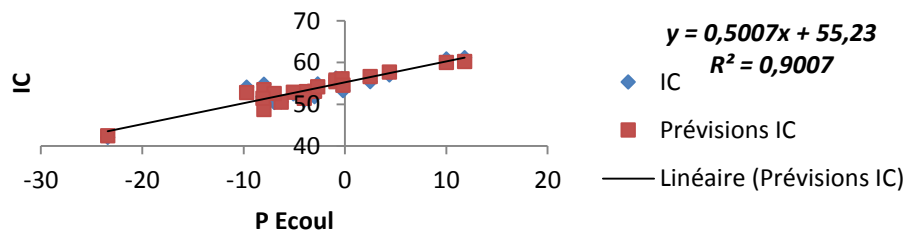
a.1 Cercle de corrélations (Pearson)



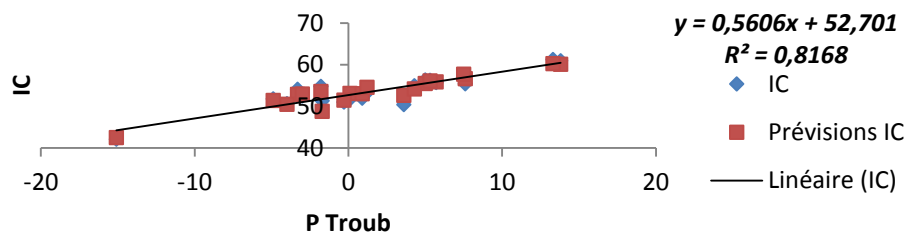
a.2 Cercle de corrélations (Pearson)



b.1 P Ecoule Courbe de régression



b.2 P Troub Courbe de régression



b.3 Densité Courbe de régression

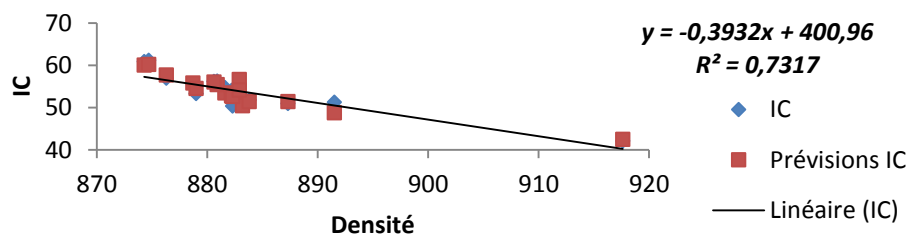


Figure III.2 : Corrélations entre l'indice Cétane et les propriétés physico-chimiques en ACP et Régression linéaire

L'indice de cétane du biodiesel (contrairement à celui des huiles végétales ou des graisses animales d'origine) est généralement plus élevé, parfois beaucoup, que celui du carburant diesel conventionnel. À l'exclusion de ricin (IC égale à 42,1), et micro-algue (IC égale 46,5), les indices de cétane des 32 autres matières premières sont supérieurs à 50,4 (voir tableau III.1), avec une valeur maximale 61,2 pour les esters méthyliques de palme, tandis que, la valeur moyenne pour toutes les matières premières est de 54,438, avec un écart type de 4,02. Graboski et McCormick [28] ont constatés que la large gamme de IC observés dans le biodiesel peut être causé par : a) des différences dans la conversion fractionnelle des triglycérides en ester ; b) par la présence de méthanol et de glycérol résiduels dans le carburant final. Il a également été confirmé que l'effet du mélange de biodiesel sur le IC est approximativement linéaire pour les mélanges d'esters avec du carburant diesel [28].

Les spécifications européennes imposent un indice de cétane de biodiesel d'au moins 51 (minimum), ce qui signifie que certaines des matières premières étudiées (le ricin, le croton, les graines de caoutchouc, micro-algue) se situent en dehors des limites acceptables (tableau III.1), tandis que, en norme ASTM (IC est beaucoup plus basse 47), toutes les matières premières sont marginalement acceptées, à l'exception de ricin et micro-algue.

Comme le montre la figure III.2, qu'une l'interdépendance entre l'indice de cétane et l'indice d'iode (- 98,3%) en ACP. L'indice de cétane diminue à mesure que le nombre de doubles liaisons (l'insaturation) augmente, c'est-à-dire à mesure que la composition s'enrichit en acides linoléiques et / ou linoléiques. En revanche, les esters hautement saturés tels que ceux dérivés de la noix de coco, de la palme et du suif présentent les valeurs les plus élevées d'IC (tableau III.1). D'autre part, aucune corrélation claire entre l'indice de cétane et la longueur de chaîne moyenne d'EMAG, n'a pu être établie. Dans la littérature [28,145, 227], il a été montré que l'IC augmente lorsque la longueur de la chaîne augmente ou que les ramifications diminuent. Un exemple notable de cette dernière dépendance est l'existence d'un radical (-OH) ramifié dans l'acide ricinoléique de l'huile de ricin, ce qui explique probablement le faible IC par rapport à d'autres huiles également non saturées [216]. En ce qui concerne l'interdépendance entre le IC et la longueur de la chaîne, cet argument est valable pour les esters d'acides gras purs (par exemple l'esters méthyles l'acide stéarique (18: 0) a une valeur de IC supérieure à celle d'esters méthyles d'acide palmitique (16: 0), qui à son tour a un IC plus élevé que l'esters méthyles l'acide myristique (14: 0), etc.) [216]. Étant donné que les biodiesels sont des mélanges d'une variété d'esters d'acides gras purs, la corrélation avec

la longueur de la chaîne s'affaiblit considérablement dans les EMAG finaux, à l'exception de la noix de coco, les longueurs de la chaîne EM montrent des valeurs très proches.

La figure III.2 montre qu'il existe une corrélation négative entre l'IC et la densité avec  $R^2=0,7317$ , en plus cette interdépendance est bien claire dans le cercle de corrélation (-91,7%), on peut dire que l'IC augmente lorsque la densité diminue et vice-versa. La figure III.2, illustre aussi que il existe des fortes corrélations entre l'IC et les propriétés à basse température (P Ecoule, P Troub) avec (89,7% ; 82,3%) en ACP et des coefficients de régressions ( $R^2$ ) d'ordre (0,9007 ; 0,8168). L'IC porte les mêmes informations que les propriétés à basse température, aussi des interdépendances sont observées de l'IC avec la longueur de la chaîne et la température de distillation.

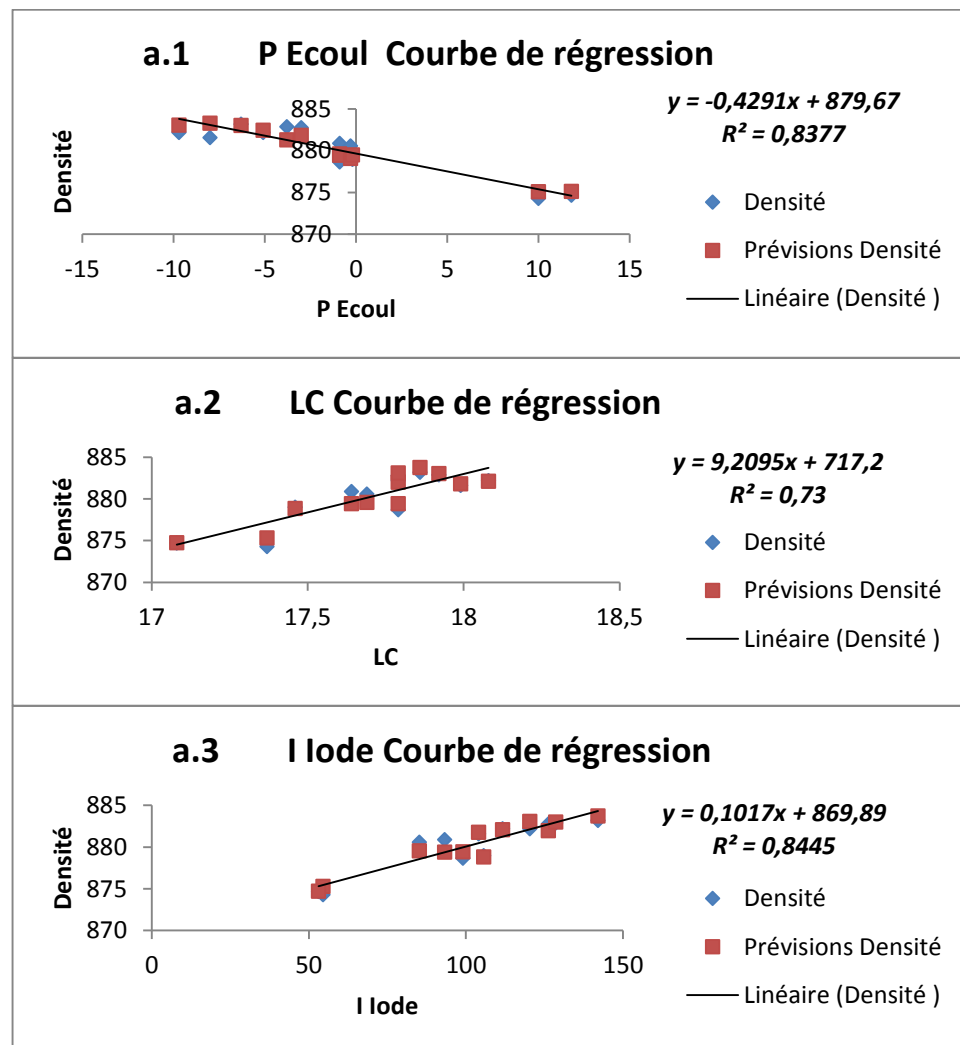
#### III.4.5. Densité

La densité d'un matériau ou d'un liquide est définie en tant que masse par unité de volume. De nombreux chercheurs préfèrent le terme gravité spécifique (sans dimension), qui est défini comme le rapport entre la densité d'une substance et la densité d'une substance de référence (généralement de l'eau). Les carburants biodiesels sont généralement caractérisés par une densité supérieure à celle du diesel à base de pétrole, ce qui signifie que les pompes à carburant à débit volumétrique injecteront une masse de biodiesel supérieure à celle du carburant pétrole-diesel. Cela aura à son tour, un impact sur le rapport air-carburant, d'où les températures de gaz locales et les émissions de NOx, tant que le moteur conserve le calibrage du carburant diesel. En fait, il a été démontré qu'il existait une corrélation entre la densité et les émissions de NOx, des densités plus faibles favorisant des taux de NOx inférieurs [24], bien que d'autres chercheurs n'aient pas confirmés une telle tendance.

Les densités des 34 esters méthyliques étudiés, variant de 870,8 à 891,5 kg/m<sup>3</sup>, à l'exclusion de ricin et micro-algue qui ont des densités de l'ordre de (917,6 ; 912) respectivement, la valeur moyenne globale étant de 880,447 kg/m<sup>3</sup>, avec un écart type de 11,155 (tableau III.2). Soit près de 5% de plus grande que la valeur correspondante du pétrole-diesel. C'est encore les biodiesels de ricin, micro-algue et noix de coco qui se différencient considérablement des autres matières premières. La densité du biodiesel extrait de la noix de coco est plus petite que la norme ASTM (880 kg/m<sup>3</sup>), tandis qu'elle est acceptée par la norme EN (860-900 kg/m<sup>3</sup>), en revanche, les densités d'EM du ricin et micro-algue sont plus grandes que les deux normes.

La figure III.2 montre qu'il existe une forte corrélation de la densité avec l'indice de cétane d'ordre de (-91,7%) en ACP, ceci est bien figuré dans le cercle de corrélation de la figure III.2-

a. Cette dernière figure illustre aussi qu'il existe des corrélations négatives de la densité avec le point d'écoulement, le point trouble d'ordre respective de (-83,2% ; -83,8%). A partir de la figure III.3, on peut constater les même formations, la densité et le P Ecoule ayants un  $R^2=0,8377$ , aussi qu'il existe une corrélation entre la densité et l'indice diode avec un ordre de (85,1%) en ACP et  $R^2=0,8445$ . La densité augmente avec l'augmentation du nombre de doubles liaisons, ce qui signifie que plus l'huile d'origine est insaturée, plus la densité de l'ester méthylique est élevée et plus la masse de carburant qui sera injectée sera grande, si un moteur à calibrage diesel est alimenté par le biodiesel. Puisque l'indice de cétane est calculé en fonction de la densité du carburant et de la courbe de distillation [216], la corrélation négative signifie que si la densité est plus élevée résulte un indice de cétane plus bas. Enfin la densité et la longueur de la chaîne ont une corrélation avec  $R^2=0,73$ , aussi avec la température distillation TD-50% et TD-90% d'ordre (68,3% ; 60,2%).



**Figure III.3 :** Corrélations entre la densité et les propriétés physico- chimiques en Régression linéaire

### III.4.6. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique inférieure (PCI) et le pouvoir calorifique supérieure (PCS) sont des mesures de la chaleur de combustion d'un carburant, la différence entre eux, étant la chaleur de vaporisation de l'eau, qui est prise en considération par PCS. Le biodiesel contient en moyenne 10 à 12% en poids d'oxygène, ce qui entraîne une densité d'énergie et un pouvoir calorifique proportionnellement plus faibles. Il faut donc injecter plus de carburant (biodiesel) pour obtenir la même puissance du moteur. De nombreuses expériences ont démontrées que la diminution des émissions polluantes est liée à l'utilisation de biodiesel (ou d'autres biocarburants), cela est dû à l'existence d'oxygène dans la composition chimique du biocarburant (teneur plus élevée en oxygène du mélange air-biocarburant), ce qui résulte une bonne combustion du mélange (air-carburant) dans la chambre de combustion. Plus la teneur en oxygène est élevée, donc plus le pouvoir calorifique est basse, plus le potentiel de réduction des particules est élevé [217, 219, 228]. D'autre part, le fait d'injecter une plus grande masse de biodiesel pour obtenir la même puissance-moteur que le diesel conventionnel est responsable d'une augmentation des émissions de NOx dans les moteurs [223]

Des recherches antérieures ont montrées que la teneur en énergie des esters méthyliques d'acides gras est directement proportionnelle à la longueur de la chaîne (pour les acides gras purs) [229], alors que les EMAG avec un rapport C:O similaire, mais des rapports C:H inférieurs (plus d'hydrogène) présentent PCI. En conséquence, une teneur en énergie plus faible est obtenue à partir de niveaux d'insaturation progressivement supérieurs pour les esters méthyliques de longueur de chaîne similaire [230].

Dans les normes standards (ASTM-D975, EN-14214), il n'y a pas de spécification en ce qui concerne le pouvoir calorifique du biodiesel. Selon les valeurs présentées dans les tableaux III.1 et III.2, les 34 esters méthyliques étudiés présentent un PCI de 35,985 MJ/kg (pour le biodiesel le plus saturé, noix de coco) à 38,80 MJ/kg (pour l'un des moins saturés, poisson), avec un écart type de 0,549 et une valeur moyenne de 37,589 MJ/kg; ce chiffre est inférieur de 10 à 11% au PCI du pétrole-diesel (pratiquement le même pourcentage que la teneur en oxygène du biodiesel typique). Pour le PCS, il s'augmente de 38,985 MJ/kg (noix de coco) à 40,66 MJ/kg (algue), la valeur moyenne globale est de 40,065 MJ/kg.

La figure III.4 montre qu'il existe des corrélations entre le PCI et PCS avec le degré d'insaturation d'ordre (69,9% ; 73,3%) respectivement, on peut constater que l'augmentation de DI entraîne une augmentation modérée du pouvoir calorifique [226].



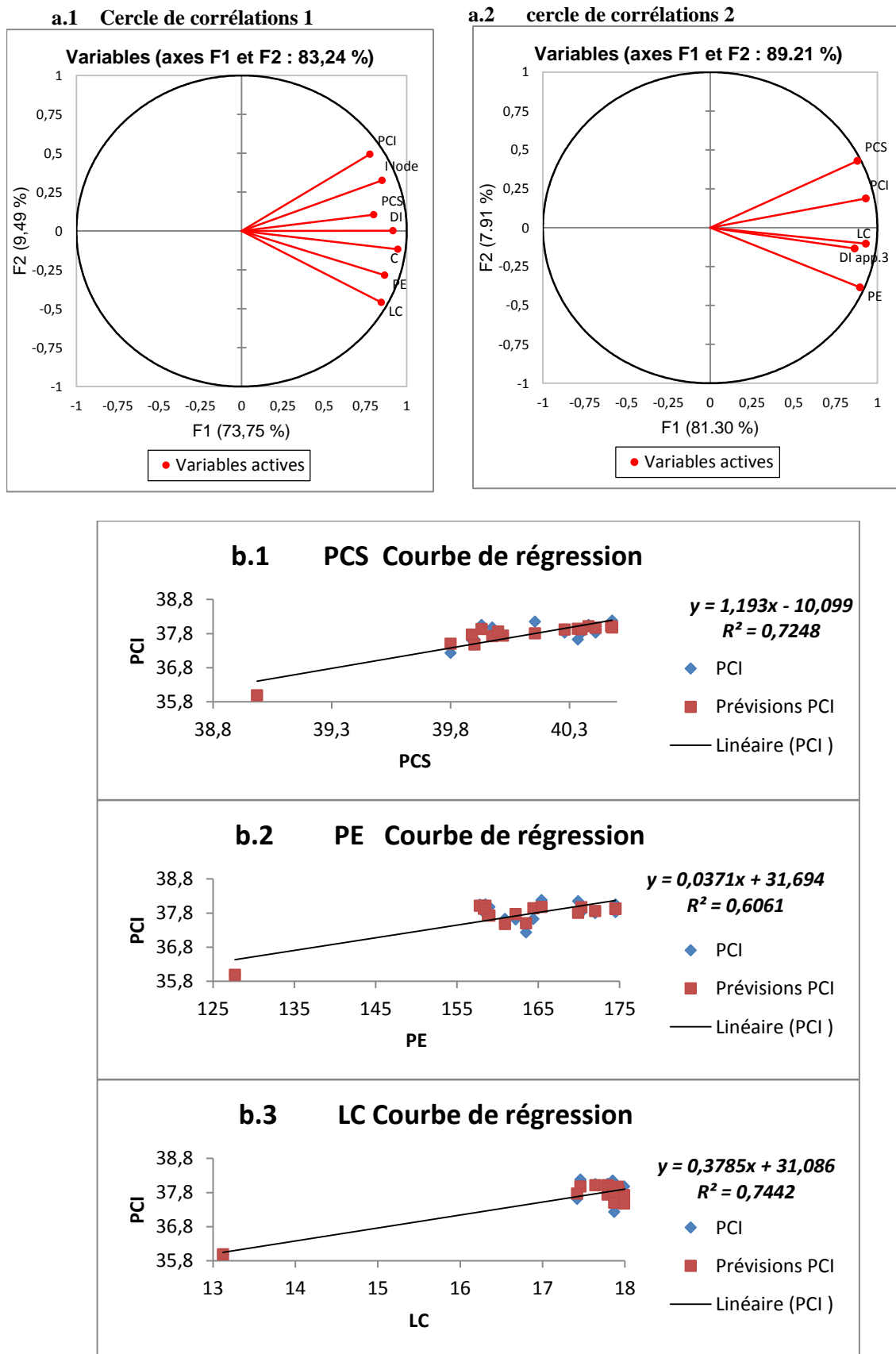


Figure III.4 : Corrélations entre PC et les propriétés physico-chimiques en ACP et Régression linéaire

A partir de la figure III.4.a, on peut constater aussi que la longueur de la chaîne est bien corrélée avec PCI et PCS d'ordre (86,3% ; 75,3%) respectivement, ces deux derniers sont bien corrélés avec la teneur en carbone ; l'indice d'iode ; et point d'éclair. Il convient toutefois de mentionner que : a) les huiles de poisson et la noix de coco présentent une grande disparité dans le nuage des points (figure III.5.-b) en raison du degré d'insaturation ; b) curieusement, le karanja semble se différencier beaucoup des autres valeurs en ce qui concerne le PCI.

La figure III.4.b illustre qu'il existe une corrélation entre PCI et PCS d'ordre ( $R^2=0,7248$ ) ce qui explique que PCI est calculé à partir de PCS, en plus il existe une corrélation entre PCI avec le point d'éclair d'ordre ( $R^2=0,6061$ ). Dans tous les cas, la lecture des valeurs et l'illustration graphique des résultats de la figure III.4 doivent être effectuées avec une grande prudence, car de nombreux chercheurs n'ont pas précisés quel pouvoir calorifique (PCI ou PCS) avait été mesuré [216], c'est-à-dire, on trouve juste pouvoir calorifique.

#### III.4.7. Viscosité cinématique

La viscosité est une mesure de la résistance d'un fluide qui se déforme sous l'effet d'un cisaillement ou d'une contrainte de traction. Dans le cas des combustibles liquides, plus la viscosité du fluide est moindre, plus sa facilité de circulation (fluidité) est grande. Dans un moteur diesel, une viscosité plus élevée conduit à un fonctionnement moins précis des injecteurs de carburant ; à une atomisation plus faible de la pulvérisation de carburant ; à une augmentation du diamètre moyen des gouttelettes de carburant et du temps de rupture du jet, ces insuffisances sont exagérées lors des démarrages à froid. En outre, les pertes de fuite de carburant réduites dans la pompe à carburant en raison d'une viscosité cinématique plus élevée entraînent également des pressions d'injection plus élevées, par conséquent, la masse de carburant injecté [231].

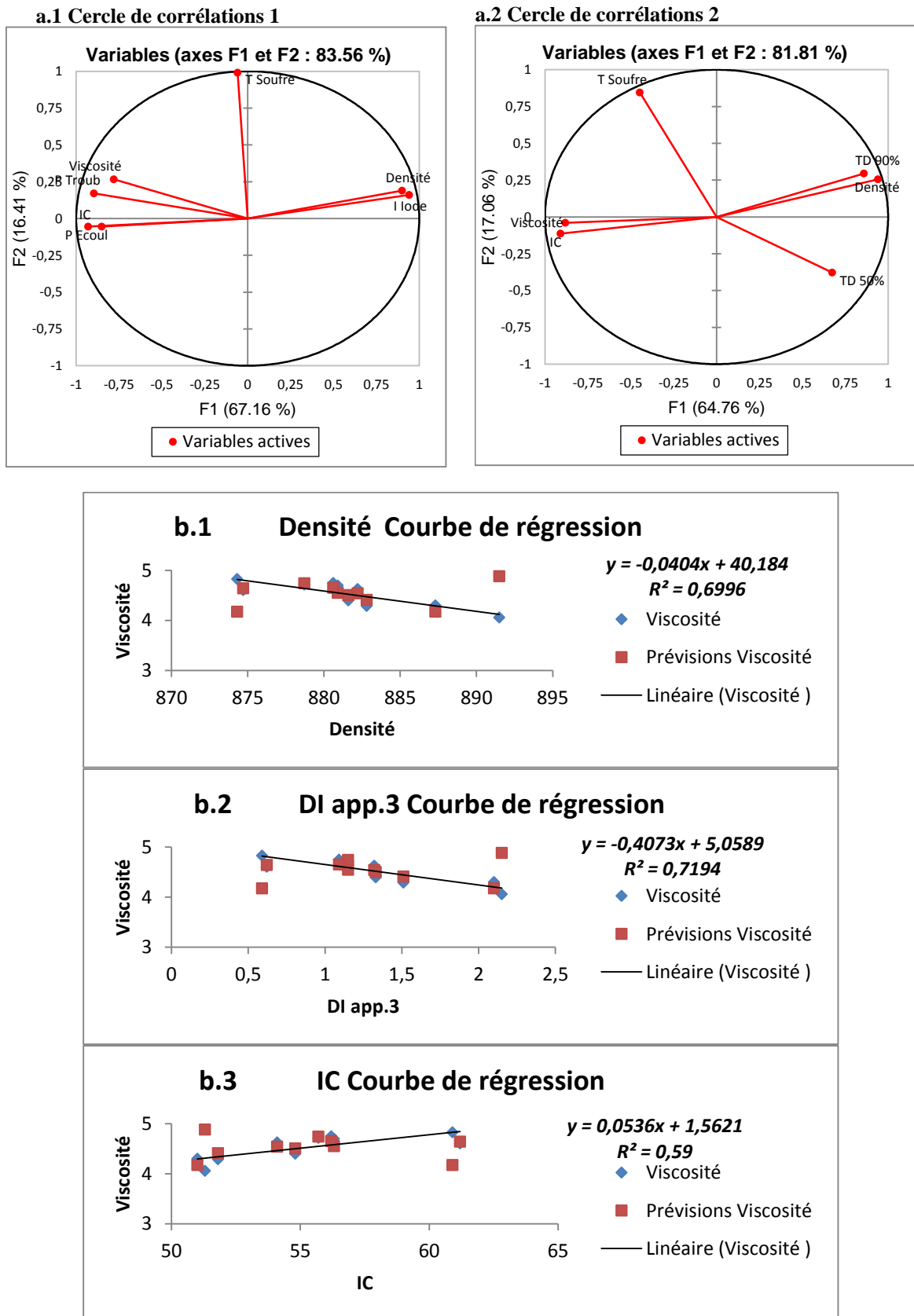
Les huiles végétales ont une viscosité élevée (un ordre de grandeur supérieur aux valeurs acceptables pour le carburant diesel), ce qui signifie qu'elles ne peuvent pas être utilisées en tant que carburants dans un moteur à allumage par compression, du moins pas sans chauffage préalable (la viscosité décroît de manière exponentielle à mesure que la température augmente), et seulement pour des rapports de mélange relativement faibles. Le processus de transestérification, en revanche, réduit considérablement la viscosité d'EMAG à des niveaux comparables du pétrole-diesel.

Les valeurs de viscosité des 34 matières premières examinées, vont de 2,78 mm<sup>2</sup>/s (noix de coco, en fait, c'est le seul des esters méthyliques étudiés avec une viscosité cinématique très proche de celle du diesel fossile) à 14,52 mm<sup>2</sup>/s (ricin), la valeur moyenne de toutes les matières étant de 4,771 mm<sup>2</sup>/s. Les spécifications EN prescrivent une plage de viscosité acceptable pour le biodiesel comprise entre 3,5 et 5 mm<sup>2</sup>/s, ce qui signifie que ce sont les deux extrêmes mentionnés ci-dessus (mais aussi légèrement les EMs d'olive ; mahua ; karanja ; algue ; micro-algue) qui doivent être exclus sous forme B100. Aux normes ASTM, au contraire, la plage spécifiée est beaucoup plus large (1,9 à 6 mm<sup>2</sup>/s), ce qui rend les 33 matières premières analysées acceptables, sauf le ricin. Le biodiesel de ricin est riche en acide ricin-oléique (contient -OH) qui augmente considérablement la viscosité de l'ester final. La viscosité cinématique moyenne EM de ricin est de 14,5 mm<sup>2</sup>/s, soit presque trois fois supérieure à celle de la majorité des EMs indiquées dans le tableau III.1.

La figure III.5 illustre qu'il existe une corrélation négative entre la viscosité cinématique et la densité d'ordre de (-71,8%) avec un coefficient de régression R<sup>2</sup>=0,6996. A partir de la figure III.5, on peut observer aussi qu'une interdépendance existe entre la viscosité cinématique et la température de distillation TD-90% d'ordre (-71,6%), en plus, il existe une corrélation (moins forte) entre la viscosité cinématique et l'indice de cétane d'ordre de (63,2%) avec R<sup>2</sup>=0,59, en plus des corrélations négatives de la viscosité et l'indice iode d'ordre (-82,1%) en ACP et entre le degré d'insaturation avec R<sup>2</sup>=0,7194. Bien que l'existence de doubles liaisons réduise la viscosité, il a été démontré que, ce sont en réalité les doubles liaisons cis qui sont davantage responsables des viscosités inférieures à leurs homologues les doubles liaisons Trans (ces dernières se trouvent généralement dans les huiles de cuisson usagées) [217]. La viscosité augmente avec l'augmentation de la longueur de la chaîne [228], alors que la ramification semble jouer un rôle secondaire [217]. Bien que la majorité des EMs examinés aient une longueur de chaîne comprise entre 17 et 18 atomes de carbone (et qu'ils ont en fait des viscosités comparables, sauf le ricin), l'EM de noix de coco, est le seul biodiesel qui se différencie radicalement en ce qui concerne nombre d'atomes de carbone (13,12), sans surprise également qu'il présente la plus basse viscosité [216].

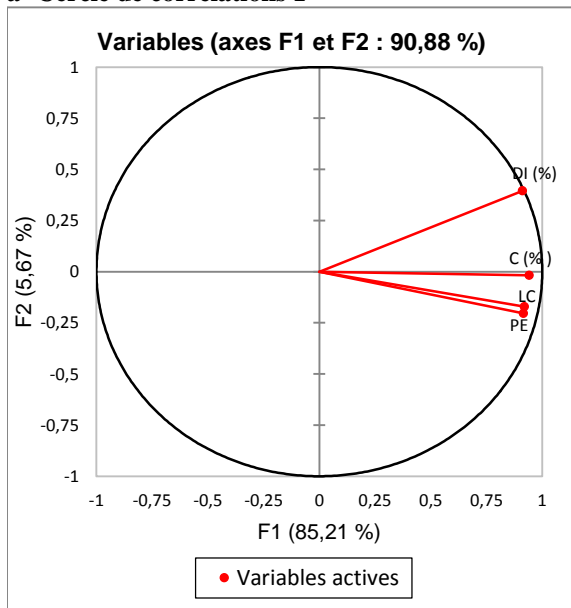
#### III.4.8. Point d'éclair

Le point d'éclair (PE) est une mesure de la température à laquelle un carburant doit être chauffé de manière à ce que le mélange vapeur du carburant et d'air puisse s'enflammer ; Le PE varie inversement avec la volatilité du carburant.

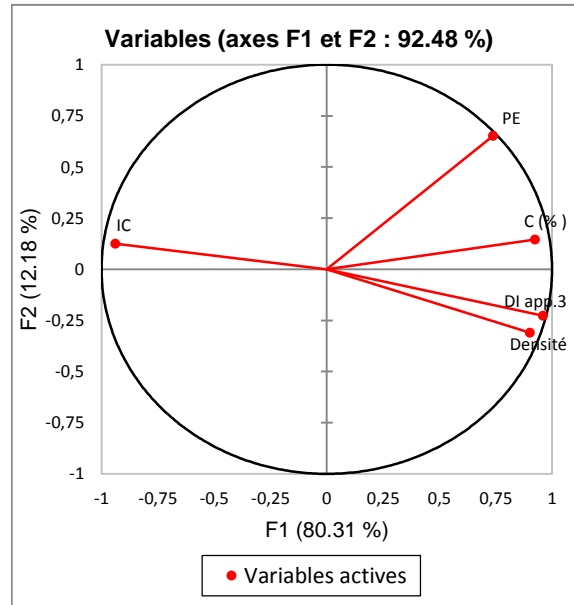


**Figure III.5 :** Cercles de corrélations de la viscosité cinématique et les propriétés physico-chimiques en ACP et Régression linéaire

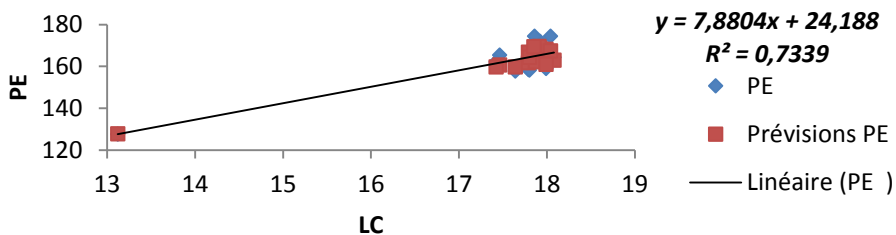
a- Cercle de corrélations 1



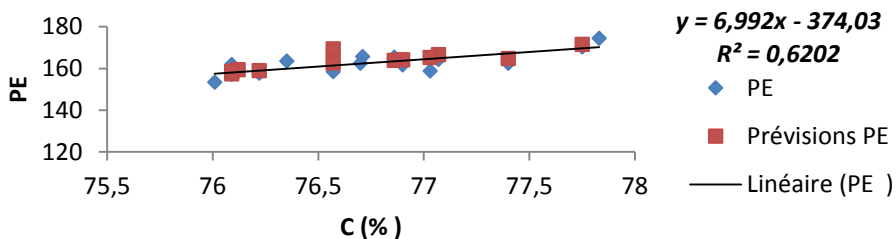
a.2 Cercle de corrélations 2



b.1 LC Courbe de régression



b.2 C (%) Courbe de régression



b.3 Densité Courbe de régression

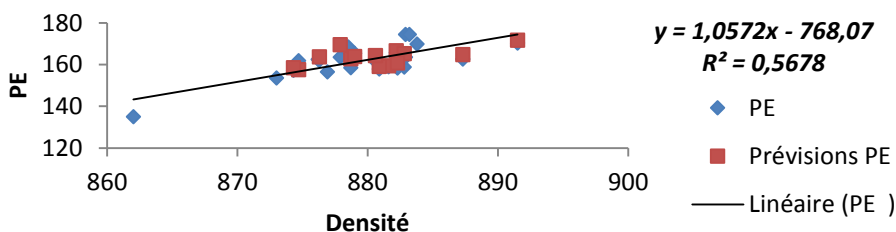


Figure III.6 : Corrélations entre le PE et les propriétés physico-chimiques en ACP et Régression linéaire

Comme indiqué précédemment, le stockage de biodiesel pur est beaucoup plus sûr que le diesel standard, cela est dû au point éclair plus élevé d'esters méthyles acide gras. À cet égard, les valeurs du point éclair pour les 34 matières premières examinées dans la présente étude (tableau III.1) vont de 95 °C (pour EM de micro-algue) à 174,5 °C (EM d'arachide), la valeur moyenne de toutes les matières premières étant 157,015 °C avec un écart type de 16,58 (tableau III.2). Selon les spécifications européennes, les carburants biodiesels doivent avoir un point d'éclair au moins de 101 °C, alors qu'aux États-Unis, est plus élevé au minimum de 130 °C. Donc toutes les matières premières de biodiesel étudiées respectent les deux normes (EN, ASTM), sauf la micro-algue et l'EM de la noix de coco, qui est acceptable que par la norme EN.

Bien que le point d'éclair dépende, en général, de l'huile d'origine, il n'est pas directement lié à la composition en acides gras [33], et cela est figuré sur la figure III.6 et III.4 qui illustrent des corrélations entre le point d'éclair et le degré d'insaturation ; la longueur de la chaîne ; et la densité d'ordre (76,3% ; 85,7% ; 65,4%) respectivement en ACP. Une corrélation observée entre PE et la teneur en carbone d'ordre (72%), aussi des corrélations entre PE et les deux pouvoirs calorifiques (PCI et PCS) d'ordre (77,9% ; 63,9%). Les figures III.6-b illustre que la noix de coco est dispersée des autres matières première, cela est dû à son faible PE (la tendance remarqué que le nombre de doubles liaisons 'DI' et PC), la noix de coco est moins insaturée entre les 34 matières analysées.

#### **III.4.9. Propriétés d'écoulement à basse température**

Les principales propriétés d'écoulement pour la spécification de carburant d'hiver sont le point d'écoulement (PEoul) et le point trouble (PT). Le point de trouble (PT) est la température la plus basse dont à l'apparition des particules solides. Elle est mesurée en tant que température de la première formation des particules solides lorsque le carburant est refroidi. Le point d'écoulement (PEcoul) est la température la plus basse à laquelle le carburant devient semi-solide et perd ses caractéristiques de débit qui ne sont plus pompable ; c'est donc une mesure du point de gélification du carburant. Le point d'écoulement est toujours inférieur au point trouble. Le point de trouble n'est généralement pas affecté par des additifs appelés agents améliorant le flux. Cependant, les additifs améliorant le flux peuvent diminuer la taille ou empêcher la formation de cristallites formées lors du refroidissement du carburant, et abaisser ainsi la température à laquelle la formation des particules solides devient un problème [28].

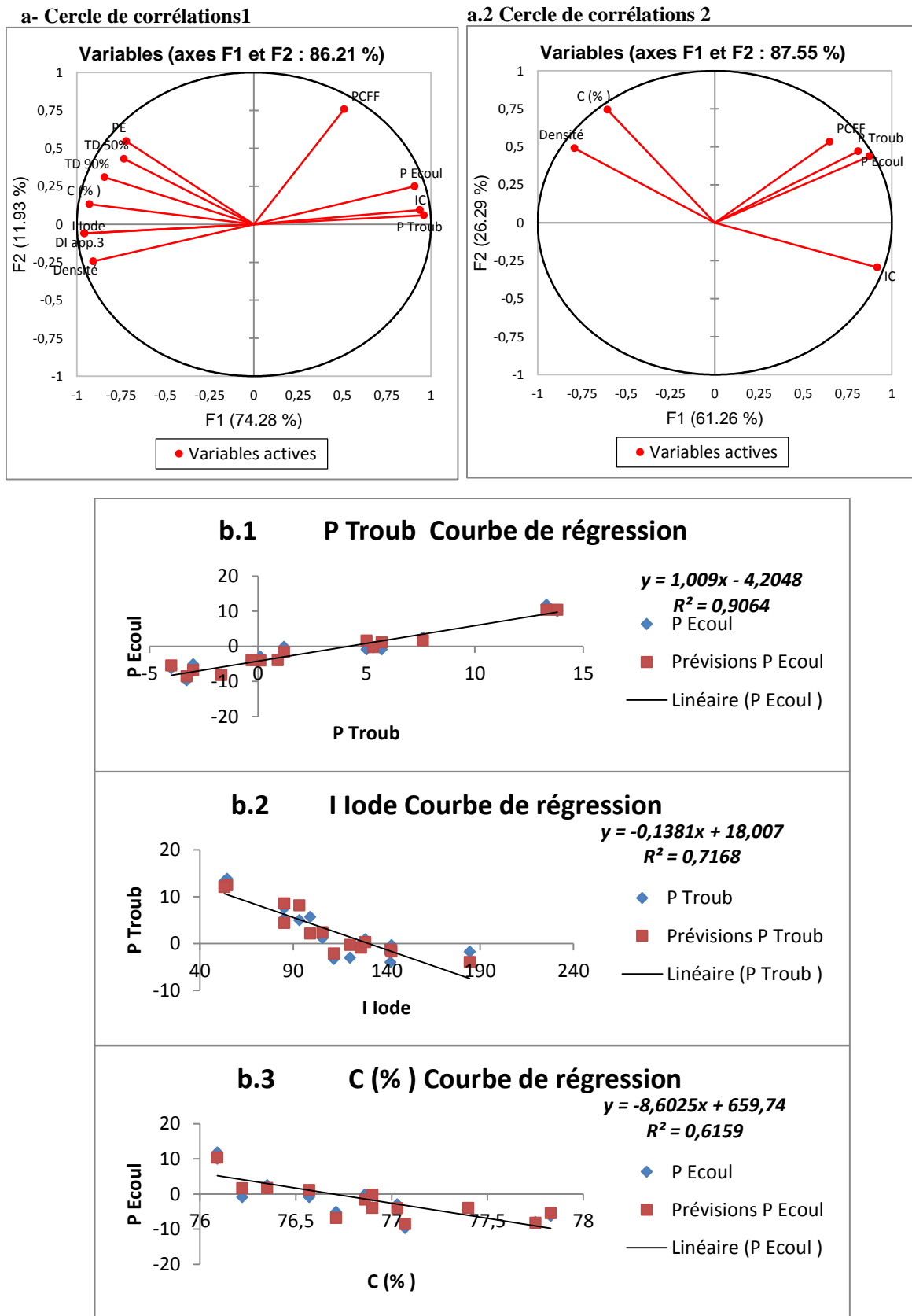


Figure III.7 : Corrélations entre les PEBT et les propriétés physico- chimiques en ACP et Régression linéaire

De mauvaises propriétés de débit à froid peuvent entraîner un blocage de la conduite de carburant et de la pompe, entraînant une panne de circulation de carburant. Ces problèmes sont particulièrement aggravés lors des démarrages à froid, en particulier à basses températures ambiantes. Les deux propriétés d'écoulement à froid sont fortement interdépendantes, comme l'illustre la figure III.7.b, qui décrit une forte corrélation d'ordre de (96,7% en ACP, Avec  $R^2=0,9064$ ) entre le PEcoule et le PT.

Il n'y a pas de spécifications européennes EN concernant les propriétés d'écoulement à basse température (PEBT), chaque pays est libre de déterminer ses propres limites en fonction des conditions météorologiques locales, mais il est bien connu que l'un des inconvénients des biodiesels par-rapport au pétrole-diesel est la propriété d'écoulement à froid. La norme ASTM-D97 exige que le PEcoule soit de  $-15$  à  $-16$  °C, et le PT est de  $-3$  à  $-12$  °C (ASTM-D2500), pratiquement cette norme élimine la majorité EMAG purs, beaucoup de chercheurs préfèrent d'ajouter des additives (éco-solvant). Les valeurs de PT pour les 34 matières premières examinées dans le présent travail vont de  $-15,1$  °C (EM ricin) à  $16,1$  °C (EM micro-algue), la valeur moyenne de toutes les matières premières étant de  $2,516$  °C. Pour le PEcoule, il est de  $-23,4$  °C (EM ricin) jusqu'à  $11,8$  °C (EM palme), avec une valeur moyenne globale de  $-2,371$  °C. Alors que, les valeurs du point de colmatage du filtre à froid (PCFF) vont de  $-16$  °C (EM graine de colza) à  $16,3$  °C (EM d'arachide) avec un moyenne de  $-0,904$  °C. En dehors de (suif ; palme ; arachide ; saindoux), d'autres matières avec de moins mauvaises PEBT sont (son de riz ; karanja ; poulet ; mahua ; neem), alors que les meilleurs biodiesels à cet égard sont (ricin ; canola ; colza ; carthame ; croton ; graines de lin ; maïs ; olives).

En général, les acides saturés présentent des points de congélation (PEcoule, PT) plus élevés que les acides insaturés. Il semble donc que pour les points de congélation, la structure chimique soit très influent [28]. Les figures III.6 et III.2 illustrent des fortes corrélations entre le PT avec l'IC ; le DI ; teneur en carbone et la densité d'ordre ( $92,7\%$  ;  $-85,8\%$  ;  $-88,4\%$  ;  $-78,1\%$ ) respectivement. Le point d'écoulement représente à leur-tour des corrélations plus fortes avec les trois propriétés précédentes (IC, DI, C%, Densité) d'ordre ( $88\%$  ;  $-81,8\%$  ;  $-81,3\%$  ;  $-79,3\%$ ) respectivement (figure III.7.a1). En plus des corrélations de PT et PEcoule sont illustrées avec la température distillation TD-90 d'ordre ( $-59,3\%$  ;  $-64,7\%$ ). En fait, Imahara et al. [232] développant un modèle de prédiction pour estimer le PT du biodiesel à partir de diverses graisses / huiles, a fait démontrer que le PT est déterminé principalement par la quantité d'esters saturés et ne dépend pas de la composition des esters insaturés.



Particulièrement en ce qui concerne le point trouble, les EMs (ricin, croton, poissons, mahua, et neem) se différencient beaucoup des autres valeurs. Ce sont les mêmes ME qui présentent également l'écart type le plus élevé du tableau III.2, ce qui signifie qu'il faut classer les valeurs de PT et de PE<sub>cou</sub> pour obtenir une représentation plus précise. Comme dans le cas des propriétés examinées précédemment, aucune corrélation avec la longueur moyenne de la chaîne n'a pu être établie, bien qu'il soit connu que pour des esters purs, la réduction de la longueur de la chaîne améliore les propriétés d'écoulement à froid [28, 233].

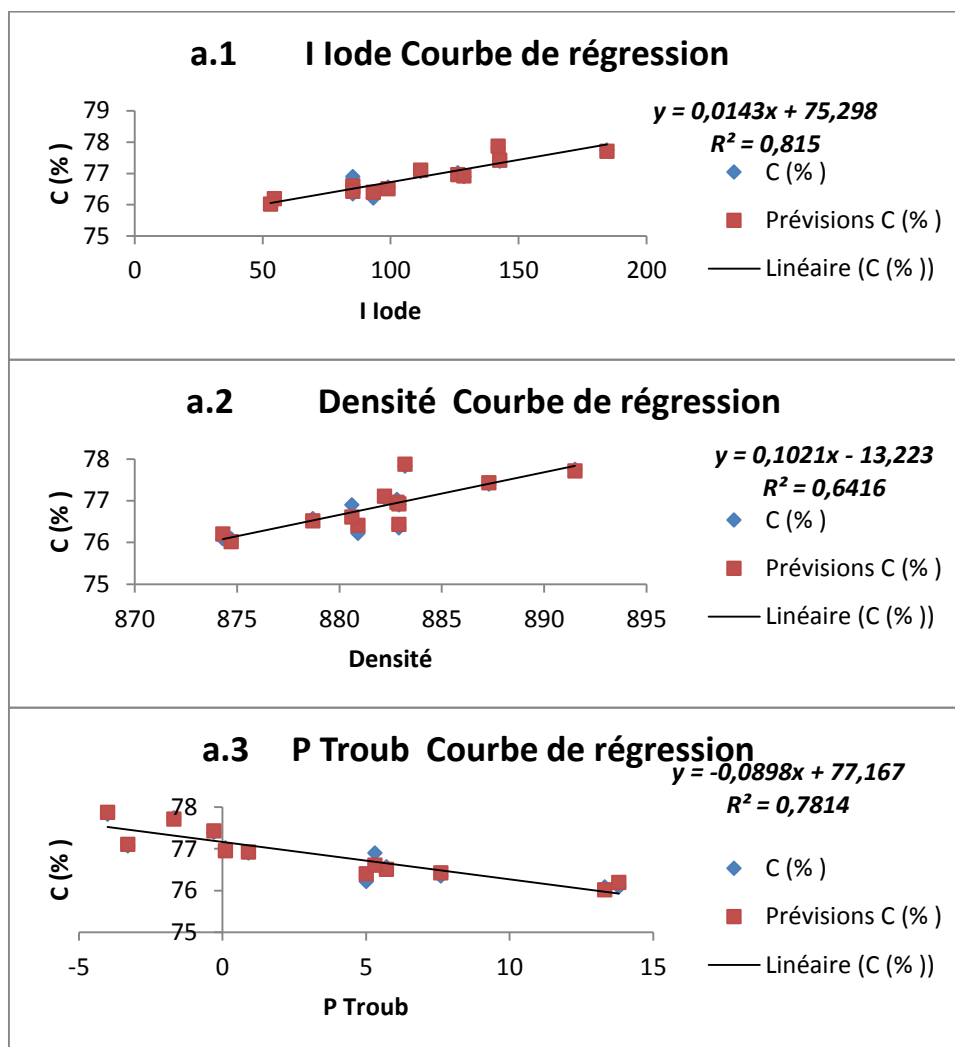
Afin d'améliorer les propriétés d'écoulement à froid de biodiesel, différentes mesures ont été suggérées, tels que l'utilisation d'améliorants à d'écoulement froid [234]. Une estérification éthylique ou iso-propylique (un coût plus élevé que l'utilisation de méthanol) ; l'élimination des composants qui ont des points de fusion élevés (ex. stéarique et palmitique) ; ou même une modification de la composition en acides gras de l'huile d'origine ester avec des caractéristiques optimales (des inquiétudes se posent dans ce cas concernant la modification génétique) [211, 229, 233].

#### III.4.10. Teneur en carbone

Le carbone est l'un des propriétés chimiques le plus important, il est mesuré en teneur ou en nombre d'atomes. Pour les 34 EMAG analysés, la valeur la plus élevée est EM de micro-algue (78,41%), ainsi que la valeur la plus basse est de EM de la noix de coco (72,75%) avec une valeur moyenne de 76,672% (tableau III.2). Après l'analyse descriptive, la figure III.7-a montre que la teneur en carbone a des fortes corrélations avec la densité ; l'indice d'iode ; et le degré d'insaturation d'ordre (80,1% ; 90,3% ; 89,6%) respectivement. Il semble que plus l'insaturation de la matière première d'origine est élevée, plus la teneur en carbone est élevée (figure III.7.a.1), même si les différences absolues sont faibles. Néanmoins, aucune corrélation de ce type n'a pu être établie pour la teneur en hydrogène ou oxygène. Outre, de la figure III.7, III.6 et une corrélation d'ordre (70,3%) a été remarquée entre la teneur en carbone et le PE avec  $R^2=0,6203$ . La figure III.8 illustre que la teneur en carbone a des corrélations positives avec la densité et l'II et négative avec P Toub avec  $R^2$  (0,6416 ; 0,815 ; 0,7814) respectivement.

#### III.4.11. Température distillation

La distillation est une méthode de séparation des mélanges basée sur les différences de volatilité des composants dans un mélange liquide bouillant. La spécification de température de distillation a été apparue pour garantir que les carburants n'ont pas été contaminés par des matériaux à haut point d'ébullition tels que l'huile de moteur usagée.

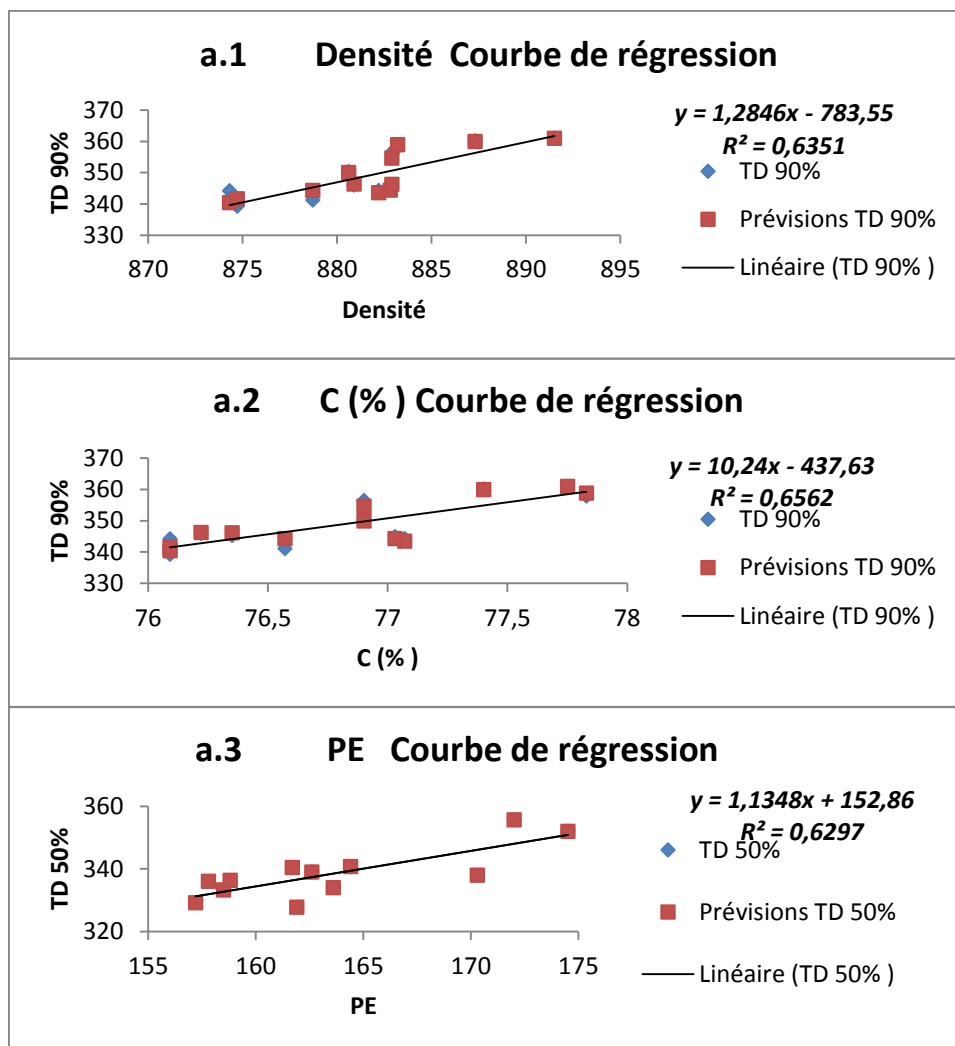


**Figure III.8 :** Corrélations entre la teneur de carbone et les propriétés physico-chimiques

Par conséquent, la distillation du biodiesel est une méthode qui fournit en fait une démonstration de la qualité d'EMAG [146]. En fait, dans les cas où des températures de distillation basses ont été signalées, celles-ci étaient en fait combinées à un faible indice de cétane et point d'éclair, indiquant des quantités résiduelles élevées de méthanol et/ou de glycérol [216].

Les valeurs rapportées dans la littérature correspondent à la température de distillation initiale, 10%, 50%, 90%, et finale. Dans la présente étude que la température distillation 50% (TD-50%) et 90% (TD-90%) seront considérées (tableau III.1), pour lequel une quantité relativement importante de valeurs rapportées est disponible pour TD-90% 17 / 34 des esters méthyliques, et pour TD-50% 15 / 34 des EMs (en général, la température de distillation n'a pas reçu une grande attention dans la littérature). Il n'y a pas de spécifications EN pour la

température distillation du biodiesel, alors qu'aux ASTM, une limite maximum de 360 °C (ASTM-D1160) est imposée pour la TD-90%.



**Figure III.9 :** Corrélation entre la température distillation et les propriétés physico-chimiques

Les valeurs de TD-90% de la présente étude varient de 337 °C (EM saindoux 'porc') à 381,6 °C (EM ricin), la valeur moyenne de toutes les matières premières étant de 350,565 °C, en outre les valeurs de TD-50% varient de 327,7 °C (EM palme) à 355,7 °C (EM tournesol) avec une moyenne de 338,687 °C (tableau III.2). Par conséquent, seules les EMs de graines de lin et de poisson pourraient être marginalement rejetées sur la base des spécifications américaines, l'EM de ricin est aussi rejeté par la norme ASTM. La figure III.9 illustre une corrélation positive entre TD-90% avec la densité et la teneur en carbone d'ordre ( $R^2 = 0,6351$  ;  $0,6561$ ), en plus une corrélation entre TD-50% et PE avec  $R^2 = 0,6297$ . Dans la littérature, il a été confirmé que les températures distillation dépendent en général de la longueur de la chaîne mais avec une faible dépendance à l'insaturation [28,236]. Les données figurées dans la figure

III.7.a de cercle de corrélations, indiquent que l'augmentation du nombre de doubles liaisons augmente également la température de distillation avec (57% ; 85,9%) pour TD-50% et TD-90% respectivement, ceci est remarqué pour les matières premières hautement insaturées, telles que le ricin ; les graines de lin ; et les poissons. La figure III.9 montre aussi que TD-90% et TD-50% ont des corrélations négatives avec l'indice de cétane (-75,6% ; -71,5%) ; le point d'écoulement (-59,3% ; -65,4%) ; et le point trouble d'ordre (-64,7% ; -71%) respectivement.

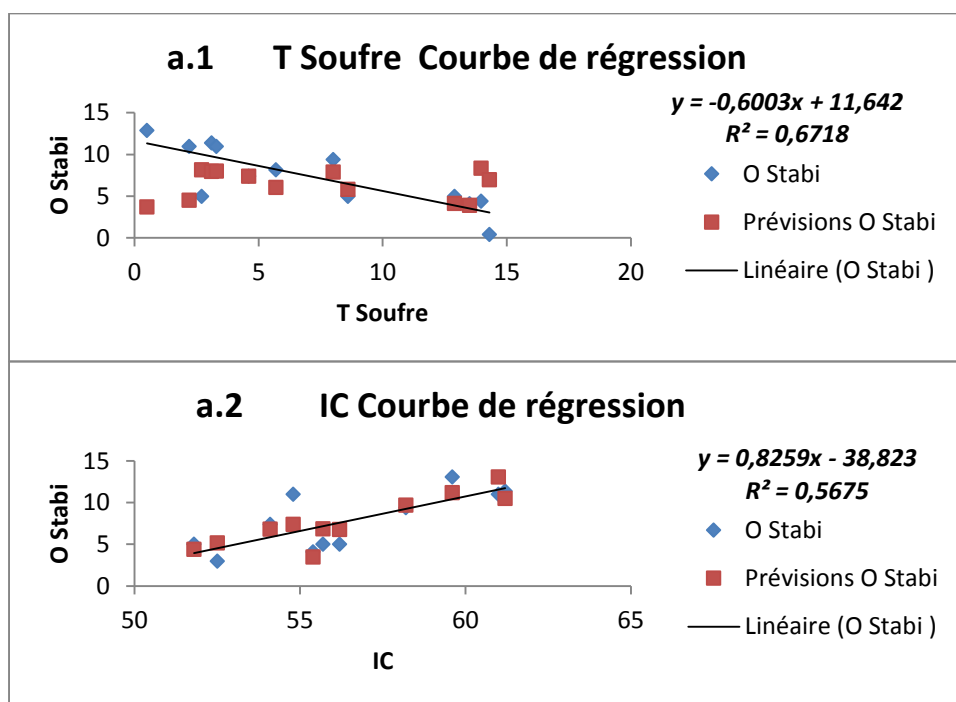
#### III.4.12. Stabilité d'oxydation

L'un des principaux problèmes qui limitent l'utilisation du biodiesel comme carburant dans les moteurs à allumage par compression est sa mauvaise stabilité à l'oxydation. Le tableau III.1 révèle que seuls quelques-uns des biodiesels étudiés satisfont la spécification européenne de stabilité à l'oxydation (6 h), en utilisant la méthode Rancimat (EN 14112). Les spécifications américaines sont également plus clémentes dans ce cas (3 h), ce qui permet d'approuver le biodiesel produit à partir de matières premières telles que (le maïs ; la noix de coco ; le poisson ; le jatropha ; Karanja ; soja ; cuisson usagées). Dans tous les cas, comme cela a été mentionné précédemment, la stabilité à l'oxydation (SO) doivent être interprétés avec prudence car de nombreux chercheurs ont utilisés des additifs ou n'ont pas appliqués les mêmes conditions de nettoyage ou de stockage d'estérification, tous dont in fluent considérablement les valeurs d'oxydation.

En général, ce sont les esters méthyliques polyinsaturés tels que (croton ; carthame ; soja ; graines de lin ; le tournesol), riches en acides linoléiques et linoléiques, qui sont sujettes à la dégradation oxydative [211, 233]. Au contraire, les acides gras saturés tels que la noix de coco, le palmier et les graisses animales sont oxydative-ment plus stables. Le processus d'oxydation est encore amélioré par des facteurs tels que la présence d'air e /ou de métaux et des températures de stockage élevées. L'auto-oxydation des composés gras insaturés se procède à des taux différents selon le nombre et la position des doubles liaisons. Les positions CH<sub>2</sub> allyliques à doubles liaisons dans les chaînes d'acides gras sont celles susceptibles à l'oxydation. Les positions bis-allyliques des acides gras polyinsaturés, tels que l'acide linoléique (doubles liaisons en C-9 et C-12, donnant une position bis-allylique en C-11) et l'acide linoléique (doubles liaisons en C-9, C-12 et C-15, donnant deux positions bis-allyliques en C-11 et C-14), sont encore plus sujettes à l'auto-oxydation que les positions allyliques [237]. Cependant, le degré d'insaturation n'est pas la seule variable affectant la stabilité à l'oxydation. La présence d'eau et d'autres composés dérivés soit de la contamination

externe ou d'une dégradation thermique (les deux derniers étant plus probables dans le cas des huiles utilisées pour la cuisson) peut également favoriser l'oxydation. De plus, la réduction des antioxydants naturels lorsque l'huile est soumise à un processus de friture contribue à la stabilité d'oxydation plus faible des esters d'huiles de cuisson usagées [238].

Le ricin est une matière première prometteuse en termes de stabilité à l'oxydation qui a été mesurée par de nombreux chercheurs, il présente des valeurs de stabilité d'oxydation élevées (même de l'ordre de dizaines d'heures). Ceci est très probablement associé au fait que l'huile de ricin extraite à froid a une teneur relativement élevée en antioxydants naturels [236]. Une autre alternative prometteuse a été proposée par Sarin et al. [239], qui ont constatés que la stabilité à l'oxydation d'EM de jatropha peut être améliorée par le mélange avec l'EM de palme. Deux corrélations entre la stabilité d'oxydation avec la teneur en soufre ( $R^2=0,6718$ ) et l'indice de cétane ( $R^2=0,5675$ ), sont figurées dans de la figure III.10.



**Figure III.10 :** Corrélations entre la stabilité d'oxydation et la teneur en soufre et IC

Le tableau III.3 présente la matrice de corrélation génératrice des esters méthyles de (colza, jatropha, HFU, soja, suif de bœuf, palme), ces matières sont représentées dans le tableau III.1 sans données manquantes.

Tableau III.3 : Matrice de corrélation des 34 matières premières (Coefficient de corrélation de Pearson)

Varia	IC	Densité	PCI	PCS	Visco	PE	P Eco	P Tro	PCFF	O Sta	I Acid	T Sou	TD90	T50	C (%)	O (%)	H (%)	I Iode	LC	DI 3
IC	<b>1</b>																			
Densité	<b>-0.967</b>	<b>1</b>																		
PCI	<b>-0.751</b>	<b>0.714</b>	<b>1</b>																	
PCS	<b>-0.272</b>	<b>0.163</b>	<b>0.286</b>	<b>1</b>																
Visco	<b>0.643</b>	<b>-0.568</b>	<b>-0.119</b>	<b>0.036</b>	<b>1</b>															
PE	<b>-0.159</b>	<b>0.362</b>	<b>-0.038</b>	<b>0.058</b>	<b>-0.056</b>	<b>1</b>														
P Eco	<b>0.895</b>	<b>-0.928</b>	<b>-0.719</b>	<b>-0.457</b>	<b>0.338</b>	<b>-0.428</b>	<b>1</b>													
P Tro	<b>0.929</b>	<b>-0.960</b>	<b>-0.630</b>	<b>-0.383</b>	<b>0.512</b>	<b>-0.455</b>	<b>0.978</b>	<b>1</b>												
PCFF	<b>0.884</b>	<b>-0.941</b>	<b>-0.727</b>	<b>-0.383</b>	<b>0.339</b>	<b>-0.505</b>	<b>0.991</b>	<b>0.973</b>	<b>1</b>											
O Sta	<b>0.055</b>	<b>0.031</b>	<b>-0.227</b>	<b>0.032</b>	<b>-0.317</b>	<b>0.696</b>	<b>0.008</b>	<b>-0.084</b>	<b>-0.079</b>	<b>1</b>										
I Acid	<b>-0.152</b>	<b>0.171</b>	<b>0.586</b>	<b>-0.505</b>	<b>0.178</b>	<b>-0.315</b>	<b>-0.003</b>	<b>0.072</b>	<b>-0.057</b>	<b>-0.369</b>	<b>1</b>									
T Sou	<b>0.360</b>	<b>-0.434</b>	<b>0.172</b>	<b>0.179</b>	<b>0.775</b>	<b>-0.605</b>	<b>0.252</b>	<b>0.428</b>	<b>0.311</b>	<b>-0.739</b>	<b>0.356</b>	<b>1</b>								
TD90	<b>-0.374</b>	<b>0.505</b>	<b>0.425</b>	<b>-0.511</b>	<b>0.083</b>	<b>0.107</b>	<b>-0.385</b>	<b>-0.348</b>	<b>-0.419</b>	<b>-0.452</b>	<b>0.647</b>	<b>0.086</b>	<b>1</b>							
TD50	<b>-0.771</b>	<b>0.893</b>	<b>0.678</b>	<b>0.056</b>	<b>-0.181</b>	<b>0.519</b>	<b>-0.890</b>	<b>-0.860</b>	<b>-0.921</b>	<b>-0.050</b>	<b>0.282</b>	<b>-0.236</b>	<b>0.723</b>	<b>1</b>						
C (%)	<b>-0.936</b>	<b>0.993</b>	<b>0.710</b>	<b>0.139</b>	<b>-0.485</b>	<b>0.413</b>	<b>-0.938</b>	<b>-0.956</b>	<b>-0.955</b>	<b>0.010</b>	<b>0.191</b>	<b>-0.398</b>	<b>0.571</b>	<b>0.938</b>	<b>1</b>					
O (%)	<b>0.641</b>	<b>-0.801</b>	<b>-0.438</b>	<b>0.356</b>	<b>0.337</b>	<b>-0.555</b>	<b>0.652</b>	<b>0.692</b>	<b>0.719</b>	<b>-0.102</b>	<b>-0.348</b>	<b>0.484</b>	<b>-0.791</b>	<b>-0.890</b>	<b>-0.841</b>	<b>1</b>				
H (%)	<b>0.920</b>	<b>-0.984</b>	<b>-0.652</b>	<b>-0.171</b>	<b>0.550</b>	<b>-0.519</b>	<b>0.927</b>	<b>0.964</b>	<b>0.955</b>	<b>-0.185</b>	<b>-0.094</b>	<b>0.526</b>	<b>-0.455</b>	<b>-0.902</b>	<b>-0.984</b>	<b>0.826</b>	<b>1</b>			
I Iode	<b>-0.993</b>	<b>0.944</b>	<b>0.728</b>	<b>0.377</b>	<b>-0.649</b>	<b>0.158</b>	<b>-0.902</b>	<b>-0.936</b>	<b>-0.882</b>	<b>-0.028</b>	<b>0.056</b>	<b>-0.358</b>	<b>0.273</b>	<b>0.727</b>	<b>0.908</b>	<b>-0.565</b>	<b>-0.901</b>	<b>1</b>		
LC	<b>-0.862</b>	<b>0.872</b>	<b>0.758</b>	<b>0.509</b>	<b>-0.221</b>	<b>0.277</b>	<b>-0.977</b>	<b>-0.926</b>	<b>-0.948</b>	<b>-0.200</b>	<b>0.052</b>	<b>-0.055</b>	<b>0.414</b>	<b>0.855</b>	<b>0.886</b>	<b>-0.561</b>	<b>-0.843</b>	<b>0.872</b>	<b>1</b>	
DI 3	<b>-0.998</b>	<b>0.971</b>	<b>0.752</b>	<b>0.292</b>	<b>-0.643</b>	<b>0.206</b>	<b>-0.906</b>	<b>-0.940</b>	<b>-0.900</b>	<b>0.000</b>	<b>0.132</b>	<b>-0.388</b>	<b>0.349</b>	<b>0.777</b>	<b>0.941</b>	<b>-0.645</b>	<b>-0.934</b>	<b>0.993</b>	<b>0.864</b>	<b>1</b>

### III.5. Conclusion

À partir des données collectées, 34 matières premières utilisées pour la production du biodiesel ont été étudiées, des valeurs moyennes et des écarts-types ont été représentées pour toutes les propriétés physico-chimiques d'acides gras d'huiles / graisses. Les propriétés les plus importantes liées aux matières premières du biodiesel ont été discutées, leurs corrélations positives ou négatives ont été éventuellement interprétées. De plus, elles étaient corrélées les unes sur les autres en fonction de coefficient de corrélation de Pearson (plus de 60%) et de coefficient de régression, sous forme des cercles de corrélations en ACP et des nuages des points régression linéaire. Il est à noter que, *la corrélation mesure l'intensité de la liaison entre des variables, tandis que la régression analyse la relation d'une variable par rapport à une ou plusieurs autres*. Une forte corrélation positive signifie que les deux propriétés portent la même information afin que l'une d'elles puisse remplacer l'autre, tandis que la corrélation négative signifie que les deux propriétés portent des informations contradictoires, c'est-à-dire que si l'une d'elles augmente l'autre diminue et vice versa.

Dans l'étude, des propriétés chimiques (degré d'insaturation ; longueur de la chaîne ; l'indice d'iode ; l'indice d'acide ; oxydation stabilité ; teneur en carbone, oxygène, hydrogène, soufre), physiques (densité ; viscosité ; point éclair ; PE<sub>coul</sub> ; PT ; PCFF ; température distillation) ; et des propriétés liées à la combustion (indice de cétane ; pouvoir calorifique) ont été corrélées les unes sur les autres. Enfin, la densité ; la viscosité ; l'indice de cétane ; le pouvoir calorifique ; et le point d'éclair, ont été choisies comme composantes (propriétés) principales. Ces composantes peuvent porter la majorité des informations des autres propriétés physico-chimiques (Tableau III.3).

# **Chapitre IV : L'influence des propriétés des biodiesels sur le fonctionnement des moteurs**



## IV.1. Introduction

Le biodiesel est un carburant alternatif biodégradable extrait d'une diversité de matières premières. Ces matières premières ont montrées des variations prometteuses de leurs propriétés physico-chimiques en raison de leurs compositions d'acides gras. Cette variation des propriétés affecte considérablement les performances du moteur et les caractéristiques d'émission. De nombreuses recherches sur le comportement des biodiesels dans les moteurs à allumage par compression ont été faites, soit sous forme d'expérimentation ou simulation. L'objectif de ce chapitre est de regrouper les différentes études effectuées sur le moteur Lister Petter quand il est alimenté en biodiesel et ses mélanges. Ensuite, faire des analyses statistiques sur ces études par la méthode ACP (Analyse en Composantes Principales), pour extraire les différentes corrélations existant entre les réponses du moteur (performances, combustion et émissions polluantes), ainsi que l'influence des propriétés physico-chimiques (densité, viscosité, point d'éclair, l'indice de cétane, pouvoir calorifiques) des biodiesels et ses mélanges sur le fonctionnement du moteur.

## IV.2. Analyses descriptives

Les tableaux IV.1 et IV.2 [51, 175, 240-244] résument les propriétés physico-chimiques des biodiesels à analysés, ainsi que les résultats de la combustion de ces biodiesels dans un moteur Lister Petter en termes performances, combustion et émissions polluantes en différentes puissances (1,125 kW ; 2,25 kW ; 3,375kW et 4.5 kW) dans un régime 1500 tr/min.

*Tableau IV.1 : Propriétés physico-chimiques des biodiesels testés dans le moteur Lister Petter*

	Densité	IC	Viscosité ciné	PC	PEcla
<b>Eucalyptus</b>	896	53	2,99	40	105
<b>Eucalyptus 75%</b>	891	52,25	2,62	40,76	84
<b>Eucalyptus 50%</b>	884	51,5	2,36	42,53	76
<b>Eucalyptus 25%</b>	876	50,75	1,91	43,8	71
<b>Graisse animal</b>	870	53	4,7	37	128
<b>HFU</b>	870	54	3,5	37	128
<b>HFU2</b>	860	56,1	3,97	38,15	155
<b>HFU2 - 50%</b>	849	54,1	3,2	41,2	83
<b>HFU2 - 25%</b>	846	51,9	2,8	41,8	71
<b>Citrullus colocynthis</b>	886	66,89	3,45	37,64	134
<b>Citrullus colocynthis 30%</b>	846	66,98	2,9	41,2	
<b>Citrullus colocynthis 20%</b>	841	63,64	2,75	41,7	
<b>Citrullus colocynthis 10%</b>	835	62,23	2,62	42,27	
<b>Lentisque</b>	860	53,94	3,44	40	168
<b>Poissons</b>	825	57	1,7	45,1	57

Tableau IV.2 : Réponses du moteur Lister Petter alimenté par biodiesels en différentes puissances [51, 175, 240-244]

	Puissance 1.125 kW à 1500 rpm										
	BSFC	BTE	DC	DA	Pic P	riches	TE	CO	HC	NOx	PM
<b>Eucalyptus 100</b>	0,501	18,9	24	15,2		0,234	215	55	132	806	
<b>Eucalyptus 75</b>	0,478	19,1	23,1	15,1		0,205	214	134	193	754	
<b>Eucalyptus 50</b>	0,552	17,2	22,3	15,4		0,192	213	67	183	745	
<b>Eucalyptus 25</b>	0,518	17,9	21,4	15,9		0,173	214	161	200	696	
<b>Graisses animal</b>	0,636	16,4	53,6	9,75	81,3	0,283	236	68	162	831	
<b>HFU</b>	0,602	16,8	54,2	8,89	82,7	0,276	227	55	101	877	
<b>HFU2</b>	0,496	20,6	40,1	4,63	72,5	0,238	185	139	142	611	2,61
<b>HFU2 - 50</b>	0,412	21,4	33,3	4,81	71,4	0,219	190	122	256	544	2,1
<b>HFU2- 25</b>	0,37	24,1	32,4	5,03	68,5	0,229	196	139	270	524	2,13
<b>Citrullus Coloc.</b>	0,412	23,3		4,45	68,3	0,275	192	148	204	496	1,6
<b>Citrullus C. 30</b>	0,4	22,4		4,71	69,2	0,276	183	158	288	448	2,32
<b>Citrullus C. 20</b>	0,375	23		5,17	68,1	0,256	180	160	304	431	2,2
<b>Citrullus C. 10</b>	0,397	21,8		5,24	65,9	0,271	187	163	328	466	2,11
<b>Lentisque</b>	0,451	21,2	27,8	4,91	70,8			142	141	550	7,46
<b>Poissons</b>		21,9	21,8	12,8	69,6		208	216	356	407	1,06

	Puissance 2.25 kW à 1500 rpm										
	BSFC	BTE	DC	DA	TE	Pic P	riches	CO	HC	NOx	PM
	0,395	23,1	29,6	13,8	281	84	0,341	60	155	1280	
	0,384	24,9	29	14,9	277	83	0,321	118	231	1250	
	0,362	26,8	28,1	14,5	278	82	0,29	69	206	1150	
	0,348	26,7	27,9	15,3	282	80,8	0,278	150	219	1180	
	0,421	23,7	68,7	9,19	308	86,4	0,39	150	203	1210	
	0,438	23,1	74	7,7	301	90,2	0,395	104	159	1240	
	0,39	28,2	61,9	4,44	240	77,4	0,332	151	172	791	5,92
	0,311	30,3	51,7	4,61	246	75,9	0,348	151	272	783	4,5
	0,281	31,7	44,8	5	243	74,2	0,345	159	293	718	4,98
	0,304	31,8		4,69	245	72,8	0,413	165	243	693	2,62
	0,268	29,8		4,86	235	69,2	0,394	195	332	623	3,35
	0,284	30,7		5,07	241	68,1	0,39	166	338	649	3,56
	0,269	32,2		5,28	263	65,9	0,402	175	360	719	4
	0,329	29,2	33,5	4,82		75,6		160	165	742	13,6
		29,6	25,1	11,8	267	75,8		272	388	669	1,55

	Puissance 3.375 kW à 1500 rpm										
	BSFC	BTE	DC	DA	Pic P	riches	TE	CO	HC	NOx	PM
<b>Eucalyptus 100</b>	0,332	27,2	41,6	12,1		0,44	354	59	195	1420	
<b>Eucalyptus 75</b>	0,321	29,2	40,2	12,4		0,425	355	164	233	1430	
<b>Eucalyptus 50</b>	0,303	30,1	37,4	13,2		0,377	359	130	263	1360	
<b>Eucalyptus 25</b>	0,299	29,5	36,9	12,7		0,367	356	242	278	1350	
<b>Graisses animal</b>	0,33	28	79,1	8,9	89,5	0,505	380		254	1240	
<b>HFU</b>	0,364	26,7	88,5	7,09	94,7	0,535	379		229	1270	
<b>HFU2</b>	0,339	31,8	70,5	3,83	85,4	0,448	302	213	190	1060	17,8
<b>HFU2 - 50</b>	0,266	33,1	60,3	3,8	81,8	0,458	304	248	294	1065	12,6
<b>HFU2- 25</b>	0,261	34,4	55,2	4,63	80,4	0,464	303	385	307	1055	11,4
<b>Citrullus Coloc.</b>	0,272	35,2		4,27	78,8	0,56	306	121	246	1080	3,49
<b>Citrullus C. 30</b>	0,235	35,6		4,56	78,7	0,527	287	156	324	937	5,45
<b>Citrullus C. 20</b>	0,251	34,7		4,73	78,2	0,538	314	171	352	1000	4,73
<b>Citrullus C. 10</b>	0,242	35,4		4,84	77,7	0,548	317	181	371	1020	6,11
<b>Lentisque</b>	0,294	32,9	39,9	4,03	83,5			291	177	1140	26,3
<b>Poissons</b>		32,4	34,8	10,8	82,4		347	367	437	872	2,76

	Puissance 4.5 kW à 1500 rpm										
	BSFC	BTE	DC	DA	TE	Pic P	riches	CO	HC	NOx	PM
	0,32	33	78,7	3,43	376	91,8	0,601	823	234	1260	46
	0,261	33,6	60,3	3,38	373	88,2	0,611	1430	327	1220	31
	0,252	34,9	71,2	3,63	363	87,8	0,636	1680	332	1210	34,6
	0,271	35,3		3,23	382	87,8	0,762	1060	234	1310	10,7
	0,238	36,8		3,81	383	85,3	0,717	1280	391	1190	15,4
	0,244	36,1		4,13	371	84,6	0,731	507	376	1280	16,9
	0,247	35,1		3,92	391	84,1	0,748	1440	429	1330	17,5
	0,293	33	45	3,9		91,1		1300	185	1270	68,9
		30,8	41,4	9,7	440	86,9		545	558	808	8,14

### IV.2.1. Analyses des propriétés physico-chimiques

Pour réaliser l'analyse statistique, 15 carburants ont été prises en comptes (tableau IV.1), extrait de 7 matières premières, ces carburants sont subdivisés en 7 biocarburants purs (B100) et 8 mélanges. Dont deux graisses animales (résidus de graisses animales, poisson), 3 huiles végétales dérivées de diverses plantes (Eucalyptus, Citrullus-Colocynthis, Lentisque), et deux huiles de friture usagées.

*Tableau IV.3 : Statistiques descriptives des propriétés physico-chimique*

Variable	Observations	Min	Max	Moy	Ecart-type
IC	15	50,750	66,980	56,485	5,621
Densité	15	825,000	896,000	862,333	21,724
Viscosité ciné.	15	1,700	4,700	2,994	0,766
PC	15	37,000	45,100	40,677	2,416
PEcla	15	57,000	168,000	105,000	32,459

Le tableau IV.3 présente l'analyse descriptive des cinq propriétés physico-chimiques à savoir la densité, la viscosité cinématique, le pouvoir calorifique, le point d'éclair et l'indice de cétane. L'ester méthyle de poisson a enregistré des valeurs minimums pour la densité, viscosité et point d'éclair, cela peut être dû à la composition d'acide gras, le huile de poisson est l'un des matières la plus insaturée ainsi que il représente une longueur de chaîne courte. A partir du tableau, on constate des écart-types élevés pour la densité (21,72) et le point d'éclair (32,46), l'écart type grand est expliqué par l'utilisation d'une variété de matières premières (végétales, animales, et huiles de friture usagée)

### IV.2.1. Analyses des réponses moteur

Afin d'effectuer l'analyse statistique des réponses moteur pour comprendre son fonctionnement quand il est alimenté en biocarburants, les 15 biodiesels cités précédemment ont été testés dans un moteur (banc d'essai) MCI monocylindre de marque Lister Petter en différentes puissances (1,125 ; 2,25 ; 3,375 ; 4,5) kW dans un régime de 1500 rpm. Ces mesures doit être traitées avec beaucoup de prudence à cause : des propriétés physico-chimiques des biodiesels, répond aux normes (ASTM, EN) ou non ; de lieu d'essais (température, pression atmosphérique, l'humidité, etc.), c'est-à-dire, parfois le même carburant donne des réponses différente (mais proche) quand il est testé de jour à lendemain. Le tableau IV.1 représente des statistiques descriptives des réponses du moteur en différentes puissances dans un régime de 1500 rpm.

**Tableau IV.4 : Statistiques descriptives des réponses moteur en différentes puissances**

		Puissance 1.125 kW en 1500 rpm				Puissance 2.25 kW en 1500 rpm			
Vars	Obs.	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type
CSC	15	0,370	0,636	0,471	0,081	0,268	0,438	0,342	0,056
BTE	15	16,400	24,100	20,400	2,509	23,100	32,200	28,120	3,215
richesse	15	0,173	0,283	0,241	0,033	0,278	0,413	0,357	0,041
DC	15	21,400	54,200	32,182	10,344	25,100	74,000	43,118	15,338
DA	15	4,450	15,900	8,799	4,749	4,440	15,300	8,397	4,395
Pic P	15	65,900	82,700	71,665	4,580	65,900	90,200	77,420	6,959
TE	15	180,000	236,000	202,857	16,953	235,000	308,000	264,786	22,923
CO	15	55,00	216,000	128,407	47,044	60,000	272,000	149,640	50,755
HC	15	101,000	356,000	217,333	78,320	155,000	388,000	249,067	77,489
NOx	15	407,000	877,000	612,400	158,879	623,000	1280,000	913,133	263,123
PM	15	1,060	7,460	2,621	1,413	1,550	13,600	4,898	2,650

		Puissance 3.375 kW en 1500 rpm				Puissance 4.5 kW en 1500 rpm			
Vars	Obs.	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type
CSC	15	0,235	0,364	0,294	0,039	0,238	0,320	0,266	0,020
BTE	15	26,700	35,600	31,747	3,093	30,800	36,800	34,289	1,404
richesse	15	0,367	0,560	0,476	0,060	0,601	0,762	0,687	0,045
DC	15	34,800	88,500	53,127	16,047	41,400	78,700	59,320	8,635
DA	15	3,800	13,200	7,459	3,770	3,230	9,700	4,348	1,533
Pic P	15	77,700	94,700	82,827	4,477	84,100	91,800	87,511	2,023
TE	15	287,000	380,000	333,071	30,255	363,000	440,000	384,875	16,858
CO	15	59,000	385,000	209,838	88,179	507,000	1680,000	1118,333	312,625
HC	15	177,000	437,000	276,667	72,544	185,000	558,000	340,667	87,042
NOx	15	872,000	1430,000	1153,267	179,113	808,000	1330,000	1208,667	118,770
PM	15	2,760	26,300	10,071	5,938	8,140	68,900	30,125	13,900

A partir du tableau IV.4, on constate que les performances ont des écarts-types négligeables, mais pour la combustion ils sont importants surtout pour la durée de combustion, ainsi pour les émissions d'NOx, cela est dû à la composition en acides gras et à l'utilisation des variétés de matières premières pour la production des biodiesels (animales, végétales et résidus).

Le rendement effectif s'augmente avec l'augmentation de la puissance, avec une variation de 16,4 % d'EM de la graisse animale pour une puissance de 1,125 kW à 36,8 % du B30 de *Citrullus-colocynthis* pour une puissance de 4,5 kW. La consommation spécifique du carburant (CSC) diminue avec l'augmentation de la puissance, les valeurs minimums de la CSC ont été enregistrées pour le B30 de *Citrullus-colocynthis* et les valeurs maximums pour les huiles de friture usagées (HFU). Le délai d'auto-inflammation (DA) diminue avec l'augmentation de la puissance, des valeurs minimums ont été enregistrées pour HFU et les valeurs maximums pour

l'eucalyptus et ses mélanges. La durée de combustion (DC) s'évolue contrairement au délai d'auto-inflammation, des valeurs minimums du DC ont été enregistrées pour l'EM de poisson et les valeurs maximums pour les HFU. Pour les émissions polluantes, le biodiesel le plus polluant en CO et HC est l'EM de poisson, mais il est le moins polluant pour NOx et PM, tandis que l'EM d'eucalyptus et l'EM de lentisque sont les moins polluants pour CO et HC, et ils sont les plus polluants pour NOx et PM en différentes puissances du moteur.

## IV.2. L'influence sur les performances du moteur

Les courbes de consommation spécifique, le rendement effectif, la richesse et la température d'échappement, peuvent être tracées en fonction (régime ; charge ; puissance ; pression moyenne effective) du moteur. Dans la présente étude l'évolution des performances en fonction de la puissance du moteur dans un régime de 1500 rpm ont été collectées [51, 175, 240-244].

### IV.2.1. Consommation spécifique

La consommation spécifique de carburant (CSC) est la masse de carburant nécessaire pour fournir une puissance dans un temps donné, elle s'exprime en kg/(kW.h). Elle est autrement définie comme, la qualité de la transformation de l'énergie au sein du moteur. Cette grandeur est proportionnelle à l'inverse du rendement. C'est la quantité de combustible, d'un pouvoir calorifique donné, qui doit être dépensée pour la production d'une unité d'énergie. La consommation spécifique dépend, d'une part, de la conception des moteurs, des valeurs extrêmes de la température et de la pression atteintes par le gaz, d'autre part, CSC dépend de la charge, puissance et la vitesse du moteur. La CSC est calculée par l'équation suivante [197] :

$$CSC = \frac{\dot{m}_f}{P_{eff}} \quad (IV.1)$$

Avec  $\dot{m}_f$  est le débit massique du combustible (g/h) et  $P_{eff}$  est la puissance effective du moteur (kW).

A partir des valeurs de la CSC des carburants collecter (tableaux IV.2 et IV.4), pour les puissances (1,125 ; 2,25, 3,375 ; 4,5) kW à un régime de 1500 tr/min, on peut constater que les valeurs maximales de la CSC sont (0,636 ; 0,438 ; 0,364 ; 0,32) kg/(kW.h), respectivement pour les EM des graisses animales à une puissance de 1,125 kW, et pour les huiles de friture usagées pour les autres de puissances analysées. Ainsi que les valeurs minimales sont de l'ordre de (0,37 ; 0,268 ; 0,235 ; 0,238) kg/kWh pour le B25 des huiles de friture usagées a une puissance de

1,125 kW et le B100 de *citrullus-colocynthis* pour les autres puissances analysées respectivement.

#### IV.2.2. Rendement effectif :

Le rendement effectif est le rapport de la puissance effective du moteur, et de l'énergie de carburant consommé par le moteur. Pour les carburants analysés, les écarts de rendement effectif entre les biodiesels et le diesel conventionnel sont plus faibles que ceux de la consommation spécifique. Cela est dû principalement à la meilleure combustion des biocarburants qui est attribuée à la présence de l'oxygène au sein du biocarburant.

D'après les tableaux des biodiesel analysés (tableaux IV.2 et IV.4), pour les puissances (1,125 ; 2,25, 3,375 ; 4,5) kW à un régime de 1500 tr/min, les valeurs maximales du rendement effectif sont (24,1; 32,2 ; 35,6 ; 36,8), pour le B25 d'HFU à une puissance de 1,125 kW et le B30 des EM *citrullus-colocynthis* pour les autres puissances à analysées. Tandis que, les valeurs minimales (16,4 ; 23,1 ; 26,7 ; 30,8), pour les EM des graisses animales à une puissance de 1,125 kW, les EM d'HFU à des puissances (2,25 ; 3,375) kW, et l'EM de poisson à une puissance de 4,5 kW respectivement. En outre, il a été constaté que le rendement effectif augmente avec l'augmentation de la puissance du moteur, pour la totalité des biocarburants analysés, contrairement à la CSC.

#### IV.2.3. Relation du rendement effectif avec consommation spécifique

Théoriquement, la relation entre rendement effectif (en anglais BTE) et la consommation spécifique (CSC ou en anglais BSFC) est calculée comme suit [197] :

$$\eta_{eff} = \frac{W_c}{m_f.PCI} = \frac{P_{eff}}{\dot{m}_f.PCI} \quad (IV.2)$$

La substitution de l'équation IV.1 dans IV.2 donne :

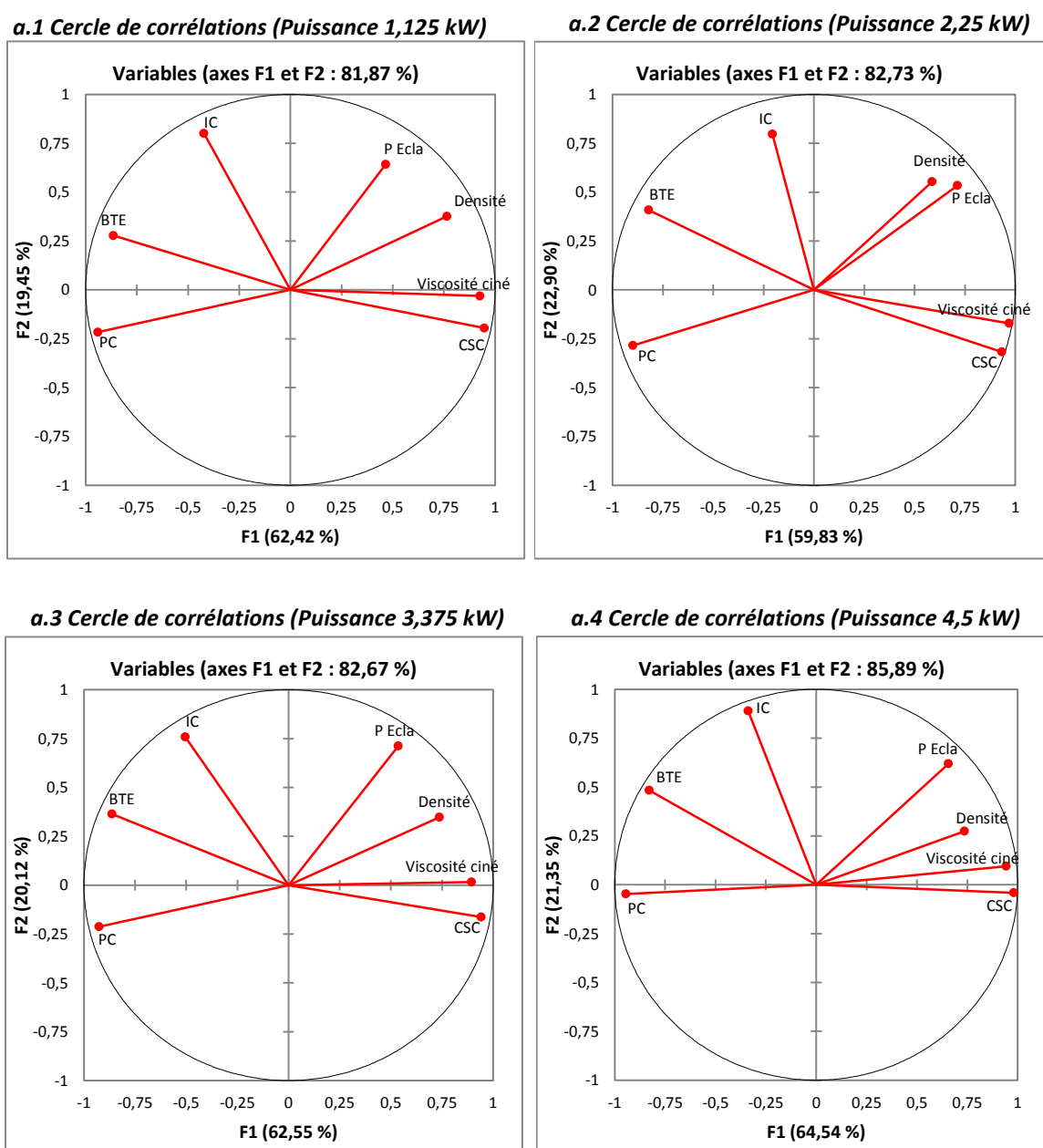
$$\eta_{eff} = \frac{1}{CSC.PCI} \quad (IV.3)$$

Avec unités l'équation IV.3 devient :

$$\eta_{eff} = \frac{3600}{CSC(\frac{g}{kWh}).PCI(\frac{MJ}{kg})} \quad (IV.4)$$

Expérimentalement, Il a été constaté que quel que soit la puissance du moteur, les consommations spécifiques des carburants biodiesel ou de ses mélanges sont supérieurs à ceux atteints lors de la combustion du gazole, cela est dû à la densité élevé du biocarburant, et comme la pompe d'injection du carburant est une pompe volumétrique, donc la quantité de carburant

injectée pour le biodiesel est supérieur à celle du diesel conventionnel. Etant donné que le rendement effectif du moteur alimenté par ces carburants sera inférieur au rendement obtenu lorsque le moteur tourne au diesel conventionnel. En parallèle, l'impact de la densité élevée pour les biocarburants testés est légèrement compensée par des pouvoirs calorifiques inférieur à celui du diesel (le rendement thermique ne variera que très faiblement).



**Figure IV.1 :** Corrélations entre Rendement (BTE), CSC(BSFC) et les propriétés physico-chimiques principales des biodiesels en ACP

La figure IV.1 représente les cercles de corrélations existant entre la consommation spécifique du carburant et le rendement effectif avec les propriétés physico-chimiques principales du biodiesel et ses mélanges. Les réponses du moteur (CSC, BTE) ont été testées dans un moteur Lister Petter et analysées par la méthode d'analyse statistique ACP sous différentes puissances du moteur à un régime de 1500 tr/min. D'après la figure, les variables (propriétés et réponses moteur) sont représentées sur les cercles de corrélations d'ordre (81,87% ; 82,73% ; 82,67% ; 85,89%) pour les puissances (1,125 ; 2,25 ; 3,375 ; 4,5) kW respectivement, c'est-à-dire, les données sont bien représentées sur les cercles de corrélation surtout sur le premier axe, dont lequel on peut interpréter les résultats d'analyse.

Les consommations spécifiques les plus basses sont enregistrées à des puissances grandes du moteur. Tandis que, les CSC peuvent augmenter fortement à très bas régime et à des faibles puissances, selon le type de moteur. Par conséquent, le rendement effectif s'évolue inversement de la CSC. Dans ce sens, d'après la figure IV.1, une forte corrélation négative est remarquée entre la CSC et le rendement effectif d'ordre (-96,6% ; -86,3% ; -91,2% ; -82,7%) pour les puissances analysées respectivement. D'après l'analyse on peut dire que si le rendement augmente la CSC diminue et vice-versa. Cela est bien éprouver expérimentalement et théoriquement (équation IV.4).

D'autres corrélations sont constatées de la consommation spécifique du carburant avec la viscosité cinématique (84,2% ; 96,6% ; 76,6%, 93,2%) et avec le pouvoir calorifique (-83% ; -77,2% ; -84,6 % ; -94,2%), du rendement effectif avec la viscosité cinématique (-73,8% ; -88,2% ; -72,4 % ; -69%) et avec le PC (70,2% ; 58,2% ; 74,5%, 77,2%), respectivement pour les quatre puissances analysées. A partir de ces résultats, on peut déduire que si la viscosité cinématique s'augmente la consommation spécifique du carburant s'augmente aussi. On peut expliquer la corrélation positive entre la CSC et la viscosité par, une viscosité cinématique élevée conduit à une mauvaise atomisation et vaporisation du carburant [189], donc une réduction de puissance et de couple du moteur [163], pour atteindre la puissance voulue une quantité supplémentaire du carburant est injectée, pour cela il a été constaté que la CSC pour les biodiesel est supérieur à celle du diesel standard [167]. En outre la corrélation négative entre la CSC et le pouvoir calorifique est expliquée par, la baisse du pouvoir calorifique du biodiesel par rapport au diesel a attribué un taux de consommation de carburant élevée du biodiesel pour atteindre la même quantité d'énergie dégagé par la combustion [167,168].

L'analyse statistique indique que, plus la proportion de biodiesel dans les carburants mélangés est élevée, plus la CSC est élevée, en raison du faible PCI du biodiesel. En-plus,



lorsque le moteur est alimenté avec des mélanges de biocarburant, la diminution du pouvoir calorifique et l'augmentation de l'indice de cétane entraîneront une augmentation de l'injection de carburant en phase de diffusion, ce qui entraînera une augmentation CSC et une diminution rendement effectif.

De plus, en raison de la plus grande densité et viscosité du biodiesel, la pulvérisation et l'atomisation pourraient être détériorées [245], en raison du point d'ébullition plus élevé et de la densité plus élevée du biodiesel. Ainsi, le processus de combustion pourrait être retardé et entraîner une baisse rendement effectif. Par contre, la teneur en oxygène des mélanges améliorera le processus de combustion et entraînera une augmentation du rendement. Ainsi, ces facteurs défavorables pour les mélanges du biodiesel interagissent entre eux et conduisent au même rendement que le diesel.

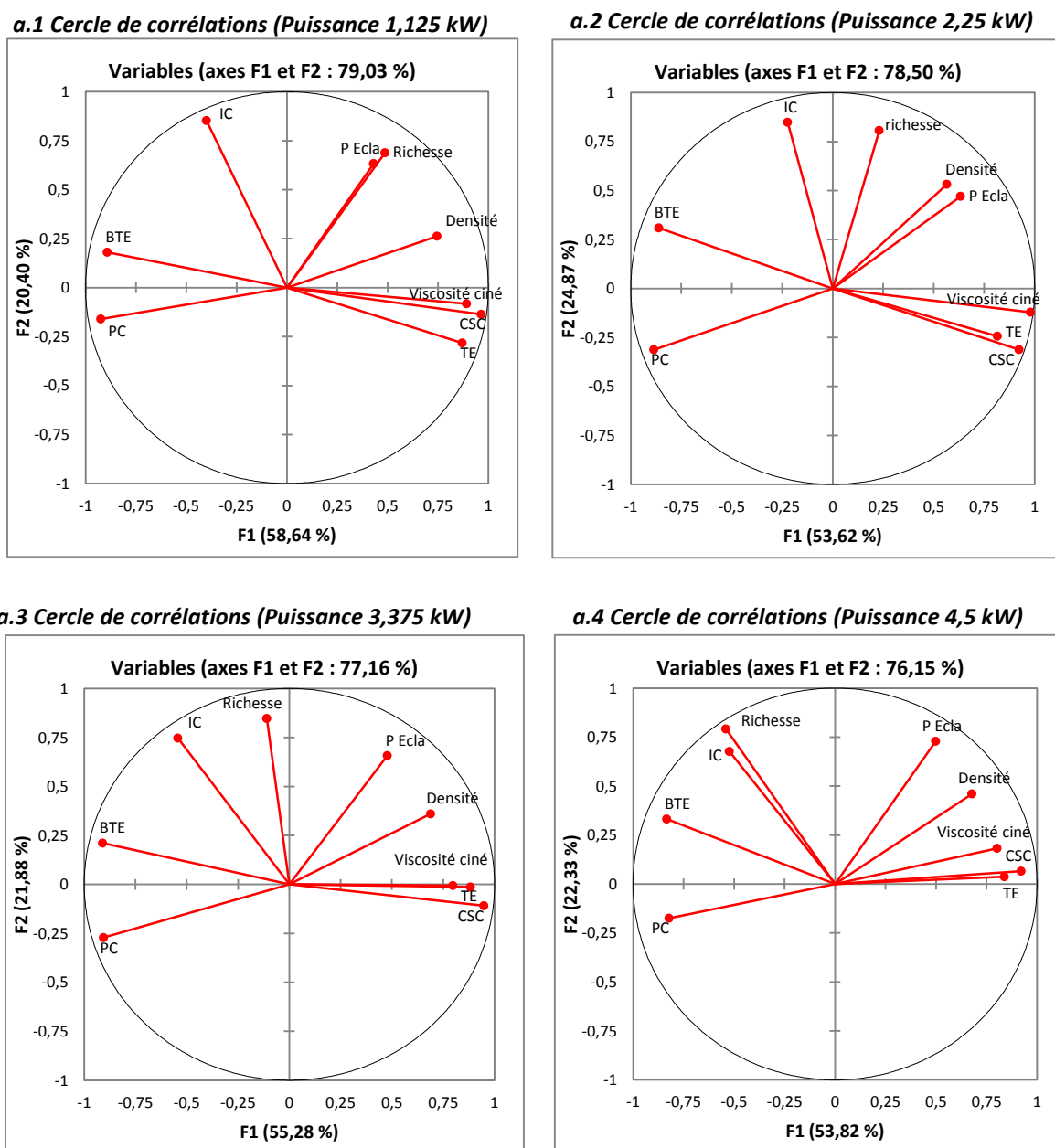
#### **IV.2.4. Température des gaz d'échappement :**

La variation des températures des gaz d'échappement (TE) en fonction de la puissance du moteur pour les différents biodiesels et ses mélanges est analysée statiquement et représentée dans la figure IV.2 en utilisant la méthode d'analyse statistique l'ACP. L'analyse des réponses, pour toutes les puissances, montrent que la température des gaz d'échappement augmente avec l'augmentation de la puissance du moteur. Par conséquent, le biodiesel et ses mélanges ont une TE plus élevée que le diesel standard, cette TE est affectée par la température élevée de la chambre de combustion. Cela est dû peut être à l'existence d'oxygène dans la composition chimique du biodiesel et ses mélange et à leurs consommation spécifique de carburant élevée, qui génère un pic de pression et une température de combustion importante ce qui va influencer sur la température des gaz d'échappement.

D'après d'analyse des réponses, il a été constaté que les TE les plus basses est pour le B30 de *Citrullus colocynthis* et les TE les plus élevées pour le B10 des graisses animales. En général, les TE du biodiesel et de ses mélanges, sont plus élevées que celle obtenue quand le moteur est alimenté en gazole. La TE dépendent du taux de combustion, qui à son tour est influencée par la quantité de carburant injectée pendant la phase de combustion pré-mélangée, cette phase régie par le délai d'auto-inflammation (DA) et par la préparation du mélange pendant le DA, ainsi, la viscosité élevée et la volatilité plus faible du biodiesel [192, 193, 197].

A partir de la figure IV.2, il a été constaté que TE est corrélée positivement avec la CSC d'ordre (89,1% ; 73% ; 72,1% ; 88,5%) et négativement avec le rendement effectif (-86% ; -85,6% ; -89,4% ; -71,1%). De l'analyse, on résulte que si la CSC augmente, il y a plus de

biocarburant dans la chambre de combustion ce qui attribue plus d'énergie dégagée par la combustion de ce biocarburant, cela va augmenter la température de la chambre de combustion, cette dernière va augmenter la température des gaz d'échappement.



**Figure IV.2 :** Corrélations entre température d'échappement (TE), la richesse et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP

En outre la température des gaz d'échappement est corrélée positivement avec la viscosité cinématique (68,7% ; 81,3% ; 59,7% ; 57,7%) et négativement avec le pouvoir calorifique (-69,2% ; -58,5% ; -64,2% ; -59,7%) respectivement pour les différentes puissances analysées. Cela peut être expliqué par un PC moindre des biodiesels et une viscosité élevée ce qui nécessitent

une grande masse de carburant injectée dans la chambre de combustion, avec le retard d'allumage, ce qui attribue une mauvaise atomisation et pulvérisation du mélange air-carburant qui affecte la TE. La variation des résultats d'analyse est due aussi à l'utilisation des matières premières de différente nature (animales, végétales, et résidus).

### **IV.3. L'influence sur la combustion**

#### **IV.3.1. Délai d'auto-inflammation :**

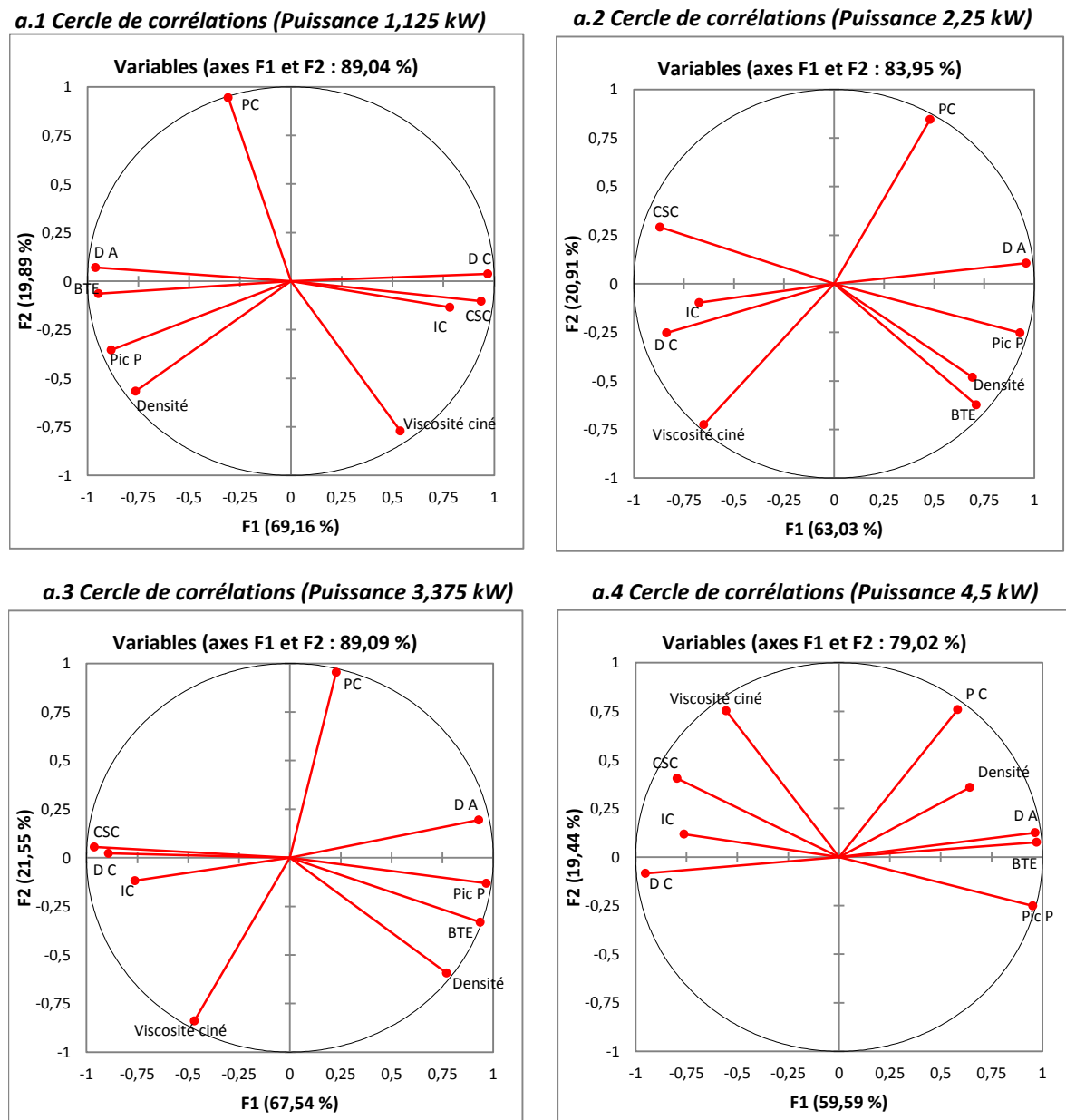
Le délai d'auto-inflammation est défini comme étant le temps qui s'écoule (l'intervalle d'angle vilebrequin) entre le début de l'injection du carburant et le début de la combustion. Il est déterminé soit à partir de la courbe dérivée de la pression, ou à partir de la courbe du taux de dégagement de chaleur, ou bien par les modèles mathématiques. A partir des données (tableau IV.2) des carburants analysés, il a été constaté que le délai d'auto-inflammation baisse avec l'augmentation de la puissance du moteur. Ceci est expliqué par l'élévation de la température, et la pression des gaz dans la chambre de combustion, ce qui diminue le délai d'auto-inflammation.

De l'analyse descriptive des biocarburants analysés, on peut constater que, les valeurs maximales de délai d'auto-inflammation sont (15,9; 15,3 ; 13,2 ; 9,7) degré de vilebrequin pour l'EM d'eucalyptus à des puissances (1,125 ; 2,25 ; 3,375) kW respectivement et pour l'EM le poisson à une puissance de 4,5 kW. Tandis que, les valeurs minimales (4,45 ; 4,44 ; 3,8 ; 3,23) degré de vilebrequin pour les EM (citrullus colocynthis ; HFU; HFU; citrullus colocynthis), respectivement pour les différentes puissances analysées.

A partir de l'analyse statistique (figure IV.3), il a été remarqué qu'il existe des corrélations positives entre le délai d'auto-inflammation avec le pic de pression (80,2% ; 86,1% ; 85,1% ; 90,2%), le rendement effectif (89,7% ; 62,3% ; 79,7% ; 93,4%), et négative avec la consommation spécifique du carburant (-91,5% ; -83,4% ; -89,8% ; -66,4%) respectivement pour les différentes puissances analysées. L'explication donner pour ces résultats est que le biodiesel a un pouvoir calorique moindre par rapport au diesel cela nécessite une quantité de carburant injecté plus grande que celle du diesel, renforcé par l'existence d'oxygène dans la composition chimique du biodiesel, la quantité injectée plus grande de carburant cela affecte la phase pré-mélange d'air-carburant ce qui génère un délai d'auto-inflammation plus court.

En outre, de la figure IV.3 on peut extraire d'autres corrélations avec les propriétés physico-chimiques. Le délai d'auto-inflammation est corrélé négativement avec : l'indice de cétane

(-64% ; -51% ; -56% ; -73,3%), la viscosité cinématique (-64,5% ; -75,7% ; -66,8% ; -46,7%), et positive avec la densité (75,7% ; 60,3% ; 61,3% ; 69,3%) respectivement pour les différentes puissances analysées. L'interprétation de ces résultats, comme il a été expliqué précédemment le biodiesel à une viscosité cinématique ; une densité et un indice de cétane élevées, la viscosité et l'indice de cétane influent négativement pour le délai d'auto-inflammation, c'est-à-dire si la viscosité et IC augmentent cela donne un délai d'auto-inflammation court [172, 201]. Tandis que la densité influe positivement sur DA, c'est-à-dire une densité élevée donne plus de masse de carburant injecté, renforcer par un IC moindre donnent un long délai d'auto-inflammation.



**Figure IV.3 :** Corrélations entre le délai d'auto-inflammation (DA), la durée de combustion (DC) et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP

### IV.3.2. Durée de combustion

La durée de combustion est présentée en termes d'angle de vilebrequin. Elle est subdivisée en trois phases pré-mélange (du point d'auto-inflammation jusqu'à le premier pic de la courbe de dégagement de chaleur), diffusion (de la fin de la phase pré-mélange jusqu'à la fin d'injection du carburant), enfin la troisième phase tardive (de la fin de la phase diffusion à la stabilisation de la courbe de dégagement de chaleur) [201]. La durée de combustion augmente avec l'augmentation de la puissance du moteur.

De l'analyse des données des tableaux IV.2 et IV.4, on peut distinguer, la durée de combustion la plus longue est de (54,2 ; 74 ; 88,7 ; 78,7) degré de vilebrequin pour les EM de HFU, respectivement pour les puissances analysées. Tandis que, la durée de combustion la plus courte est de (21,4 ; 25,1 ; 34,8 ; 41,4) degré de vilebrequin, des EM B25-Eucalyptus pour la puissance 1,125 kW et des EM de poisson pour les restes de puissances analysées.

D'après l'analyse statistique (figure IV.3) la durée de combustion est corrélée négativement avec le délai d'auto-inflammation (-87,5% ; -81,4% ; -81% ; -89,5%), respectivement pour les différentes puissances analysées. A partir d'analyse il a été constaté que le délai d'auto-inflammation des biodiesels est inférieur à celui du diesel. En plus un délai d'auto-inflammation long génère une durée de combustion réduite, car le dégagement de chaleur dépend de la phase de combustion diffusion (réduite) qui entraîne une DC réduite [189]. En outre le délai d'injection du biodiesel est supérieur à celui du diesel [197, 202], donc un DA court soutenu par une grande quantité de carburant injectée génère une durée de combustion plus longue, alors le délai d'auto-inflammation s'évolue inversement à la durée de combustion.

De la figure IV.3 la durée de combustion est corrélée positivement avec la consommation spécifique du carburant (85,9% ; 60,5% ; 76,9%, 76,5%) et le pic de pression (-88,6% ; -60% ; -80,5% ; -84,9%). L'explication donne, un délai d'auto-inflammation long génère une accumulation de carburant dans la chambre de combustion (CC) pendant la période de retard d'allumage, comme il a été expliqué précédemment que le pic de pression est influencé par la quantité de carburant dans la CC pendant la phase pré-mélange de la combustion, une grande quantité de carburant génère un pic de pression élevée, donc la durée de combustion s'évolue inversement à la pression maximum.

A partir d'analyse statistique la durée de combustion est aussi corrélée avec les propriétés physico-chimiques des biodiesels analysés. La durée de combustion est corrélée positivement

avec l'indice de cétane (87,2% ; 40,6% ; 57,6% ; 61,9%) et négativement avec la densité (-70,7% ; -69,6% ; -77,7%, -61,1%). Un IC élevé et une densité moindre donnent un délai d'auto-inflammation court et une durée de combustion plus longue [196].

### IV.3.3. Pression cylindrique

La pression cylindrique du moteur d'allumage par compression est l'une des indices principaux sur la bonne combustion du mélange air-carburant. La pression du cylindre dépend de la fraction de carburant brûlé pendant la phase initiale de combustion (pré-mélange). Il a été remarqué que pour tous les biodiesels analysés les profils de la pression cylindre ont la même allure, que ce soit à faible puissance ou à puissance élevée. Toutes les courbes de la pression cylindre présentent un pic qui se situant après le PMH. Ceci peut prédire un bon fonctionnement du moteur, car en effet, si la pression maximale se trouve avant ou autour du PMH, il y a un risque de cognement dans le moteur et la durée de vie du moteur sera réduite.

A partir des données du tableau IV.2, il a été constaté que le pic de pression augmente avec l'augmentation de la puissance du moteur. Ceci est expliqué par la quantité de carburant importante injectée à des puissances élevées et à la bonne combustion du mélange air-carburant. De l'analyse descriptive des biocarburants analysés, on peut constater que, les valeurs maximales de pic de pression sont (82,7; 90,2 ; 94,7 ; 91,8) bars pour les EM d'HFU. Tandis que les valeurs minimales (65,9; 65,9; 77,7; 84,1) bars pour le B10 de *Citrullus colocynthis* respectivement pour les différentes puissances analysées.

De la figure IV.3, il a été remarqué que la pression cylindrique (pic de pression) est corrélée positivement avec le délai d'auto-inflammation (80,2% ; 86,1% ; 85,2% ; 90,2%), le rendement effectif (82,3% ; 87,5% ; 95,3% ; 90,4%), et négativement avec la consommation spécifique du carburant (-78,7% ; -87,4% ; -97,2% ; -80,6%), la durée de combustion (-88,6% ; -60% ; -80,5% ; -84,9%), respectivement pour les différentes puissances analysées. L'interprétation possible pour ces résultats, la variation de la pression cylindrique dépend de la quantité de carburant qui se trouve dans la CC pendant la phase pré-mélange de la combustion, si le délai d'auto-inflammation augmente donc une quantité importante de carburant est injectée avant l'allumage ce qui génère un pic de pression élevé.

A partir d'analyse statistique, il a été illustré qu'il existe des corrélations positives entre le pic de la pression cylindrique avec la densité (82,4% ; 65,2% ; 78,5% ; 52,9%), et négatives avec l'indice de cétane (-70,6% ; -72,1% ; -79,7% ; -76%), respectivement pour les différentes

puissances analysées. L'explication de ces résultats, une densité élevée génère une masse importante de carburant injectée puisque les pompes d'injection sont des pompes volumétrique, ainsi qu'un indice de cétane moindre génère un délai d'auto-inflammation longue, ces deux facteurs vont influencer sur la pression cylindrique et effectivement le pic de pression.

#### **IV.4. Emissions polluantes**

Les résultats sur les émissions polluantes liées à la combustion des carburants à analysés ainsi que la description des phénomènes mis en jeu sont très variées. D'après les données des carburants a analysés (tableau IV.4), il a été remarqué que les écarts types entre les mesures des émissions polluantes sont très importants surtout NO<sub>x</sub>. Cela est dû, en premier lieu, aux variétés des matières premières et les procédés utilisés pour l'extraction des biodiesels, en deuxième lieu, aux conditions de fonctionnement du moteur. Cependant, la même matière première (libellé de la matière), récolté à des endroits différentes peut donner des résultats variantes en termes émissions et performances.

##### **IV.4.1. Les oxydes d'azote**

Il s'agit de la caractéristique d'émission la plus importante du biodiesel et de ses mélanges. Les NO<sub>x</sub> sont les émissions gazeuses les plus nocives des moteurs quand il est alimenté par le biodiesel, la réduction de ces émissions est toujours la préoccupation des chercheurs et des motoristes. Les NO<sub>x</sub> thermiques (décrit dans le mécanisme de Zeldovich « NO précoce », « NO du combustible », « NO thermique » [197]), se réfèrent aux NO<sub>x</sub> formés par oxydation à haute température de l'azote (N<sub>2</sub>) dans la chambre de combustion. La formation de NO<sub>x</sub> dépend fortement des températures dans le cylindre, de la concentration en oxygène et du temps pour que la réaction ait lieu. Aux températures élevées de la combustion, le N<sub>2</sub> et l'O<sub>2</sub> dans la chambre de combustion se dissocient dans leurs états atomiques et participent à une série de réactions.

La vitesse de formation du NO « thermique » est donc régie principalement par la température, les concentrations en oxygène et en azote (atomique et moléculaire) et la concentration en radicaux -OH. Les émissions de NO<sub>x</sub>, observées avec les biocarburants, sont généralement inchangées ou plus faibles que celles observées avec le gazole. Cela serait dû à des pics de températures, dans la chambre de combustion, plus faibles ou à la teneur plus faible en composés aromatiques (précurseurs des NO<sub>x</sub>) des biodiesels [167, 170, 176, 178].

D'autres études montrent au contraire, des émissions de NOx plus élevées comparées au gazole. Cela est attribué aux dépôts dans la chambre de combustion qui provoqueraient une augmentation de sa température (faible conductivité des dépôts) et à l'oxygène contenu dans le biodiesel [182-185].

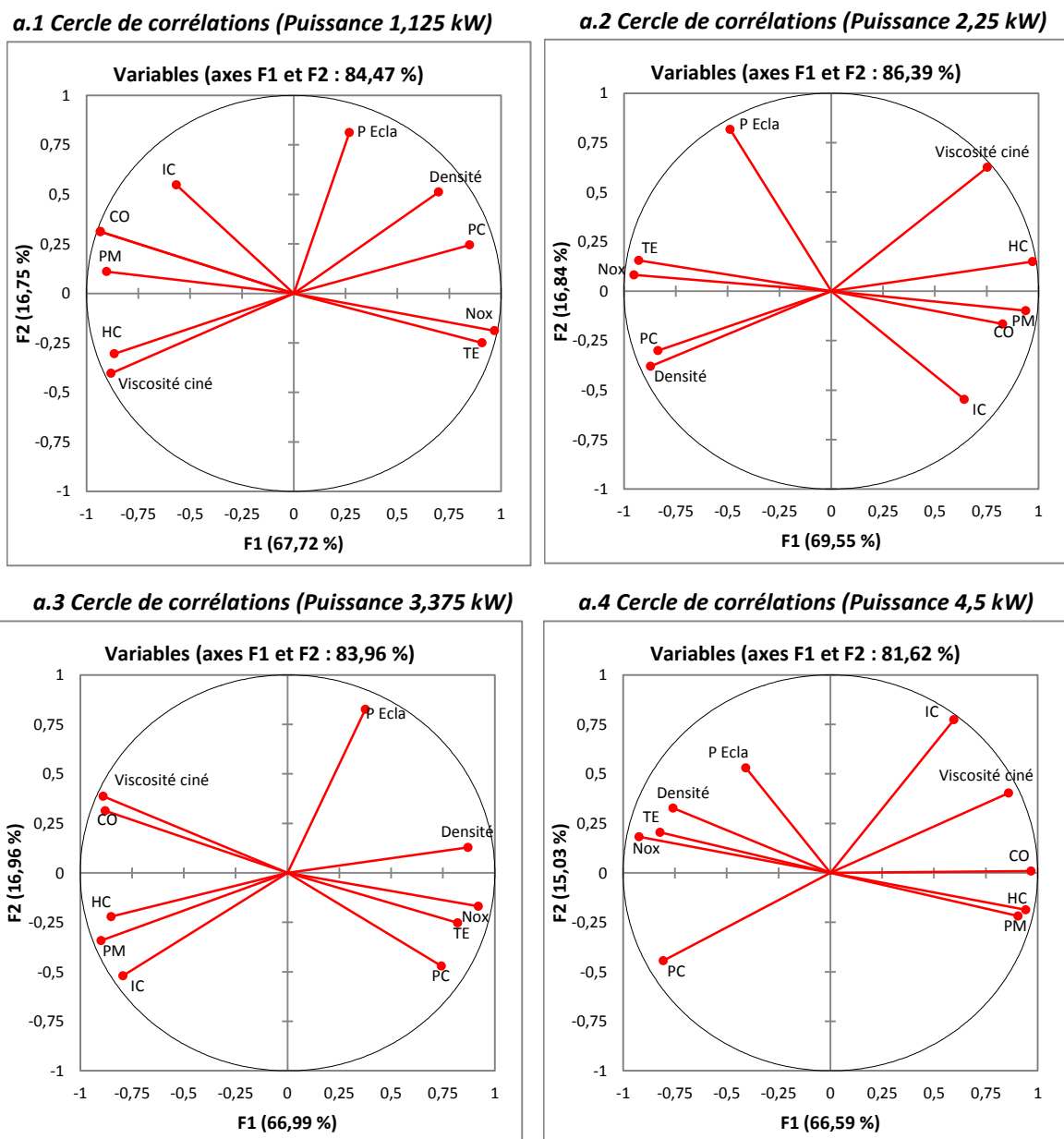
De l'analyse descriptive des émissions de NOx (tableau IV.4), un écart type très important a été enregistré pour toutes les puissances analysées. Les valeurs maximales de NOx (877 ; 1280 ; 1430 ; 1330) ppm d'EM de HFU pour la puissance 1,125 kW et l'EM eucalyptus respectivement pour les autres puissances analysées. Tandis que, valeurs minimales de NOx (407 ; 623 ; 872 ; 872) ppm pour d'EM de poisson respectivement pour les puissances analysées, sauf à la puissance 2,25 kW le B30 de *Citrullus colocynthis* a enregistré la valeur la plus basse. Par ailleurs, une augmentation d'un NOx avec l'augmentation de la puissance du moteur a été constatée, sauf à haute puissance l'EM de poisson et l'EM de graisse animale ont enregistré des tendances à la baisse. L'interprétation donnée par les auteurs pour cette baisse à des puissances élevées, le temps de résidence plus court des gaz dans le cylindre et la viscosité et le point d'éclair plus élevés ainsi que le niveau de saturation relativement élevé ont conduit à une légère diminution de la formation de NOx [175].

Les résultats d'analyse statistique des émissions de NOx ont été présentés dans la figure IV.4 pour les différentes puissances analysées. À partir d'analyse statistique, il a été constaté qu'il existe des corrélations positives entre les émissions de NOx avec la température d'échappement (92,9% ; 99,4% ; 69,4% ; 93%), le pouvoir calorifique (73,9% ; 79,1% ; 92,3% ; 57,2%), la densité (54,1% ; 74,2% ; 72,4% ; 66,3%), et négatives avec l'indice de cétane (-61,5% ; -55,5% ; -72,3% ; -41,1%), la viscosité cinématique (-78,1% ; -61,4% ; -82,2% ; -70,9%) respectivement pour les différentes puissances analysées. L'explication de ces résultats, les émissions de NOx sont corrélées très fortement à température à l'intérieur de la chambre de combustion, avec un PC et une densité élevées soutenu par une viscosité et un IC moindres ce qui donne un délai d'auto-inflammation plus-au-moins longue, temps nécessaire pour le carburant à s'accumuler et bien se mélanger à l'intérieur de la chambre de combustion, ce qui génère une pression et température élevées pendant la phase pré-mélange donc plus de NOx.

De la figure IV.4, autres corrélations négatives ont été enregistrées entre les émissions de NOx avec les émissions CO (-97,4% ; -68,9% ; -91,7% ; -87,5%), les émissions HC (-77,6% ; -87,6% ; -60% ; -86,8%), et les émissions PM (-93% ; -99,9% ; -68,7% ; -90,4%) pour les



différentes puissances analysées respectivement. L'explication de ces résultats, si la température de la chambre de combustion augmente c'est un signe de la bonne combustion du mélange air-carburant pendant la phase pré-mélange ce qui va influencer sur les émissions de HC et PM [172]. Pour le CO l'existence d'oxygène dans la composition chimique avec la température élevée convertie le CO en CO<sub>2</sub> ce qui va diminuer les émissions de CO.



**Figure IV.4 :** Corrélations entre les émissions polluantes et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP

#### IV.4.2. Le monoxyde de carbone (CO)

Le mécanisme conduisant à la formation du CO fait intervenir essentiellement des hydrocarbures, des radicaux hydrocarbonés, et les radicaux OH, O, H. La température du milieu réactionnel, la concentration en radicaux libres (O, OH, H) jouent un rôle primordial dans la vitesse des réactions intervenant dans le mécanisme de formation du CO. Une tendance à la hausse a été observée pour le CO à cause du mélange inefficace d'air-carburant et le temps insuffisant pour la post-oxydation [183, 186]. Tandis que la majorité des recherches montrent que le biodiesel a enregistré des émissions moindres de CO à cause du teneur élevé d'oxygène dans le mélange air-carburant qui favorise la bonne combustion et soutenu la conversion du CO en CO<sub>2</sub> [167, 179, 186]. Les émissions de CO observées avec les biodiesels et ses mélanges sont en général plus faibles que celles du gazole, mais l'écart n'est pas très grand.

De l'analyse descriptive des biodiesels analysés, on peut constater que, les valeurs maximales des émissions de CO sont (216; 272 ; 385 ; 1680) ppm pour l'EM de poisson à des puissances (1,125 ; 2,25) kW respectivement et l'EM des HFU à des puissances élevées (3,375 ; 4,5) kW respectivement. Tandis que les valeurs minimales (55 ; 60 ; 59 ; 507) ppm pour les EM d'eucalyptus respectivement pour les différentes puissances analysées sauf à la puissance 4,5 kW, il n'existe pas des mesure pour l'eucalyptus donc le B20 de *Citrullus colocynthis* a enregistré la plus basse valeur.

A partir d'analyse statistique (figure IV.4), il a été constaté qu'il existe des corrélations positives entre les émissions de CO avec la viscosité cinématique (71,2% ; 56,8% ; 90,8% ; 78,5%), l'indice de cétane (60,8% ; 68,2% ; 57% ; 58,6%) , et négatives avec la densité (-51,1% ; -70,9% ; -63,4% ; -85,7%), le pouvoir calorifique (-66,5% ; -54,8% ; -83,9% ; -78,2%), et la température d'échappement (-93,6% ; -67,4% ; -67,5% ; -70,4%) respectivement pour les différentes puissances analysées. L'explication de ces résultats, d'une part, malgré que le PC et la densité moindres et une viscosité élevée du mélange air-carburant cela nécessite plus de carburant injecté pour atteindre la puissance voulue ce qui réduit les émissions de CO [207]. D'autre part, l'existence d'oxygène dans la composition chimique du biodiesel favorise la bonne combustion du mélange ce qui augmente la température de la chambre de combustion et encourage l'oxydation ce qui convertie le CO en CO<sub>2</sub> [167], ce qui diminue les émissions CO.

De la figure IV.4, des corrélations positives sont enregistrées entre les émissions de CO avec les PM (89,4% ; 66,5% ; 66,5% ; 81,4%), les HC (68,8% ; 84,8% ; 62,9% ; 97,9%), et négative avec les NO<sub>x</sub> (-97,4% ; -68,8% ; -91,7% ; -87,5%) respectivement pour les différentes

puissances analysées. L'interprétation de ces résultats, comme il a été expliqué précédemment, la température de la chambre de combustion et la teneur élevée d'oxygène dans le mélange air-carburant sont les deux éléments clés pour la réduction des émissions de CO.

En outre, d'après l'analyse, on peut voir que les émissions de CO ont la même tendance pour les mélanges biodiesel-diesel et le diesel pur, c'est-à-dire à des puissances faibles et moyennes, les émissions de CO sont très faibles en raison de quantité injectée de carburant (faible) par cycle et du rapport air-carburant plus élevé. De plus, la formation de CO est influencée par la température de combustion et la teneur en oxygène. Cependant, lorsque la puissance augmente, les émissions de CO augmentent fortement en raison du manque d'oxygène (rapport air-carburant diminue). Aux puissances moyennes et élevées, la teneur en oxygène à l'intérieur de la chambre de combustion devient le principal facteur de la formation de CO. Étant donné que le biodiesel lui-même contient une certaine quantité d'oxygène, plus d'oxygène peut participer aux réactions chimiques du mélange biodiesel-diesel-air que le mélange diesel-air, ce qui rend la combustion plus complètement [179]. Surtout, l'augmentation de la densité (plus de masse de carburant injectée), ainsi que la diminution de l'indice de cétane et la viscosité (bonne pulvérisation) augmente la température de combustion, ce qui influencera sur les émissions de CO par l'oxydation de CO en CO<sub>2</sub> [167, 207]. Par conclusion, la température de combustion et le rapport air-carburant sont les éléments clés pour expliquer la relation existant entre CO avec les propriétés physico-chimiques et les autres émissions polluantes.

#### **IV.4.3. Les hydrocarbures imbrûlés (HC)**

Les émissions de HC sont constituées de carburant qui n'est pas entièrement brûlé ou partiellement brûlé pendant le processus de combustion. Les conditions de fonctionnement du moteur, la conception de la chambre de combustion, la disponibilité d'une teneur en oxygène insuffisante et la réduction de la température de combustion sont les principaux paramètres qui influent sur les émissions de HC [186]. Par rapport au carburant diesel pur, les émissions d'hydrocarbures non brûlés (HC) est inférieure pour le biodiesel et ses mélanges. En raison de la teneur élevée en oxygène dans le mélange air-carburant, la température des gaz d'échappement augmente et l'efficacité de la combustion du carburant dans le cylindre du moteur s'est améliorée. La réduction des émissions de HC avec le carburant mélangé au biodiesel est due à la combustion plus précoce du carburant mélangé au biodiesel par rapport au carburant diesel pur et à la disponibilité d'un temps significatif pour la combustion complète.

De l'analyse des données des tableaux IV.2 et IV.4, on peut distinguer que les valeurs maximales des émissions de HC sont (356 ; 388 ; 437 ; 558) ppm pour les EM de poisson respectivement pour toutes les puissances analysées. Tandis que, les valeurs minimales de HC sont (101 ; 155 ; 177 ; 185) ppm des EM (HFU, eucalyptus, lentisque, lentisque) respectivement pour les puissances analysées.

Les résultats d'analyse statistique des émissions de HC ont été présentés dans la figure IV.4 pour les différentes puissances analysées. A partir d'analyse statistique, il a été constaté qu'il existe des corrélations positives entre les émissions de HC avec la viscosité cinématique (86,1% ; 84,2% ; 72,5% ; 68,8%), l'indice de cétane (51% ; 57,4% ; 66,7% ; 41,4%) , et négatives avec la densité (-75,5% ; -91,4% ; -89,9% ; -92%), le pouvoir calorifique(-75,5% ; -83,5% ; -32,6% ; -68,5%), et la température d'échappement (-63,3% ; -84,4% ; -68,2% ; -70,2%) respectivement pour les différentes puissances analysées, on remarque que l'IC et le PC sont mal corrélés (représentés) à des puissance 4,5 kW et 3,375 kW respectivement. L'explication de ces résultats, avec un pouvoir calorifique et une densité élevée soutenues par une viscosité cinématique moindre qui donnent une bonne combustion du mélange-air carburant, ce qui augmente la température de la chambre de combustion [179], cela va diminuer les émissions de HC par la combustion de la majorité du carburant.

D'après la figure IV.4, d'autres corrélations ont été observées de HC avec les PM (67,9% ; 85,7% ; 96,5% ; 83,4%), les CO (68,8% ; 84,8% ; 62,9% ; 97,9%), et négative avec les NOx (-77,6% ; -87,5% ; -60% ; -86,8%) respectivement pour les différentes puissances analysées. L'explication de ces résultats, comme toutes les émissions la température de la chambre de combustion et l'existence d'oxygène diminuent les HC.

Il est à prendre en compte que, les causes des émissions de CO recourent en partie celles qui provoquent la formation des HC. Tout comme le CO, l'extinction de la flamme à certains endroits (parois, volumes morts...), la présence de zones trop riches (mauvaise pulvérisation) entraîne la formation plus élevée des HC. Enfin, les risques de dépôts dans la chambre de combustion et de forte pénétration des biocarburants pourraient favoriser la formation des HC.

#### **IV.4.4. Les particules**

C'est un ensemble de « grains » de suie de très faible diamètre (0,1 à 0,3  $\mu\text{m}$  pour la majorité) et constitués d'une fraction soluble appelée SOF (*Soluble Organic Fraction*) et d'une fraction insoluble dite « fraction sèche ». Ils sont issus principalement de l'oxydation

des produits qui se retrouvent dans la combustion. Les SOF sont composés d'hydrocarbures lourds (aliphatiques, aromatiques et poly-nucléo-aromatiques) tandis que la fraction insoluble est composée d'acide sulfurique et de résidu solide qui constitue la suie véritable. La toxicité des grains de suie suscite une attention particulière sur les niveaux d'émission des particules. Leur respiration peut se révéler dangereuse pour les voies respiratoires.

De l'analyse des données des tableaux IV.2 et IV.4, on peut distinguer que les valeurs maximales des émissions de PM sont (7,47 ; 13,6 ; 26,3 ; 68,9) mg/s pour les EM de lentisque respectivement pour toutes les puissances analysées. Tandis que, les valeurs minimales de PM sont (1,06 ; 1,55 ; 2,76 ; 8,14) mg/s pour des EM de poisson respectivement pour les puissances analysées.

A partir d'analyse statistique (figure IV.4), il a été constaté qu'il existe des corrélations positives entre les émissions de PM avec la viscosité cinématique (70,2% ; 58,8% ; 70,2% ; 77,6%), l'indice de cétane (47,6% ; 54,2% ; 83,6% ; 32,6%) , et négatives avec la densité (-40,7% ; -71,7% ; -87,4% ; -60,7%), le pouvoir calorifique (-73,8% ; -78,5% ; -38,5% ; -56,9%), et la température d'échappement (-86% ; -99,5% ; -68,7% ; -93,2%) respectivement pour les différentes puissances analysées. De l'analyse statistique, on remarque que l'IC est mal représenté dans les puissances 1,125 et 4,5 kW, la densité est mal représentée à la puissance 1,125 kW, tandis que le PC est mal représenté à la puissance 3,375 kW. L'explication des résultats analyse, d'une part, la variation des résultats d'analyse et la mauvaise représentation sur les cercles de corrélation d'ACP est dû à la variété des matières premières analysées (animales, végétales et résidus), d'autre part, étant donné que les carburants oxygénés facilitent le processus d'oxydation de la suie ce qui réduit les émissions de PM [172]. En outre, la bonne combustion du mélange air-carburant favorise l'oxydation ce qui génère moins de PM.

La répartition entre les différents composants des particules varie en fonction des caractéristiques du carburant (teneur en soufre, comportement lors de la combustion), des conditions de fonctionnement, de la conception et du réglage du moteur. La concentration des particules est considérablement basse en comparaison à celle du diesel conventionnel, pour toutes les charges étudiées, et ce quel que soit le combustible primaire étudié en raison de valeur plus basse (négligeable) de soufre dans les biodiesels [169].

Le tableau IV.5 résume la majorité des corrélations existant entre les propriétés physico-chimique (densité, viscosité cinématique, pouvoir calorifique, indice de cétane, point d'éclair) et les réponses moteur (performances, combustion, émissions polluantes). Ces corrélations ont

été discutées précédemment les unes par rapport à l'autre, des interprétations ont été données, pour expliquer les tendances positives ou négatives à la combustion.

**Tableau IV.5 : Matrice de corrélations des 15 carburants testés dans un moteur Lister Petter (puissance 4,5 kW)**

Var	IC	Densité	Viscosité	PC	P Ecla	CSC	BTE	TE	riches	DA	DC	Pic P	CO	HC	NOx	PM
IC	<b>1</b>															
Densité	-0,792	<b>1</b>														
Viscosité	0,776	-0,681	<b>1</b>													
PC	-0,878	0,509	-0,829	<b>1</b>												
P Ecla	0,232	0,565	0,805	-0,765	<b>1</b>											
CSC	-0,602	0,608	0,932	-0,949	0,644	<b>1</b>										
BTE	0,666	0,045	-0,690	0,772	0,101	-0,827	<b>1</b>									
TE	-0,777	0,657	-0,720	0,591	-0,301	0,885	-0,818	<b>1</b>								
richesse	0,740	0,049	-0,191	0,200	0,058	-0,495	0,664	-0,497	<b>1</b>							
DA	-0,743	0,693	-0,507	0,684	-0,474	-0,952	0,765	0,943	0,054	<b>1</b>						
DC	0,619	-0,611	0,363	-0,640	0,203	0,934	-0,668	-0,960	-0,432	-0,895	<b>1</b>					
Pic P	-0,760	0,529	-0,748	-0,446	0,471	-0,913	0,806	0,915	-0,646	0,902	-0,849	<b>1</b>				
CO	0,586	-0,857	0,785	-0,782	-0,048	-0,205	0,289	-0,704	-0,172	-0,538	0,236	0,048	<b>1</b>			
HC	0,414	-0,920	0,688	-0,685	-0,695	-0,588	-0,153	-0,702	0,203	0,748	-0,366	-0,693	0,979	<b>1</b>		
NOx	-0,414	0,663	-0,709	0,572	0,536	0,049	0,655	0,930	0,167	-0,942	0,510	0,042	-0,875	-0,868	<b>1</b>	
PM	-0,581	-0,607	0,776	-0,569	0,472	0,645	-0,280	-0,932	-0,526	-0,360	0,111	0,781	0,814	0,834	-0,904	<b>1</b>

#### IV.5. Conclusion

Les biodiesels dérivés des 15 matières premières possèdent des propriétés physico-chimiques proches du carburant diesel standard. Très peu de biocarburants s'écartent de la plage prescrite spécifiée par les normes EN et ASTM du biodiesel, cependant, ces carburants ne détérioreront pas de manière significative aux performances et aux émissions du moteur. Des analyses statistiques des principales propriétés physico-chimiques des biocarburants ainsi que les réponses du moteur ont été discutées, pour donner un bref aperçu de la qualité du carburant et de la fiabilité de son utilisation dans un moteur diesel.

L'utilisation de carburant biodiesel dans le moteur réduit largement le rendement thermique du moteur en raison du pouvoir calorifique inférieur du biodiesel et de sa viscosité qui limite sa proportion à mélanger avec le diesel. Un autre paramètre de performance qui est gravement affecté par l'utilisation du biodiesel est la consommation de carburant spécifique. Les analyses descriptives et statistiques indiquent que l'utilisation du biodiesel augmente la consommation de carburant en raison de son viscosité élevée, son pouvoir calorifique moindre, et de l'existence d'oxygène dans la composition chimique. D'après l'analyse il a été conclu que le délai d'auto-inflammation s'évalue positivement avec la pression cylindrique et à la température d'échappement, cette tendance a été expliquée par si le délai d'auto-inflammation augmente, une grande quantité de carburant injectée réside dans la chambre de combustion pendant ce retard d'allumage, ce qui va influencer positivement sur le pic de pression et de la température de combustion.

Il est communément admis que l'utilisation du biodiesel réduit les émissions polluantes de CO et de HC à l'échappement du moteur. En raison de la teneur enrichi en oxygène et de la température de combustion élevée, le CO est converti en CO<sub>2</sub> tandis que les HC s'oxydent complètement. D'autre part, les mêmes raisons conduisent à des émissions élevées de NO<sub>x</sub> dans le moteur alimenté au biodiesel, ce qui explique les corrélations négatives entre le NO<sub>x</sub> est les autre émissions polluantes (CO ; HC ; PM). D'autres raisons attribuées à l'augmentation des NO<sub>x</sub> sont l'indice d'iode et l'indice de cétane élevé des carburants biodiesel. En outre, une réduction des émissions de fumée et de particules (PM) dans le moteur alimenté au biodiesel a été observée en raison de l'oxydation complète des précurseurs de suie et de l'élimination des zones locales riches en carburant.

# **Chapitre V : Modélisation de la combustion des biodiesel dans un MCI**



## V.1. Introduction

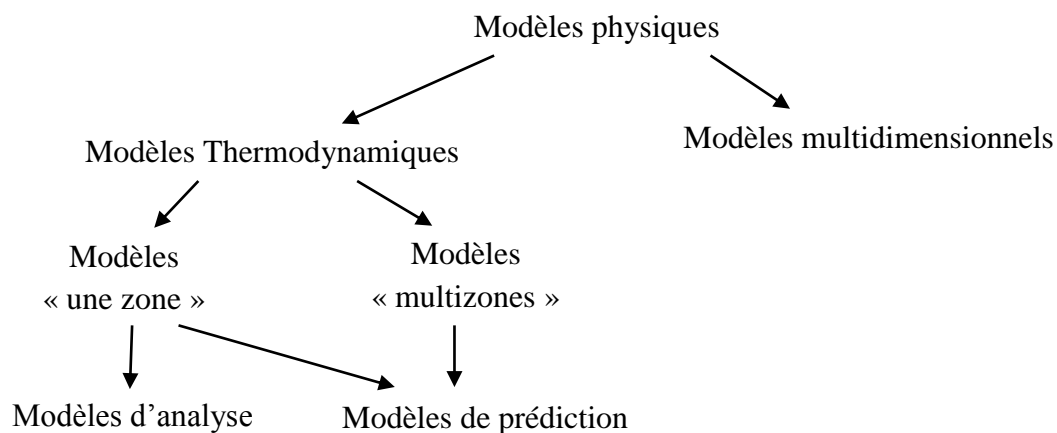
La modélisation du fonctionnement des moteurs à combustion interne consiste à la mise en place d'un code de calcul qui permet la compréhension des phénomènes physiques et chimiques qui se déroulent pendant les différentes phases du cycle moteur, surtout dans la phase de combustion. Aujourd'hui, une multitude de codes industriels dédiés à la simulation des moteurs sont disponibles sur le marché. Après une courte étude de leurs potentiels, l'accès et la modification du code source est très limité pour des raisons évidentes de propriété commerciale, en-plus le paramétrage de ce type de modèle nécessite la connaissance détaillée de la géométrie du moteur. Les enjeux de cette approche est de concevoir un code de calcul qui se base sur des modèles mathématiques existants, pour rendre la modélisation plus robuste.

Différents types de modèles mathématiques permettent de simuler le fonctionnement des moteurs à combustion interne, qu'ils soient les cycles des moteurs à allumage commandé (essence) ou à allumage par compression (diesel). Ces modèles peuvent être classés en deux grandes catégories principales : les modèles multidimensionnels et les modèles thermodynamiques appelés également zéro dimensionnels, car seul le temps intervient comme variable indépendante dans ce cas [246].

- Les modèles multidimensionnels : ils se basent sur le calcul de dynamique de fluide de l'écoulement des gaz à l'intérieur du moteur en prenant en compte la géométrie de la chambre de combustion. Ces modèles consistent à résoudre les équations de Navier-Stokes couplées à des modèles de turbulence. Ces modèles nécessitent des logiciels spéciaux comme KIVACHEMKIN ou CONVERGE. Cependant, la modélisation multidimensionnelle de tous ces processus, de la tubulure d'admission à la tubulure d'échappement, nécessite des temps de calcul importants et des ordinateurs très puissants. Pour cette raison, leur utilisation par les concepteurs de moteur n'est pas très pratique. De plus, ces codes ne sont pas parfaits et nécessitent un calibrage utilisant des données expérimentales [51]. Plusieurs chercheurs ont exploité des modèles multidimensionnels dans le but de faire des simulations plus robustes de la combustion dans les moteurs.
- Les modèles thermodynamiques : ils se basent sur les lois de la thermodynamique et consistent à appliquer les lois de conservation de la masse et de l'énergie sur le volume du cylindre. Cette catégorie se divise en deux sous catégories, les modèles mono-zone qui

consistent à étudier le cylindre comme un volume homogène de gaz et les modèles multizones appelées aussi modèles quasi-dimensionnels puisqu'ils divisent le cylindre en plusieurs zones de compositions chimiques et de températures d'équilibres différentes [51]. Ces modèles peuvent être utilisés soit pour prédire le fonctionnement du moteur (pression et température cylindre, puissance, rendement, éventuellement émissions polluantes) si une loi de combustion est spécifiée (modèle prédictif), soit pour analyser le dégagement de chaleur dû à la combustion à partir d'un diagramme expérimental de la pression cylindre (modèle d'analyse) [246]. Une schématisation graphique des modèles physiques est présentée sur la figure V.1.

Dans la présente étude, le modèle à une zone sera exploité pour analyser les effets de fonctionnement sur les performances, la combustion et les émissions polluants d'un moteur LISTER PETTER alimenté en diesel standard et en biodiesels à base (des huiles de friture usagées ; des huiles de palm ; des graisses animales ; et les mélanges de B10, B20 et B30 des eaux usées des pressoirs à olives).



*Figure V.1 : Synthèse des modèles physiques utilisés dans les MCI [246]*

## V.2. Modèle thermodynamique

### V.2.1. Hypothèses du modèle

Le modèle adopté dans cette étude se base sur les hypothèses suivantes :

1. Les gaz à l'intérieur du cylindre sont entièrement mélangés et considérés comme une seule entité homogène en composition et propriétés pendant les quatre temps du cycle moteur (admission, compression, détente, échappement).
2. Dans la phase de combustion, le mélange air-carburant est supposé entièrement brûlé (la chambre de combustion se traite comme une seule zone).

3. Tous les gaz sont considérés comme des gaz parfaits pendant le cycle thermodynamique.
4. La pression cylindrique est considérée identique pour toute la zone de combustion.
5. La température de parois de cylindre est considérée uniforme et constante [51, 246].
6. Il n'y a pas de fuites dans le système, les seuls échanges de gaz à considérer avec l'extérieur sont à travers les soupapes pendant les phases d'admission et d'échappement.

### V.2.2. Equations du modèle

Les équations du modèle thermodynamique régissant le modèle à une zone [51, 175, 246-248] sont l'équation de conservation d'énergie, la loi des gaz parfaits, la loi de conservation de la masse, l'évolution des volumes et différents sous modèles permettant la simulation du cycle thermodynamique.

- Equation des gaz parfaits

$$P.V = m.r.T \quad (V.1)$$

- Equation de conservation de la masse

$$dm = dm_a - dm_e \quad (V.2)$$

Avec  $m$ ,  $m_a$  et  $m_e$  sont la masse des gaz à l'intérieur du cylindre, la masse d'air d'admission et la masse des gaz d'échappement respectivement.

- Equation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation d'énergie pour un système ouvert est donnée par :

$$m.C_v.dT = -P.dV - \sum dQ_{paroi} + dQ_{comb} - u.dm + h_a.dm_a - h_e.dm_e \quad (V.3)$$

$P$  est la pression à l'intérieur du cylindre et  $T$  est la température des gaz dans le cylindre,  $u$ ,  $h_a$  et  $h_e$  sont l'énergie interne des gaz à l'intérieur du cylindre et les enthalpies massiques de l'air d'admission et des gaz d'échappement respectivement.

#### V.2.2.1. Modèle de calcul du volume

Le volume de la chambre de combustion ( $V$ ), il est calculé à partir du modèle cinématique de mouvement du piston à l'intérieur du cylindre, en fonction d'angle de rotation du vilebrequin, il est donnée par :

$$V(\theta) = V_m + \frac{C_u}{2} \cdot \left( 1 + \lambda - \cos \theta - \sqrt{\lambda^2 - \sin^2 \theta} \right) \quad (V.4)$$

Où  $V_m$  est le volume mort du cylindre,  $C_u$  est la cylindrée unitaire et  $\lambda$  est le rapport entre la longueur de la bielle et le rayon manivelle, et  $\theta$  est l'angle de rotation du vilebrequin en radians. Si l'angle  $\theta$  est exprimé en degré l'équation V.4 devient :

$$V(\theta) = V_m + \frac{C_u}{2} \left( 1 + \lambda - \cos\left(\frac{\pi}{180}\theta\right) - \sqrt{\lambda^2 - \sin^2\left(\frac{\pi}{180}\theta\right)} \right) \quad (\text{V.5})$$

En dérivant l'équation (V.5), on obtient :

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{C_u}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{180}\theta\right) \cdot \left( 1 + \frac{\cos\left(\frac{\pi}{180}\theta\right)}{\sqrt{\lambda^2 - \sin^2\left(\frac{\pi}{180}\theta\right)}} \right) \quad (\text{V.6})$$

### V.2.2.2. Modèle de calcul de la chaleur massique à volume constant

La chaleur massique à volume constant des gaz dans le cylindre ( $C_v$ ), est exprimée en fonction de la température et de la composition chimique du mélange.

$$\begin{cases} C_v = \frac{1}{m} \sum_i m_i C_v^i \\ C_v^i = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 \end{cases} \quad (\text{V.7})$$

En considérant que la chaleur massique de chacun des composants  $C_v^i$  du mélange est un polynôme de degré 4 (équation V.7), dont les coefficients sont représentés dans le tableau V.1 [175, 248].

**Tableau V.1 : Coefficients utilisés pour calculer  $C_v$**

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
<b>O<sub>2</sub></b>					
<b>300-1000 K</b>	5.7494843E-01	2.9293514E-04	-1.4955197E-07	3.4136175E-10	-2.2781799E-13
<b>1000-5000 K</b>	7.0086448E-01	1.5940001E-04	-3.2706289E-08	4.6124019E-12	-2.9526012E-16
<b>N<sub>2</sub></b>					
<b>300-1000 K</b>	7.1965895E-01	4.1814681E-04	-1.1767938E-06	1.6751270E-09	-7.2594701E-13
<b>1000-5000 K</b>	6.0919053E-01	4.4182283E-04	-1.6879677E-07	2.9980991E-11	-2.0052629E-15
<b>CO<sub>2</sub></b>					
<b>300-1000 K</b>	1.7019589E-01	1.8748206E-03	-1.9668486E-06	1.2974915E-09	-4.0006968E-13
<b>1000-5000 K</b>	5.8171981E-01	5.9334902E-04	-2.4156147E-07	4.5235643E-11	-3.1939610E-15
<b>H<sub>2</sub>O</b>					
<b>300-1000 K</b>	1.3045322E+00	1.6050556E-03	-2.9351635E-06	3.2187101E-09	-1.1577651E-12
<b>1000-5000 K</b>	9.7442159E-01	1.4116678E-03	-4.0324101E-07	5.5472689E-11	-2.9522173E-02

Les  $m_i$  sont les masses de chacun des composants du mélange résultant à chaque instant de la combustion du carburant. Les  $m_i$  sont calculés à partir de la réaction chimique de combustion [51, 175]

### V.2.2.3. Modèle de calcul de dégagement de chaleur

Le modèle d'analyse utilisé pour calculer de dégagement de chaleur est basé sur le premier principe de la thermodynamique. Le dégagement de chaleur du cycle moteur est calculé par la méthode initialement proposée par Krieger et Borman [249]. Dans l'hypothèse que la chambre de combustion contient un mélange homogène de gaz parfaits ayant atteint l'équilibre thermodynamique. L'application de la loi de conservation de l'énergie sur la partie fermée du cycle pendant la période où les soupapes sont fermées (c'est à dire entre la fermeture de la soupape d'admission et l'ouverture de la soupape d'échappement), donne l'expression suivante :

$$dQ_{comb} = m.C_v.dT + P.dV + dQ_p + \frac{dm_f}{d\theta} h_f \quad (V.8)$$

Avec  $Q_{comb}$  est la chaleur dégagée par la combustion,  $h_f$  est l'enthalpie des gaz,  $Q_p$  est la chaleur perdu à travers les parois du cylindre.

D'après Heywood [247] la quantité chaleur de combustion des fuites des gaz ne dépasse pas 2% de la quantité de carburant injectée. En négligeant ces fuites et en appliquant la loi des gaz parfaits à l'équation précédente (eq. V.8), on obtient :

$$\frac{dQ_{comb}}{d\theta} = \frac{C_v}{r} V \cdot \frac{dp}{d\theta} + \left(\frac{C_v}{r} + 1\right) P \cdot \frac{dV}{d\theta} + \frac{dQ_p}{d\theta} \quad (V.9)$$

La discrétisation de cette équation selon un simple schéma d'Euler, donne un système d'équations algébriques à résoudre pas à pas sur des intervalles de degré du vilebrequin. Ainsi on obtient le profil du taux de dégagement de chaleur global instantané par la combustion du carburant et le profil du dégagement de chaleur cumulé.

### V.2.2.4. Modèle de calcul de la chaleur perdue à travers des parois du cylindre

Durant tous les temps du cycle moteur, surtout dans la phase de combustion, le mouvement des gaz à l'intérieur de la chambre de combustion et la variation de température provoquent un échange de chaleur avec les parois du cylindre. Ceci peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \sum \frac{dQ_{paroi}}{d\theta} = \sum \frac{dQ_{paroi}}{dt} \frac{dt}{d\theta} \\ \sum \frac{dQ_{paroi}}{dt} = h_c \cdot A \cdot (T - T_{paroi}) \\ \frac{dt}{d\theta} = \frac{1}{6N} \end{cases} \quad (V.10)$$

Où  $h_c$  est le coefficient d'échange de chaleur par convection,  $A$  est la surface des parois du cylindre,  $N$  est la vitesse de rotation du moteur,  $T$  et  $T_{paroi}$  sont la température des gaz et la température des parois respectivement.

### V.2.2.5. Modèle de calcul du coefficient d'échange de chaleur

Il existe plusieurs approches possibles pour calculer le coefficient d'échange de chaleur par convection, qui sont regroupées en approches empiriques et approches semi-empiriques.

#### a) Modèles empiriques

Les premiers modèles de calcul de coefficient de convection thermique sont développés sur des bases purement empiriques, ils ont adopté l'hypothèse de la convection naturelle. Le coefficient de transfert de chaleur est alors écrit sous la forme adimensionnelle :

$$Nu = Cste.(Gr.Pr)^n \quad (V.11)$$

Où  $Nu$  est le nombre de Nusselt,  $Pr$  et  $Gr$  sont les nombres de Prandtl et de Grashof.

Le premier modèle empirique de transfert thermique des moteurs était celui présenté par Nusselt en 1923 (cité par Boreman et Nishiwaki 1987 [250]). Il consiste en une corrélation empirique obtenue à partir des expériences réalisées en une bombe sphérique et en se référant aux données de moteurs réels, il a présenté le coefficient de transfert de chaleur  $h_c$ , qui était la somme du composant convectif (premier terme) et du composant radiatif (deuxième terme), dans l'expression suivante:

- Corrélation de Nusselt [240]

$$h_c = 1,15 \cdot (1 + 1,24 \cdot \overline{U}_p) (P^2 T)^{1/3} + 0,0004206 \cdot \frac{\left[ \frac{T}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_p}{100} \right]^4}{T - T_p} \quad (V.12)$$

Avec  $\overline{U}_p$  est la vitesse moyenne du piston ;  $P$  est la pression cylindrique ;  $T$  et  $T_p$  sont la température instantanée des gaz dans le cylindre et la température de la paroi du cylindre respectivement.

En 1931 Brilling a suivi et modifié le modèle de Nusselt pour l'accorder aux flux de chaleur globaux mesurés sur un moteur Diesel.

- Corrélation de Brilling [51]

$$h_c = 1,15 \cdot (3,5 + 0,185 \cdot \bar{U}_p) (P^2 T)^{1/3} \quad (\text{V.13})$$

Eichelberg a effectué la première mesure du flux de chaleur instantané. Des essais conduits sur des moteurs diesel à 2 et 4 temps de fort alésage l'amènent à réduire l'influence de la vitesse moyenne du piston dans la formule de Nusselt. Cette corrélation est bien classée dans cette famille, elle donne une bonne estimation du transfert de chaleur.

- Corrélation d'Eichelberg [251]

$$h_c = 7,67 \cdot 10^{-3} (\bar{U}_p)^{1/3} (P \cdot T)^{1/2} \quad (\text{V.14})$$

#### b) Modèles Semi-empiriques

Les formulations semi-empiriques de calcul du coefficient de convection sont obtenues par application des lois déduites de l'analyse dimensionnelle du processus de convection turbulente dans des configurations plus simples telles que les écoulements dans des conduites ou parfois même sur des plaques planes.

Ce recours à l'analyse dimensionnelle constitue une base mieux fondée. Le nombre de paramètres à déterminer par l'expérience est ainsi réduit. Le coefficient de convection est alors exprimé par des relations entre groupement adimensionnels du type [51] :

$$Nu = a \cdot Re^m \cdot Pr^n$$

$$Nu = \frac{h_c L}{k}; \quad Re = \frac{\rho U L}{\mu}; \quad Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (\text{V.15})$$

Avec  $\frac{k}{k_r} = \left( \frac{T}{T_r} \right)^x; \quad \frac{\mu}{\mu_r} = \left( \frac{T}{T_r} \right)^y$

Ou  $Re$  et  $Pr$  sont les nombres de Reynolds et Prandtl respectivement ;  $L$  est une longueur caractéristique de l'écoulement, elle sera prise comme diamètre du cylindre (m) ;  $U$  est la vitesse moyenne des gaz à l'intérieur du cylindre (m/s) ;  $k_r$  et  $\mu_r$  sont respectivement des valeurs de la conductivité thermique et de la viscosité du gaz à une température de référence  $T_r$ .

L'application de la loi du gaz parfait à l'équation (V.15), le nombre de Prandtl est considéré constant pour les gaz, et  $\rho = \frac{P}{rT}$ , donc l'équation (V.15) devient [247] :

$$h_c = A.D^{m-1} P^m U^m T^{0,75-1,62m} \quad (\text{V.16})$$

Différentes valeurs de l'exposant  $m$  ont été proposées par plusieurs auteurs, par exemple,  $m = 0,5$  pour Elser et Oguri ;  $0,7$  pour Annand et Sitkei ;  $0,75$  pour Taylor et Toong ; et  $0,8$  pour Woschni et Hohenberg [247, 250]. A l'exception de la corrélation de Woschni, la plupart de ces corrélations utilisent une moyenne sur le temps de la vitesse des gaz, proportionnelle à la vitesse moyenne de piston. Cependant, Woschni a séparé la vitesse du gaz en deux parties : la vitesse des gaz sans combustion, qui est proportionnelle à la vitesse moyenne de piston, et une vitesse des gaz dépendant du temps, induite par la combustion, qui est une fonction de la différence entre les pressions avec et sans combustion [246].

- Corrélation de Woschni [247, 248]

$$\begin{cases} h_c = 3,26 P^{0,80} U^{0,80} D^{-0,20} T^{-0,55} \\ U = C_1 \bar{U}_p + C_2 T_r \frac{V}{V_r} \frac{(P - P_m)}{P_r} \end{cases} \quad (\text{V.17})$$

**Tableau V.2 :** Coefficient C1 et C2 de la corrélation de Woschni

Phase	C <sub>1</sub> [-]	C <sub>2</sub> [m/s.K]
Admission, Echappement	6,18	0
Compression	2,28	0
Combustion-Détente	2,28	3,24.10 <sup>-3</sup>

Où  $U$ ,  $P$  et  $D$  sont la vitesse moyenne des gaz dans le cylindre (m/s), la pression instantanée dans le cylindre (kPa) et le diamètre du cylindre(m) respectivement ;  $\bar{U}_p$  est la vitesse moyenne du piston ;  $V$  est le volume déplacé ;  $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes qui dépendent de la course du cycle (voir tableau IV.2) ;  $P_r$ ,  $T_r$  et  $V_r$  sont la pression, la température et le volume du mélange gazeux à un certain état de référence (au moment de la fermeture de la soupape d'admission).

- Corrélation de Hohenberg [247]

$$h_c = 130.C_u^{-0,06}.P^{0,8}.T^{-0,4}(1,4 + \bar{U}_p)^{0,8} \quad (\text{V.18})$$

- Corrélation de Sitkei (cité par S. Awad [51])

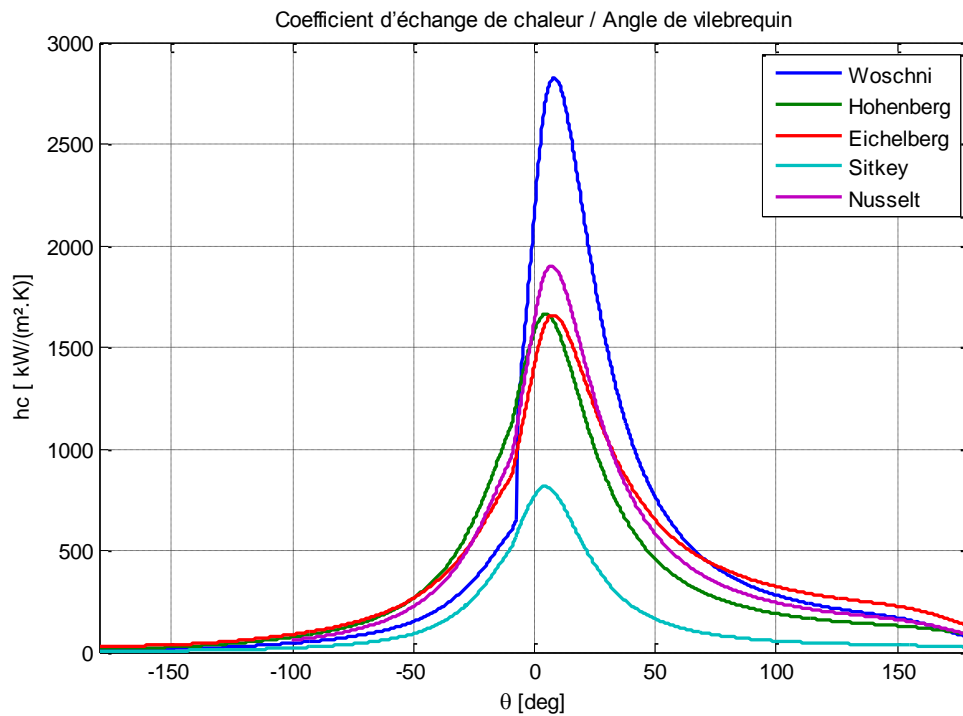
$$h_c = 2,36.10^{-4} \cdot (1 + b) \cdot \frac{(P \cdot \bar{U}_p)^{0,7} \cdot D^{0,3}}{T^{0,2} \cdot (4 \cdot V)^{0,3}} \quad (\text{V.19})$$

Avec  $b = 0$  à  $0,35$ ,  $D$  diamètre l'alésage,  $\bar{U}_p$  vitesse moyenne de piston,  $V$  est le volume instantané.



### c) Choix du modèle de transfert thermique

L'évaluation de coefficient d'échange thermique par convection en fonction d'angle de vilebrequin a été réalisée à partir des différentes corrélations citées précédemment en utilisant le signal de pression prélevé du moteur Diesel Lister-Petter. Le signal de pression a été pris à plein charge à un régime de 1500 tr/min, quand le moteur est alimenté en diesel standard.



*Figure V.2 : Comparaison des modèles de calcul du coefficient de transfert thermique sur le moteur LISTER PETTER*

Les profils de l'évolution du coefficient d'échange thermique par convection selon les différentes corrélations sont représentés dans la figure V.2, dont lequel on peut tirer les interprétations suivantes :

- Woschni : Le profil de cette loi est plus aigüe et ayant un modèle de transfert thermique qui a la pic la plus élevée. Contrairement aux autres lois, cette corrélation donne une estimation de chaque temps du cycle moteur. Elle surestime le coefficient de transfert thermique durant la combustion par la vitesse moyenne du gaz dans le cylindre, dont la nécessité de connaître la pression entraînée et les variables thermodynamiques d'état (P, V, T) à un de référence.

- Nusselt : Le deuxième pic de coefficient d'échange thermique a été enregistré par cette corrélation. Dans cette corrélation le coefficient de transfert de chaleur a été calculé en fonction de deux termes convectif et radiatif.
- Hohenberg : Ce modèle est le plus récent et donne une courbe plus étendue que celle de Woschni. Dans cette corrélation la vitesse locale l'air est exprimée en fonction de la pression ; de la température ; et de la vitesse moyenne du piston, cette corrélation est validée par plusieurs moteurs diesel à injection directe.
- Eichelberg : La courbe de ce modèle est presque identique que celle de modèle de Hohenberg, avec une légère avance de la courbe du modèle de Hohenberg (figure V.2). Eichelberg est le premier qui à utiliser des thermocouples de surface et à mesuré la densité locale et instantanée du flux de chaleur, sur ces essais, il a réduit l'influence de la vitesse moyenne du piston de la formule de Nusselt.
- Sitkey : Le coefficient de transfert thermique est sous-estimé durant toutes les phases du cycle. Cette corrélation donne la pic de pression la plus basse.

A partir de cette comparaison, le coefficient d'échange thermique entre les gaz et les parois du cylindre ( $h_c$ ) utiliser dans notre étude est la corrélation de Woschni, puisque quelle donne des bonnes résultats en termes convection thermique. Donc le choix d'une loi de transfert de chaleur entre les gaz et les parois du cylindre dépend largement du type de moteur utilisé et des mesures des variables thermodynamiques d'état (pression, volume, température).

#### V.4. Résultats et discussions

Une fois que le biodiesel est produit et jugé comme acceptable, il doit d'être utilisé comme carburant sur les moteurs diesel, des essais ont été menés sur le banc d'essais moteur de l'IMT de Nantes. Ce banc d'essais est équipé d'un moteur diesel monocylindre à quatre temps de marque Lister Petter, dont les caractéristiques sont représentées dans le tableau V.3.

Pour tester l'influence des propriétés physico-chimiques sur la combustion du biodiesel dans un MCI, un code de calcul du modèle thermodynamique a été écrit en Matlab, sept carburants ont été testés. Ces carburants sont subdivisés en diesel standard ; six biodiesels extraits à partir : des huiles de friture usagée (HFU) ; des huiles de palme (HP) ; et des graisses animales (GA) ; et trois mélanges issus des eaux usées des pressoirs à olives (EUPO10 ; EUPO20 ; EUPO30). Les propriétés des six biodiesels ainsi que le diesel standard sont représentées dans le tableau V.4.

**Tableau V.3. Spécification du moteur Lister Petter.**

<b>Lister Petter – Série TS1</b>	
Informations générales	4 temps, aspiration naturelle
Nombre de cylindres	1
Système de refroidissement	Refroidi par air
Course	88,94 mm
Alésage	95,5 mm
Longueur de la bielle	165,3 mm
Taux de compression	18: 1
Puissance maximale	4,5 kW à 1500 tr/min
Volume balayé	630 cm <sup>3</sup>
Avance à l'injection	13° de vilebrequin avant le PMH
La pression d'injection	250 bars

**Tableau V.4 : Propriétés des biodiesels et de Diesel standard.**

<b>Carburants</b>	<b>Viscosité cinématique (mm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Densité (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>PC (MJ/kg)</b>	<b>IC</b>	<b>PE (°C)</b>
Diesel standard	2,3	800	43,45	51	59,85
HFU	4	860	38,152	56,1	159,85
EUPO10%	1,9	832,79	42,91	57,88	77
EUPO20%	2,22	838,75	42,46	56,12	74
EUPO30%	2,58	846,75	41,87	56,63	73
Huiles de palme	11,1	900	40,5	51	
Graisses animales	5,13	870	40	53	

#### V.4.1. Analyse de la combustion

Afin d'analyser les caractéristiques de la combustion, il est nécessaire de suivre l'évolution de la pression dans le cylindre car la mesure de cette pression fournit les informations nécessaires pour interpréter le processus de combustion. Pour cela, il est indispensable d'analyser les phénomènes qui se produisent dans la chambre de combustion depuis l'injection de carburant jusqu'à la fin de la combustion. Des essais moteurs ont été effectués à un régime moteur constant de 1500 tr/min pour deux puissances du moteur 1,13 et 4,5 kW correspondant à environ 25 % et 100 % de la puissance du moteur à pleine charge. Les mesures de la pression cylindre et de la pression d'injection sont mesurées à chaque 0,5 °V pour le biodiesel de palme ; 0,1 °V pour le biodiesel des graisses animales ; et 0,2 °V pour les autres biodiesels.

#### V.4.1.1. Pression cylindre

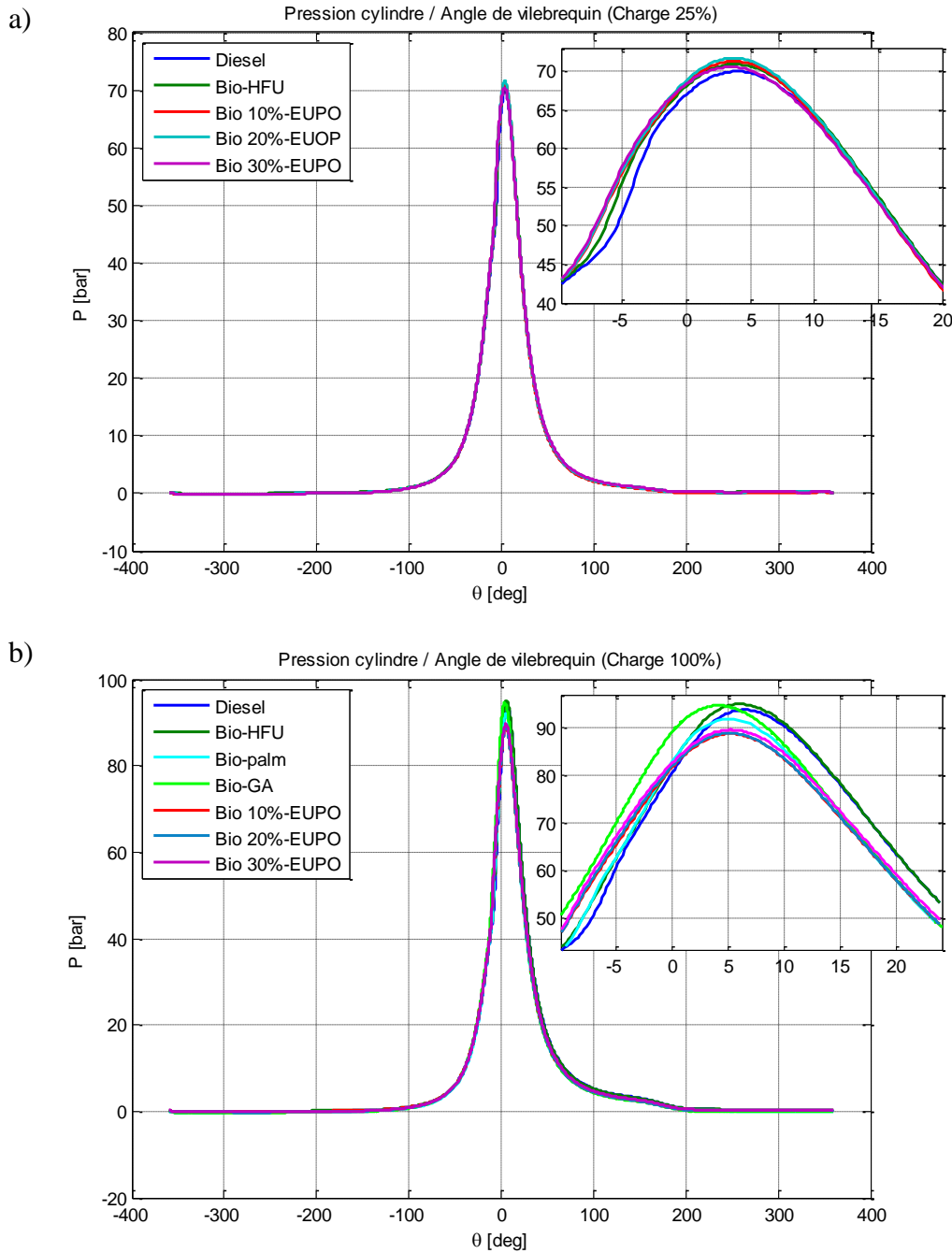
L'évolution de la pression cylindrique en fonction d'angle de vilebrequin, nous permet de décrire le déroulement de la combustion pendant un cycle moteur et d'estimer le début de combustion pour déduire quel carburant brûle mieux que l'autre.

La figure IV.3 (a) et (b) présente la variation de la pression cylindrique en fonction d'angle de vilebrequin à faible et pleine charge du moteur pour les carburants étudiés. On constate que, dans les mêmes conditions de charge du moteur, les courbes des pressions cylindres des biodiesels et de ses mélanges sont comparables à celles du carburant diesel. Lorsque la charge du moteur augmente, la pression maximale du cylindre augmente et se produit des pics de pression plus loin du point mort haut (PMH), à faible charge les pics de pression sont enregistrés entre 3,2 à 4 °V, tandis qu'à pleine charge ils sont entre 4 à 6 °V, ce qui permet d'éviter le problème de cognement.

À faible charge (25% de charge moteur) le moteur développe une puissance de 1,125 kW, les valeurs des pics de pression sont de 69,9625 ; 70,9095 ; 71,2784 ; 71,6911 et 70,5111 bars respectivement pour le diesel ; HFU, EUPO10 ; EUPO20 et EUPO30. Il est remarqué que l'écart entre les pics de pression n'est pas important (1.7286 bars).

À pleine charge (100% de charge moteur) le moteur développe une puissance de 4,5 kW, les valeurs des pics de pression sont de 93,8140 ; 95,0308 ; 88,8177 ; 88,9822 ; 89,6554 ; 94,7518 et 91,9838 bars respectivement pour le diesel ; HFU, EUPO10 ; EUPO20 ; EUPO30 ; GA et le B100 du Palme. Il est observé que l'écart entre les pics de pression devient plus ou moins important (6.2131 bars).

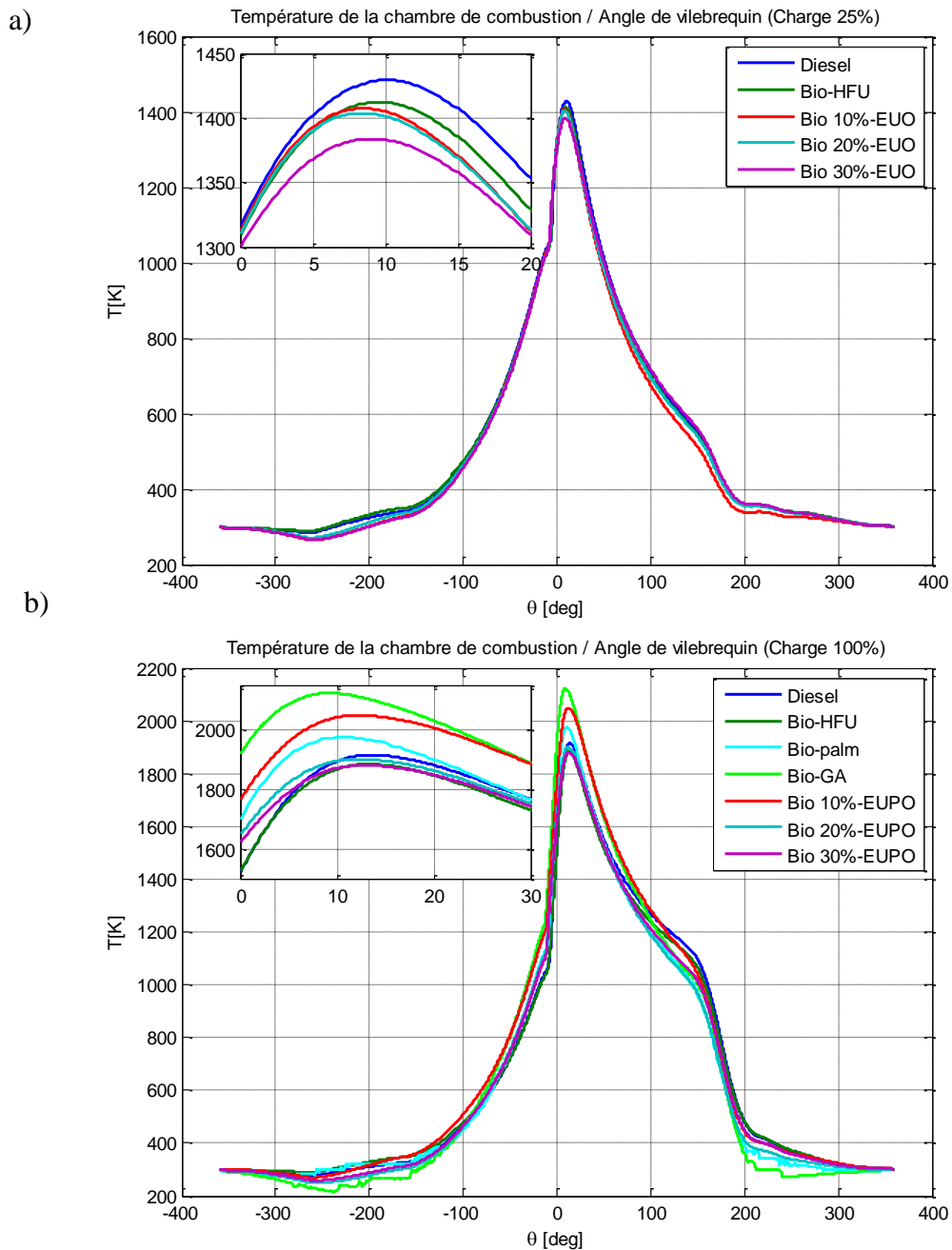
Pour le biodiesel, la faible volatilité conduit à une mauvaise atomisation et mélange avec l'air, ce qui implique un retard au début de la combustion, mais cela est traité par un indice de cétane élevé, ce qui réduit considérablement le délai d'auto-inflammation. Cependant, une légère avance vers le PMH de la pic de pression du biodiesel par rapport au diesel pour toutes les charges a été constatée, ce qui permet de provoquer un problème de cognement du moteur, ceci affecte donc la durabilité du moteur, heureusement cette avance est toujours avant le PMH, dans la présente étude le pic reste à 3,2 degré de vilebrequin loin du PMH. De plus, à des charges inférieures du moteur, les températures de la paroi et du gaz résiduel diminuent, entraînant une température de charge inférieure au moment de l'injection, par conséquent, le délai d'auto-inflammation est étendu [203].



**Figure V.3 :** Evolution de la pression cylindrique en fonction de l'angle vilebrequin

La température de combustion cède les informations sur l'efficacité de la combustion. Le pic de température dépend de la fraction de combustible brûlé pendant la phase initiale de combustion. A faible charge, les valeurs des pics de température sont respectivement de 1429 ; 1412 ; 1407 ; 1404 ; et 1384 K respectivement pour le diesel ; HFU, EUPO10 ; EUPO20 et EUPO30 (figure V.4.a). Il est remarqué que l'écart des pics de température entre EUPO10 et EUPO20 est presque négligeable. Tandis que à pleine charge, les valeurs des pics de température sont de 1915 ; 1880 ; 2047 ; 1898 ; 1880 ; 2123 ; et 1975 K respectivement pour le diesel ; HFU, EUPO10 ; EUPO20 ; EUPO30 ; GA et le B100 du Palme (figure V.4.b). Il est

observé que l'écart des pics de température entre EUPO10 et EUPO20 devient important, en outre l'HFU et EUPO30 ont enregistré la même valeur maximale de température.



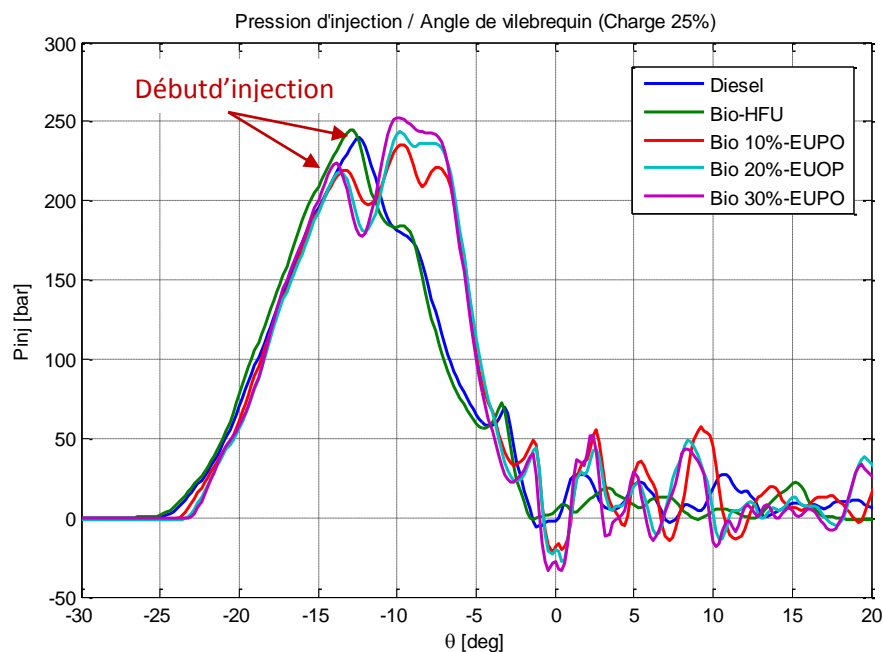
**Figure V.4 :** Evolution de la température cylindrique en fonction de l'angle vilebrequin

#### V.4.1.2. Début de l'injection et début de combustion

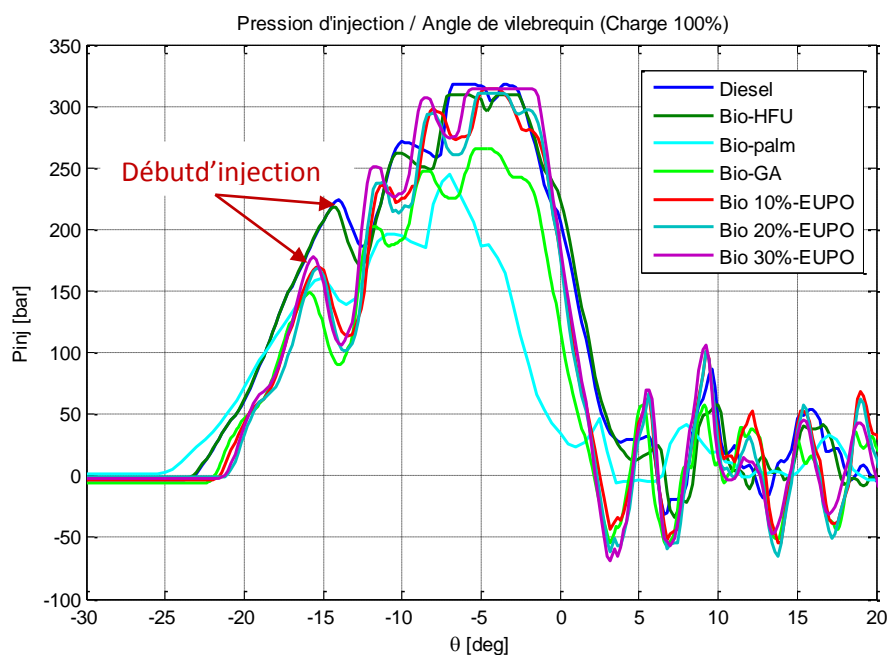
L'injection des combustibles dans la chambre de combustion est réalisée à l'aide d'un système d'injection classique (pompe mécanique, injecteur). L'aiguille du cône de l'injecteur est maintenue sur son siège par la pression de tarage de l'injecteur, l'injection a lieu quand la pression devient suffisante pour soulever cette aiguille. La figure V.5 présente les courbes de pression d'injection des carburants analysés (pétrole-diesel ; 3 biodiesel purs ; et 3 mélange

d'EM EUPO). A partir des courbes de pression d'injection, le début de l'injection de chaque carburant peut être estimé comme le premier sommet identifié sur la courbe suivi par une chute de la pression d'injection.

a)



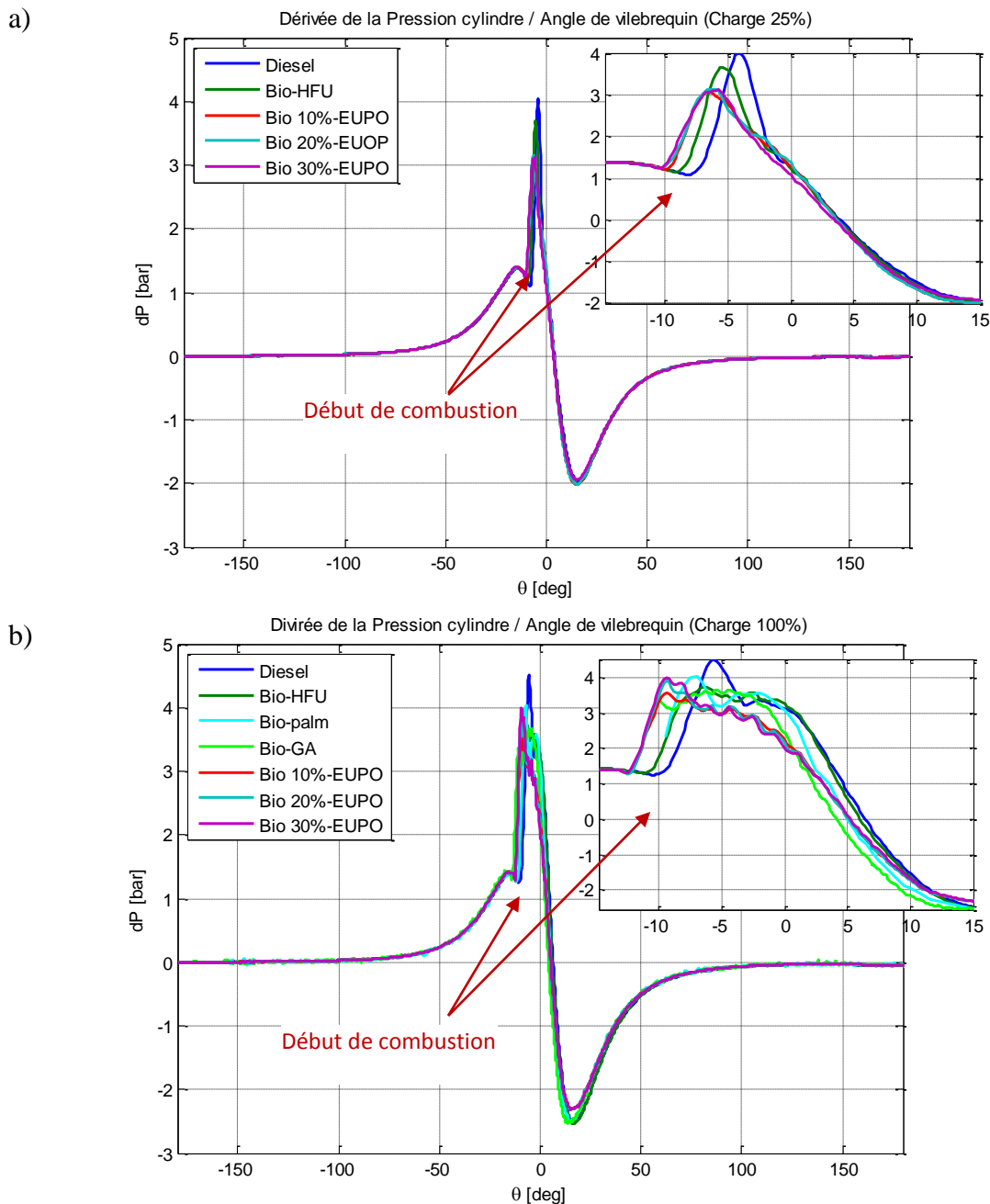
b)



**Figure V.5** : Courbes de pression d'injection à faible et pleine charge moteur.

L'analyse de la courbe de la dérivée de pression (figure IV.6), calculée à partir de la pression cylindrique, permet d'estimer le début de la combustion de chaque carburant. Le début de la combustion est localisé au dernier minimum local avant le pic de combustion dans le signal dérivé de la pression (figure IV.6). Il est à noter que le signal de pression donné par le

système d'acquisition nécessite un lissage avant d'être exploité, surtout pour sa dérivation. En revanche, la dérivée de la pression offre l'avantage d'éviter toute hypothèse supplémentaire. Cependant, l'utilisation de la méthode basée sur le dégagement de chaleur, conduit à introduire des hypothèses supplémentaires qui peuvent engendrer des erreurs dans la détermination du début de la combustion. En outre, il est constaté que les biodiesel et ses mélanges ont un démarrage de combustion plus rapide que le diesel standard, cela est expliqué par l'existence d'oxygène dans la composition des biodiesel qui favorise la vaporisation du mélange air carburant, ainsi que l'indice de cétane élevé des biodiesels



**Figure V.6 :** Courbes de la dérivée de la pression du cylindre à faible et pleine charge moteur



### V.4.1.3. Taux de dégagement de chaleur

L'analyse de la courbe du dégagement de chaleur est très important pour analyser l'opération de combustion dans le quelle on peut extraire le délai d'auto-inflammation ; la durée de combustion et l'énergie dégagée par le système etc. Pour analyser les différentes phases de l'opération de combustion facilement, le filtrage du signale de pression cylindre est indispensable, dans lequel le calcul de l'énergie dégagé par le système dépend.

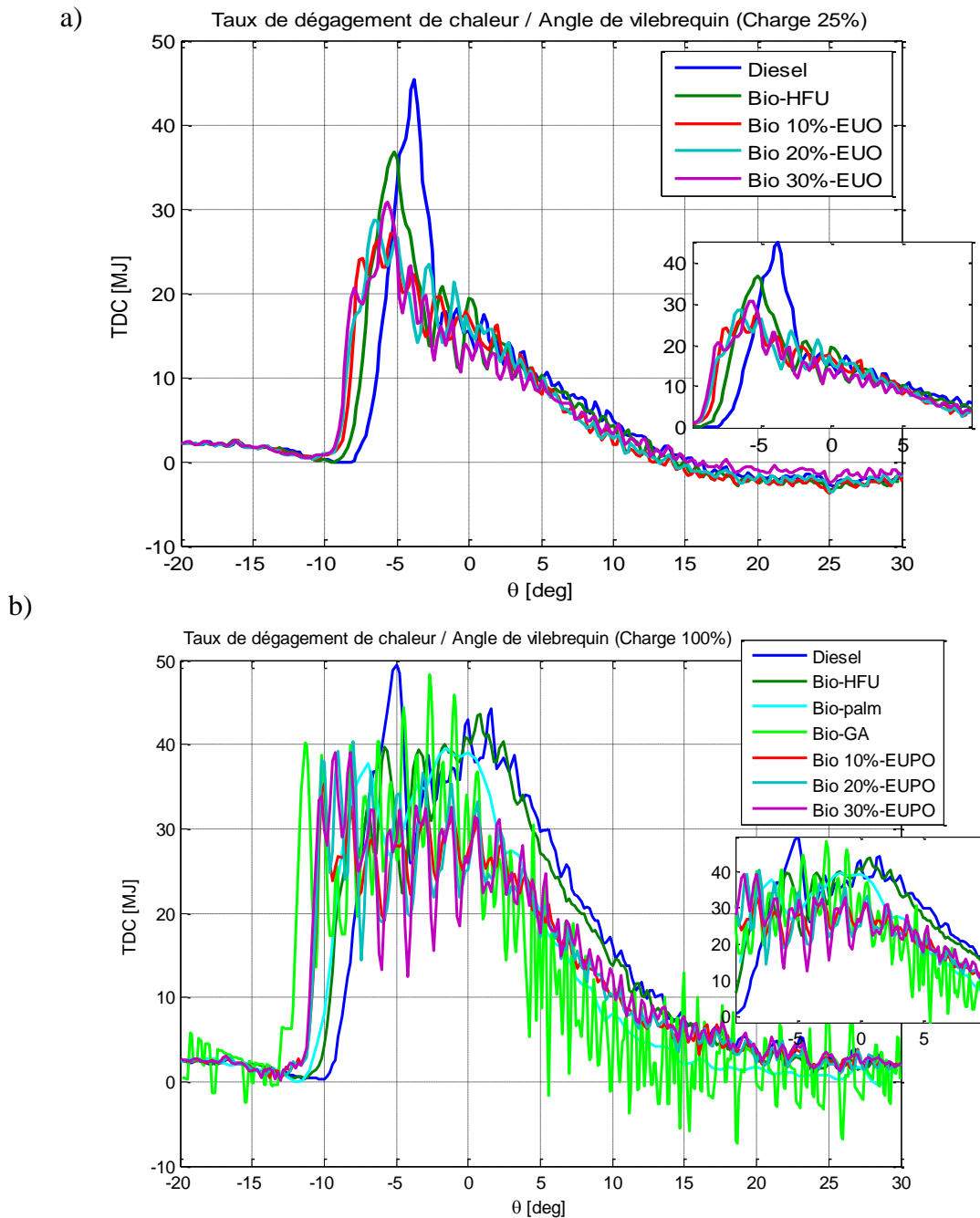


Figure V.7 : Taux de dégagement de chaleur en faible et pleine charge moteur sans filtrage du signale de pression cylindre

Le signal de pression donné par le banc d'essai est un signal qui comporte des bruits pour le filtrer la méthode de Savitzky-Golay (SG) a été utilisée. Le filtre de lissage SG est considéré comme un type de filtrage numérique à réponse impulsionnelle finie (FIR), représenté par des équations polynomiales. Basé sur la méthode des moindres carrés, le filtre SG est généralement utilisé pour lisser un signal bruité dont la gamme de fréquence du signal sans bruit est grande. Dans ce type d'application, le filtre SG fonctionne mieux que les filtres FIR standard, car ceux-ci tendent à atténuer une partie significative des hautes fréquences du signal avec du bruit.

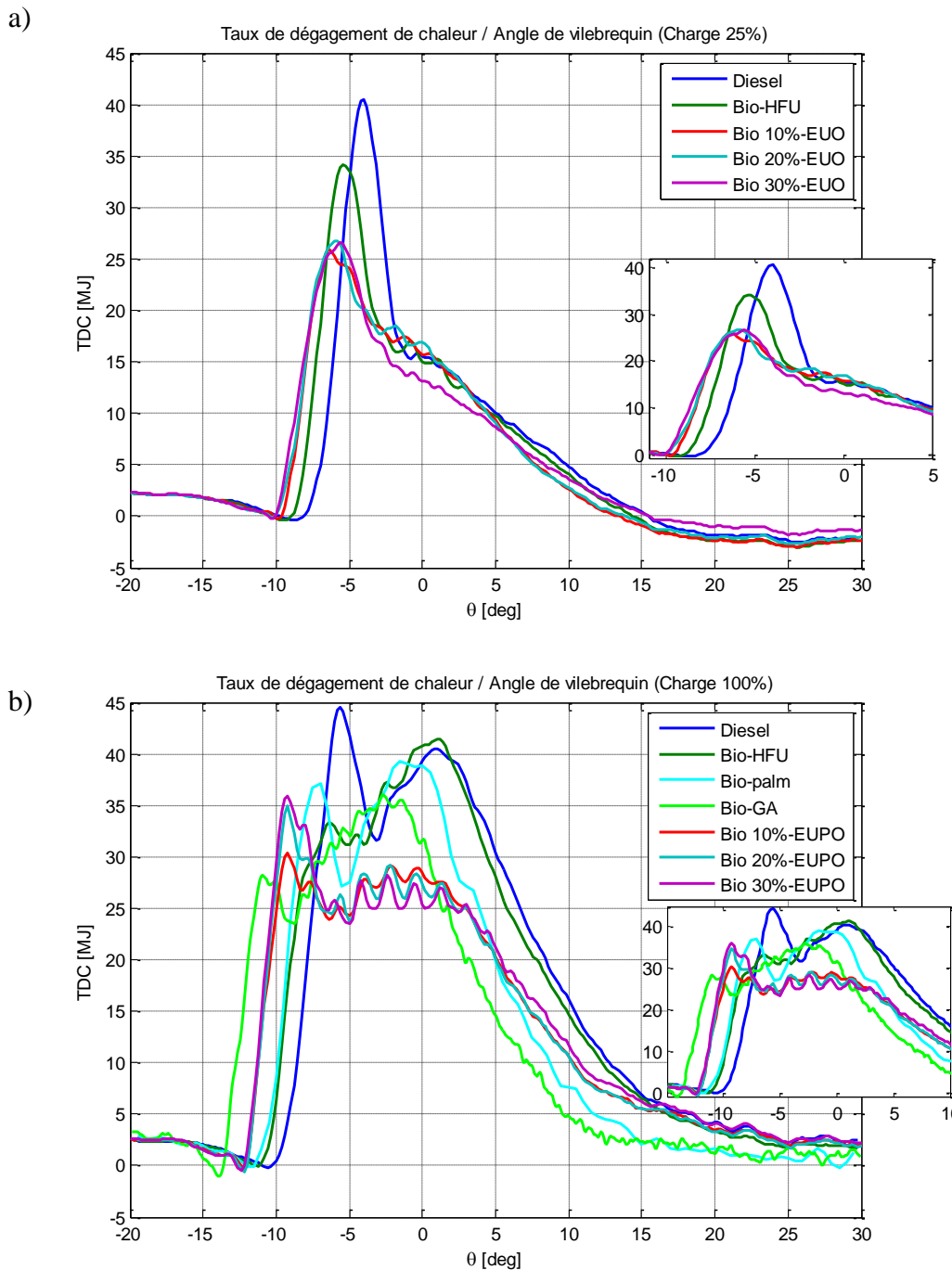
Bien que le filtre SG soit plus efficace pour préserver les composants hautes fréquences pertinents, les filtres SG sont moins efficaces pour supprimer les bruits de haut niveau dans un signal. La formulation particulière du filtre SG préserve beaucoup mieux les moments d'ordre supérieur que les autres méthodes. En conséquence, les largeurs et les amplitudes des pics pour les signaux désirés tendent à être préservées.

Dans la présente étude (figures V.3, V.4 ; V.6, et V.8), un polynôme de troisième degré a été utilisé avec, 21 points pour les huiles de friture usagées et les mélanges issus des eaux usées des presses à olives, 51 points pour les graisses animales, et 5 points pour les huiles de palme. La variation des points prise en charge par le polynôme est dû au pas de mesure du signal de pression (0,2 °V pour HFU ; EUPO10 ; EUPO20 ; et EUPO30, 0,1 °V pour GA, et 0,5 pour le palme).

Par l'application de la méthode de lissage (filtrage) de SG pour un polynôme du 3<sup>ème</sup> degré, il a été constaté que les courbes de pression cylindrique pour tous les carburants étudiés sont presque identiques, la différence a été observée dans le calcul de la dérivée de pression cylindrique ainsi que pour le taux de dégagement de chaleur (figure V.6, V.8).

La figure V.8 représente les courbes de taux de dégagement de chaleur correspondant à 1500 tours par minute, à faible et pleine charge du moteur (25%, 100%). Une quantité d'énergie est nécessaire pour la vaporisation du carburant injecté, on peut donc voir une pente vers le bas de TDC au cours du délai d'auto-inflammation. Le biodiesel, en raison de son indice de cétane élevé, donne un délai d'auto-inflammation plus court par rapport au pétrole-diesel. Après le retard d'allumage, on peut voir que les biodiesels et ses mélanges commencent la combustion plus tôt que le pétrole-diesel qui prend plus de temps pour enflammer, ce qui conduit à plus de carburant injecté avant le début de la combustion, qui conduit à une plus grande quantité d'accumulation de carburant dans la chambre de combustion au moment de la phase de combustion pré-mélangée. Ce qui conduit à expliquer que le pic du taux de dégagement de chaleur pour le pétrole-diesel est plus élevé en raison d'une plus grande volatilité et d'un meilleur mélange de

diesel avec de l'air. La phase pré-mélange est suivie rapidement par la phase diffusion, où la durée de combustion est contrôlée par l'injection du carburant. La troisième phase du taux de dégagement de chaleur est la phase tardive, dans lequel, la courbe de pétrole-diesel diminue plus rapidement que pour le biodiesel, cela est dû à l'existence de l'oxygène dans les molécules de biodiesel, qui améliore la phase de combustion diffusive. Les mêmes observations pour toutes les caractéristiques de combustion pour les autres charges du moteur (50%, 75%).



**Figure V.8 :** Taux de dégagement de chaleur en faible et pleine charge moteur avec filtrage du signal de pression cylindre

Le taux de dégagement de chaleur dépend principalement des propriétés du carburant telles que l'indice de cétane, PCI et la capacité du carburant à bien mélanger avec l'air. La phase pré-mélangée est générée par la combustion du mélange préparé au cours du délai d'auto-inflammation. La pic d'énergie libérée (TDC) dépend de la vitesse de combustion dans l'étape initiale, qui à son tour influencée par la quantité de combustible brûlé dans la phase pré-mélangée.

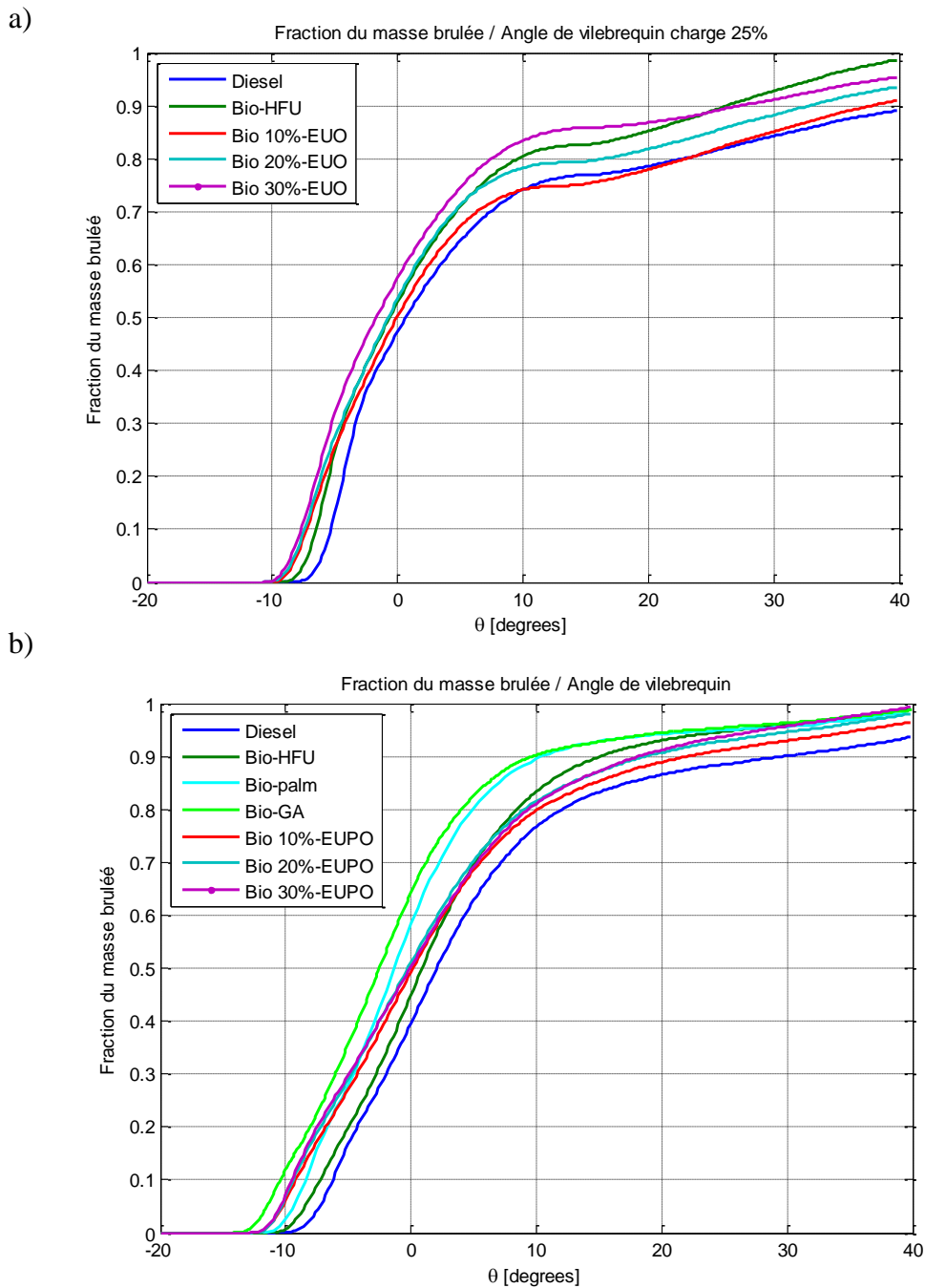


Figure V.9 : Taux de la fraction du carburant brûlée en faible et pleine charge moteur

#### 4.3.1.4. Fraction de carburant brûlée

Les fractions de carburant brûlées pour les carburants testés sont calculées à partir de la quantité de chaleur dégagée par la combustion par l'équation V.20 [253] :

$$\frac{dQ_{comb}}{d\theta} = m_f \cdot PCI \cdot \frac{dx_b}{d\theta} \quad (V.20)$$

D'où

$$\frac{dx_b}{d\theta} = \frac{dQ_{comb}}{d\theta} \cdot \frac{1}{m_f \cdot PCI} \quad (V.21)$$

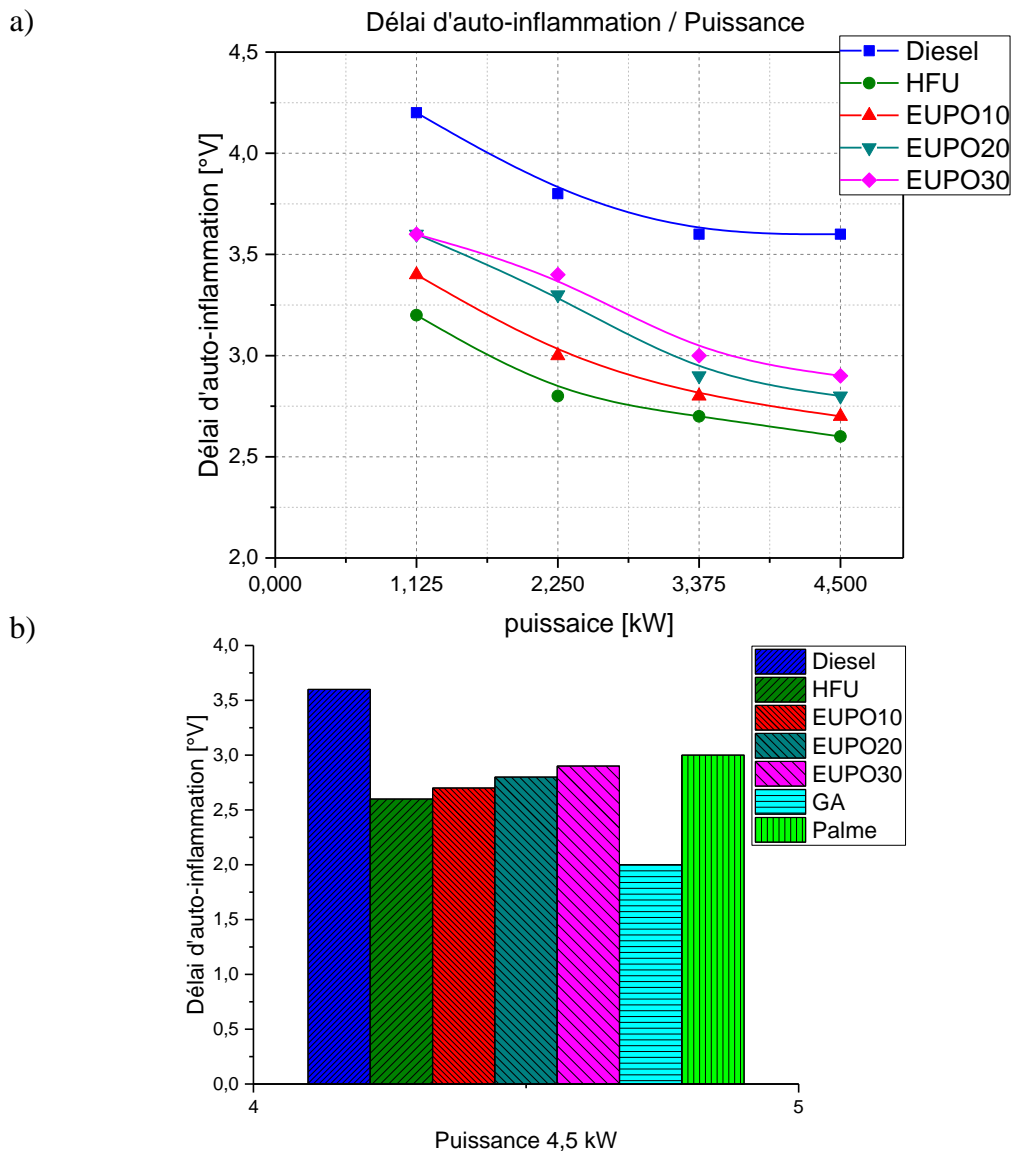
Avec  $dx_b$  le taux de la fraction de masse du carburant brûlée,  $dQ_{comb}$  d'énergie dégagée par la combustion calculée à partir de l'équation V.9,  $m_f$  la masse du carburant injectée, et  $PCI$  est le pouvoir calorifique inférieur.

La figure V.9 représente l'évolution de la fraction du carburant brûlée en fonction d'angle de vilebrequin. La valeur vers laquelle la fraction brûlée tend asymptotiquement donne une image de la quantité totale d'énergie dégagée par la combustion dans le cycle. Ainsi il a été observé que, plus la proportion du biodiesel dans le mélange est augmentée, plus la combustion est complète suite à l'amélioration des conditions de la propagation de la flamme, due à la présence de l'oxygène dans le biodiesel. Le diesel standard a enregistré le taux le plus moindre, tandis que, le B100 des HFU a enregistré le taux le plus élevé. Selon la figure V.9, plus la charge est élevée, plus la combustion est complète, car la richesse du mélange devient plus importante favorise la propagation de la flamme dans le cylindre.

#### V.4.1.5. Délai d'auto-inflammation

Le délai d'auto-inflammation (DA) est l'intervalle entre le début de l'injection du carburant et le début de la combustion. Ce paramètre est important pour analyser correctement le processus de combustion et pour donner des explications supplémentaires sur le comportement à la fois de la pression cylindrique et du taux de dégagement de chaleur. D'après la littérature, le DA est composé de deux périodes. Le premier est la période de retard physique (PRP) et le second est la période de retard chimique (PRC). La période PRP est liée au mélange de l'air avec l'atomisation, la vaporisation et la décomposition du carburant, comme le rapporte Heywood [247]. Concernant le PRC, il représente le temps nécessaire à la réaction de début de la combustion.

La figure V.10 montre la variation du retard d'allumage avec la puissance du moteur pour les carburants analysés. Le DA diminue avec l'augmentation de la charge (puissance) du moteur pour tous les carburants étudiés. Cela peut s'expliquer par l'élévation de la température et de la pression du cylindre ainsi que par le rapport d'équivalence du mélange air-carburant.



**Figure V.10 :** Délai d'auto-inflammation en fonction de la puissance moteur

D'après la figure V.10, le délai d'auto-inflammation des biodiesels et ses mélanges sont plus courts que celui du diesel standard, puisque le début de la combustion des biocarburants est plus rapide par-rapport au diesel (voir figure V.8, V.9). Ceci est dû à la présence de l'oxygène dans les molécules (composition chimique) du biodiesel, ce qui aide à la production de radicaux oxygénés libres qui favorisent la vaporisation du mélange air carburant. De plus, on peut constater que, pour toutes les puissances étudiées, le délai d'allumage de B20 et B30 d'EUPO était le plus élevé que le B10 d'EUPO. Ce résultat peut s'expliquer par l'augmentation

de la température des gaz dans le cylindre qui favorise l'auto-inflammation ce qui réduit le DA de EUPO10 par rapport à celui de EUPO20 et EUPO30. De plus, on peut observer qu'à charge moyenne et élevée, le DA du EUPO10 a tendance à être plus court que celui du diesel, contrairement à une charge faible. Le B100 des graisses animales a enregistré un DA le plus faible par rapport aux autres biodiesels purs (HFU, Palme), cela est expliqué par la pression et la température élevées dans le cylindre (voir figure V.3.b, V.4.b) qui favorisent le démarrage rapide de la combustion.

#### **V.4.1.6. Durée de la combustion :**

La durée de la combustion est la période qui s'écoule entre le début de la combustion (point d'auto-inflammation) et la fin de la combustion. Dans la littérature il existe plusieurs méthodes pour déterminer l'angle correspondant au début et la fin de la combustion, soit par l'analyse du signal de dérivée de la pression dans le cylindre (figure V.6), ou par l'analyse du signal du taux de dégagement de chaleur (figure V.8). On peut expliquer l'opération de combustion comme une suite des réactions chimiques, la durée de chaque réaction respecte la phénoménologie typique de la combustion dans un moteur à allumage par compression. L'opération de la combustion est subdivisée en trois phases, elle commence par une phase de combustion pré-mélange caractérisé par un avancement rapide de la réaction, suivi d'une phase de diffusion dans laquelle la période de cette phase est contrôlée par l'injection du carburant, enfin une phase tardive qui complète l'opération de combustion.

La figure V.11 présente l'évolution de la durée de combustion en fonction de la puissance du moteur. Les mélanges issus des eaux usées des pressoirs à olives ont enregistré des durées de combustion plus longue que le diesel standard et même que les biodiesel purs, cela est dû au PCI élevé proche du diesel, et à la viscosité cinématique moindre qui favorise l'atomisation et la vaporisation du mélange air-carburant, ce qui conduit à une meilleure combustion. Puisque le pouvoir calorifique inférieur du diesel est plus élevée que celui des biodiesels et ses mélange, ce qui génère une quantité de carburant injectée plus élevée pour de maintenir la même puissance effective que le diesel, donc la quantité de carburant injectée dans le cylindre est plus grande et prend plus de temps à brûler. Par contre la présence d'oxygène dans la composition chimique (moléculaire) du biocarburant favorise la combustion. En bref dans la figure V.11, on constate que les biodiesels et ses mélanges ont une durée de combustion plus longue que celle du pétrole diesel.

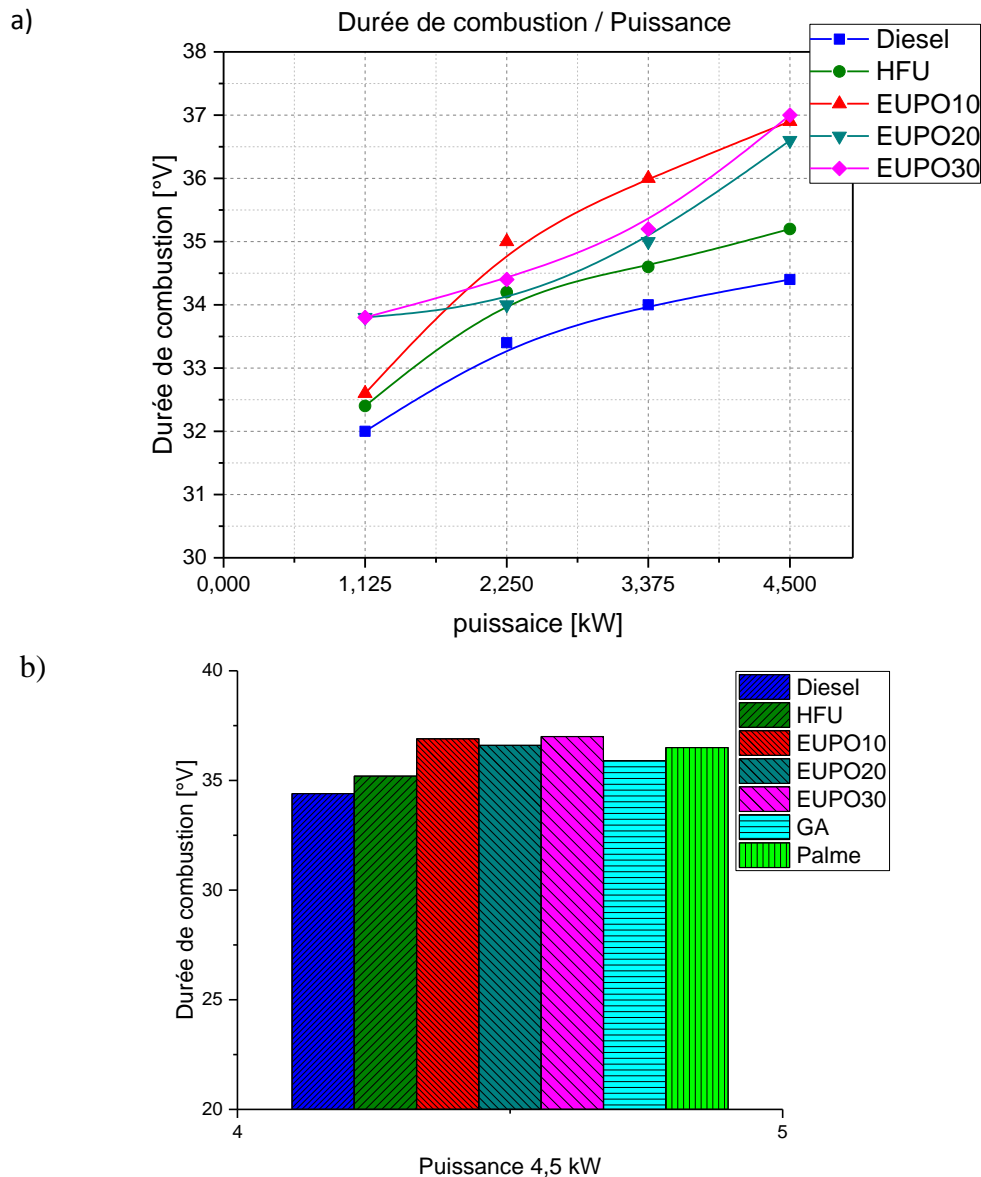


Figure V.11 : Durée de combustion en fonction de la puissance du moteur

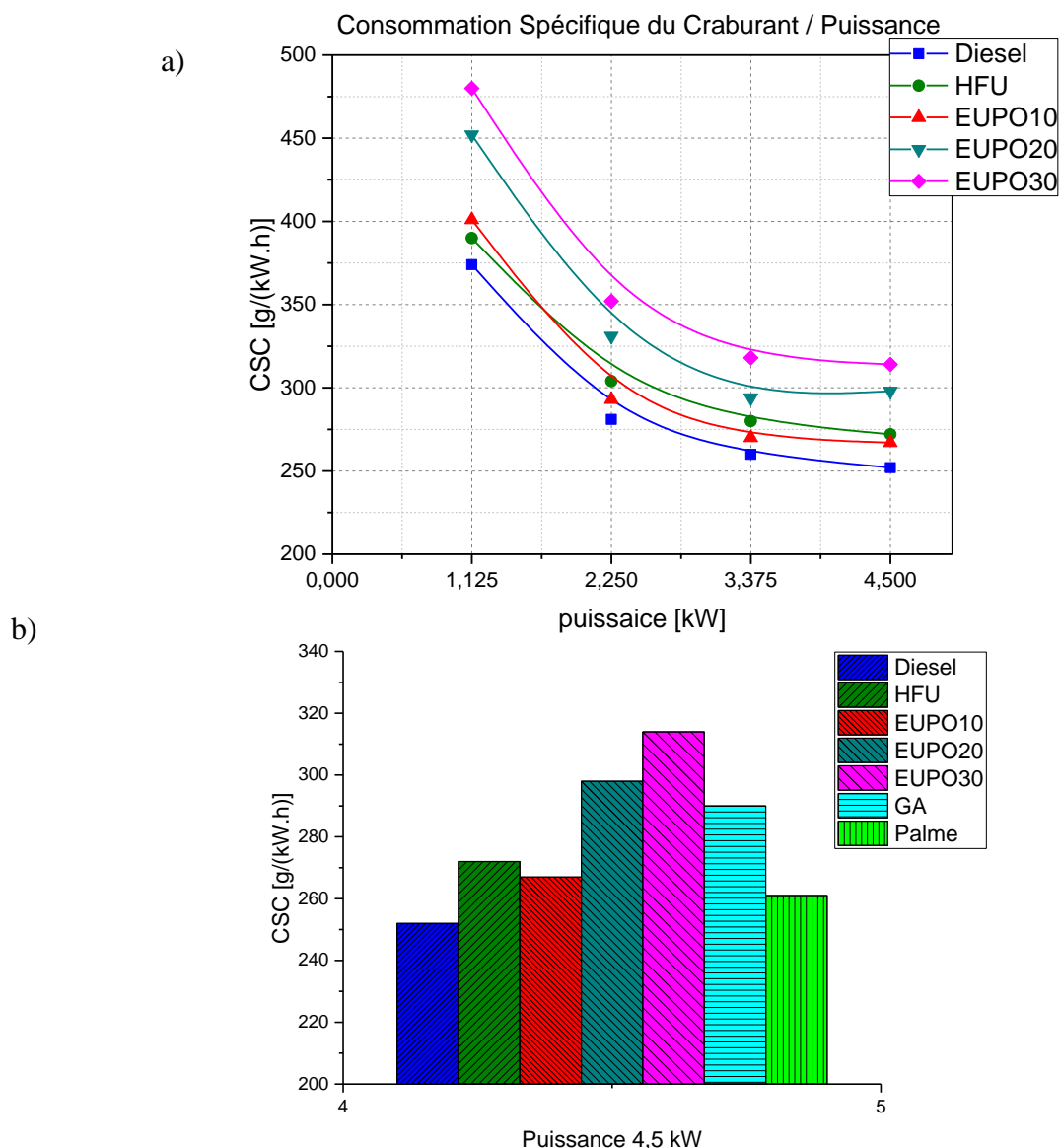
## V.4.2. Performances du moteur

### V.4.2.1. Consommation spécifique de carburant

La consommation spécifique de carburant (CSC) d'un moteur est, par définition, égale au rapport entre le débit massique horaire du combustible consommé, à la puissance effective développée par le moteur (voir équation IV.1). La CSC mesure l'efficacité avec laquelle un moteur utilise le carburant injecté pour produire du travail [241]. Elle permet ainsi de comparer deux moteurs, pouvant être de cylindrées différentes. Elle s'exprime généralement en g/kWh.

La figure V.12 illustre l'évolution de la consommation spécifique du carburant (CSC) en fonction de la puissance effective pour tous les carburants testés.



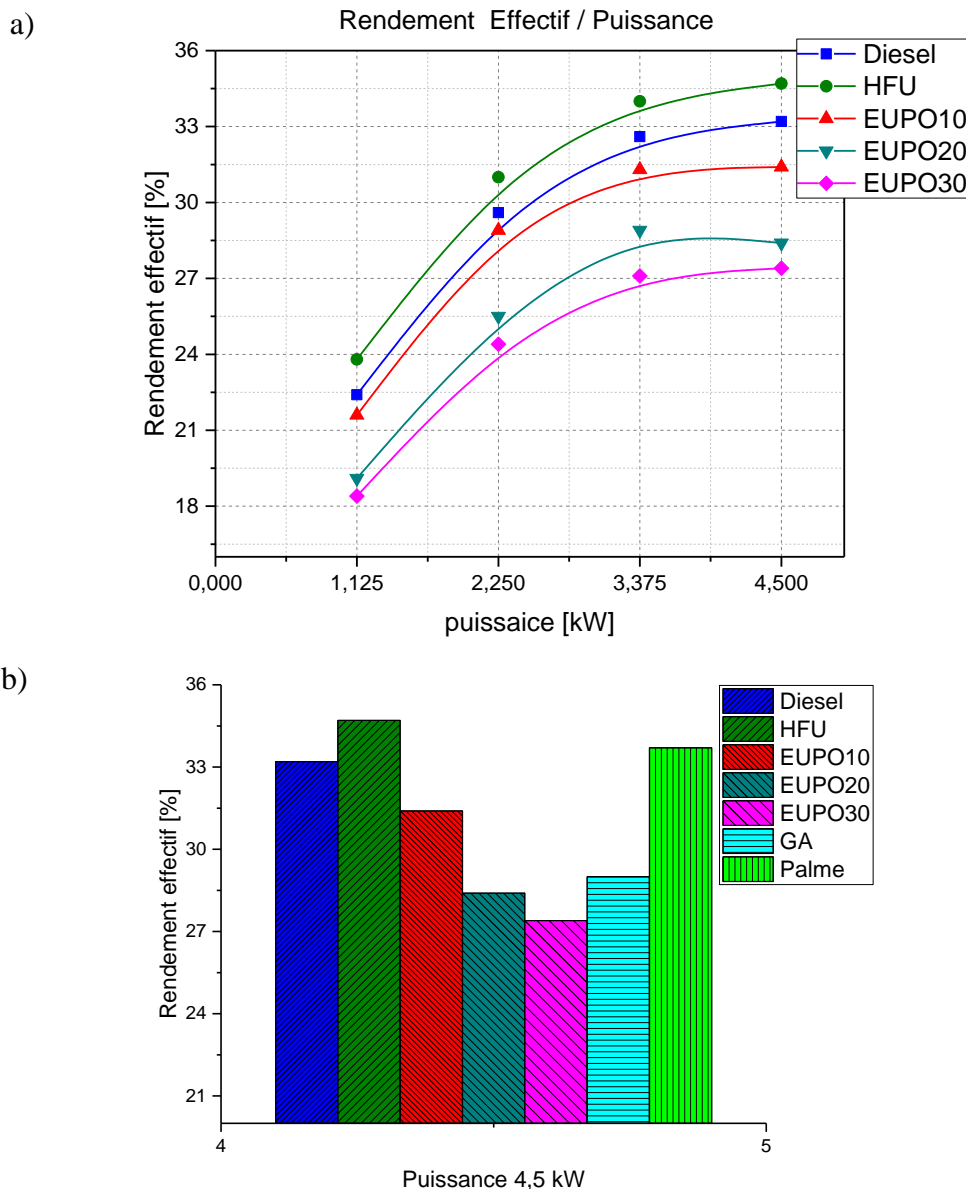


**Figure V.12 :** Consommation de carburant spécifique en fonction de la puissance du moteur

D'après la figure V.12, lorsque la puissance du moteur augmente la CSC diminue pour tous les carburants analysés. Le diesel standard a enregistré la plus faible CSC, tandis que la CSC la plus élevée est enregistrée pour le B30 des EUPO. On peut remarquer que CSC des B100 (HFU, GA, Palme) est légèrement élevé par rapport au diesel. Ceci est dû principalement au faible pouvoir calorifique inférieur de B100 qui nécessite une augmentation de la consommation de carburant pour de maintenir les mêmes puissances effectives du moteur que le diesel. En outre, un indice de cétane plus élevé avec une viscosité plus faible des EUPO10 contribue à réduire la CSC par rapport au EUPO20 et EUPO30. A pleine charge le B100 des huiles de palme a enregistré une consommation spécifique la plus moindre, proche du diesel standard, cela est dû aux PCI et densité élevées de ce carburant.

### V.4.2.2. Rendement effectif

Dans les machines thermiques, l'énergie thermique fournie par le combustible n'est pas intégralement convertie en énergie mécanique. Le rendement du moteur tient donc compte de cette réalité et inclut toutes les pertes, aussi bien d'origine thermique, que d'origine mécanique. A cet effet, le rendement effectif d'un moteur est le rapport de la puissance effective recueillie sur l'arbre à la puissance thermique apportée par le combustible (voir équation IV.2).



**Figure V.13** : Rendement effectif en fonction de la puissance du moteur

La figure V.13 représente l'évolution du rendement effectif en fonction de la puissance effective. Il est remarqué que le rendement s'augmente avec augmentation de la puissance effective pour tous les carburants analysés. Le biodiesel des huiles de friture usagées a présenté

des performances comparables au pétrole-diesel, avec une légère augmentation du rendement effectif. En outre, les mélanges issus des EUPO ont enregistré les valeurs les plus moindres du rendement effectif. Il est à noter que le rendement effectif est simplement l'inverse du produit de la consommation de carburant spécifique et le pouvoir calorifique inférieur du combustible. Cela conduit à augmenter la consommation de carburant spécifique pour le biodiesel de manière à compenser le pouvoir calorifique inférieure moindre des biodiesels et ses mélanges.

### V.4.3. Les émissions polluantes

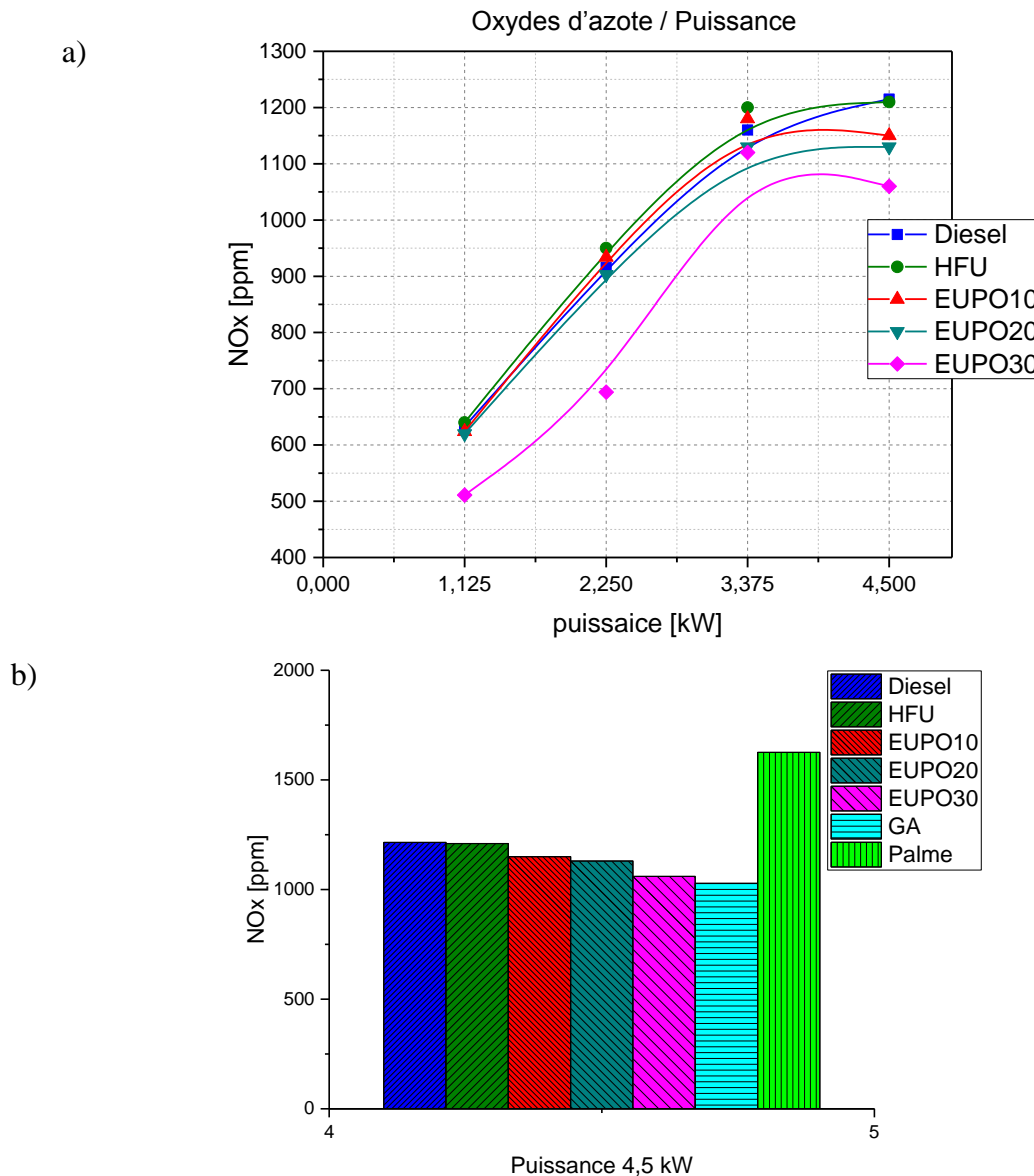
#### V.4.3.1. Les Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) sont formés quand la combustion atteint des températures très élevées. Ces conditions sont réalisées pendant la combustion d'un mélange proche de la stœchiométrie dans un environnement à haute pression et température. D'après Heywood [247], l'intervalle des températures maximales du cycle est la plus contribuant dans la formation des oxydes d'azote, c'est-à-dire après le début de la combustion et au voisinage de la pression maximale du cycle. Dans cet intervalle les NO<sub>x</sub> se forment jusqu'à atteindre un maximum, ensuite la température commence à diminuer et les NO<sub>x</sub> se décomposent pendant un certain temps avant de se stabiliser jusqu'à l'échappement.

La figure V.14 présente la concentration des émissions de NO<sub>x</sub>, dans les gaz d'échappement à différentes puissances moteur, pour tous les carburants analysés. On constate que, la concentration des émissions de NO<sub>x</sub>, accroît avec l'augmentation de la puissance effective du moteur et atteignent leur niveau maximum à pleine charge. Ceci est dû principalement à la température de combustion élevée influencée par l'accumulation de quantités injectées de carburant. En outre, le B100 des HFU a enregistré la concentration de NO<sub>x</sub> la plus élevée, tandis qu'une légère diminution a été enregistrée pour le diesel standard et le B10 des EUPO. Le B30 issus des eaux usées des pressoirs à olives a la moindre concentration des émissions de NO<sub>x</sub>.

D'après la figure V.14, il a été constaté que les courbes décrivent les mêmes allures avec une inflexion à pleine charge quel que soit le combustible étudié. A pleine charge le B100 des huiles de palmes a enregistré la valeur la plus élevée des émissions de NO<sub>x</sub>. Plusieurs facteurs tels que la température de combustion élevée, la teneur en oxygène et le temps de séjour dans la zone à haute température peuvent augmenter la production de NO<sub>x</sub>. En inspectant le rapport

C/H et C/O de différents carburants, le B30 à la valeur la plus basse. Cette stœchiométrie plus faible de la combustion entraîne une baisse de la température du cycle et réduit la formation de NO<sub>x</sub> lors de l'utilisation de B30 [241].

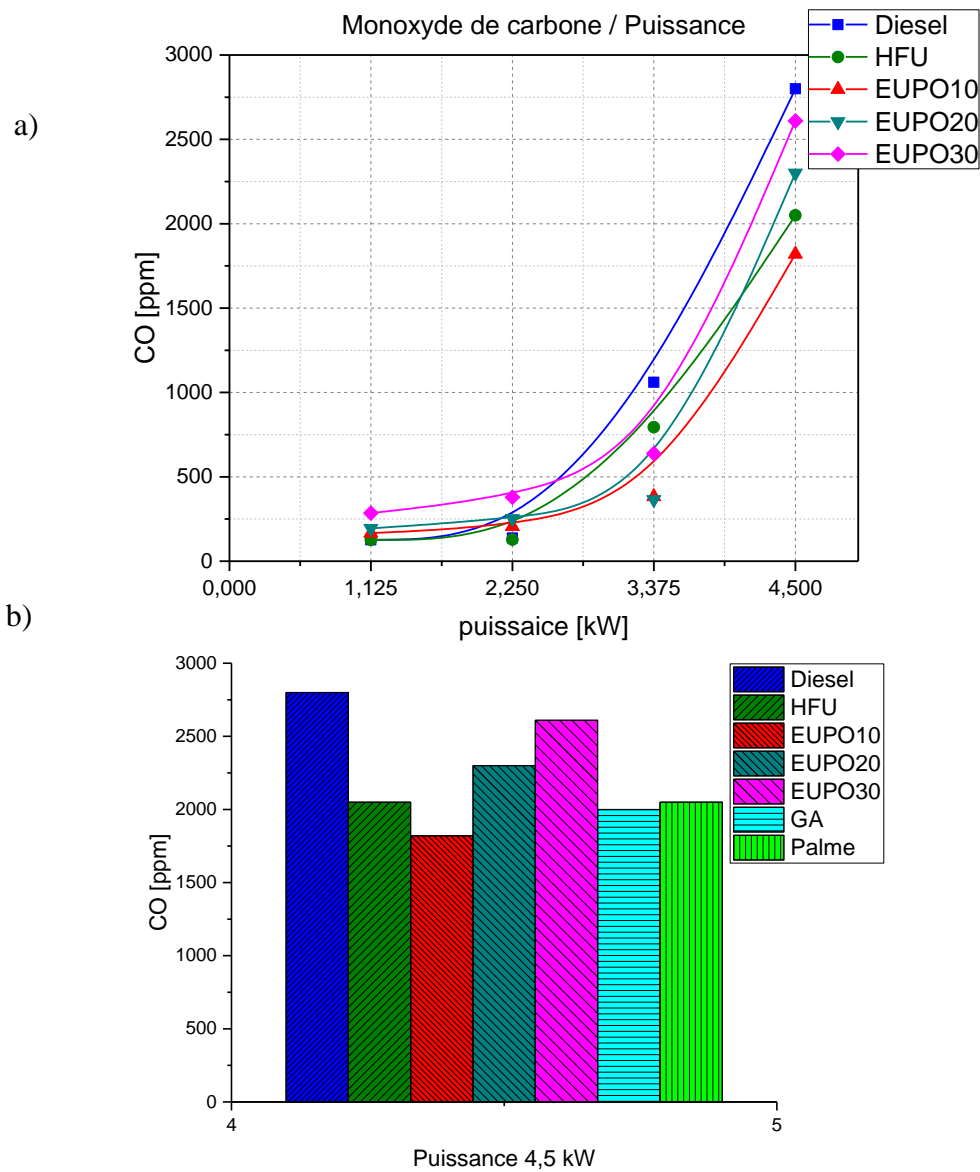


**Figure V.14 :** Evolution de la concentration des NO<sub>x</sub> dans les gaz d'échappement

#### V.4.3.2. Monoxyde de carbone

Les résultats des émissions de monoxyde de carbone (CO) en fonction de la puissance effective du moteur sont présentés dans la figure V.15. A faible charge, puissance 1,125 à 2,25 kW, les émissions de CO restent faibles et constantes, le B30 des EUPO a enregistré la valeur la plus élevée, tandis que la valeur la plus basse de CO est pour le B100 des HFU. A des charges moyennes et élevées l'écart commence à s'augmenter jusqu'à des valeurs maximum à pleine charge, ceci est valable pour tous les carburants testés y compris le diesel. En effet, la

production des émissions de CO dépend de la richesse du mélange air-carburant. A faibles charges du moteur, le mélange combustible est pauvre, c'est-à-dire que le mélange comporte une quantité importante d'oxygène pour oxyder le CO en CO<sub>2</sub>. Par contre à des charges élevées, le moteur requiert une quantité importante de carburant, le débit d'air étant inchangé, et le mélange devient riche. Il y a donc de moins d'oxygène disponible, ce qui explique l'augmentation brutale des émissions de monoxyde de carbone.

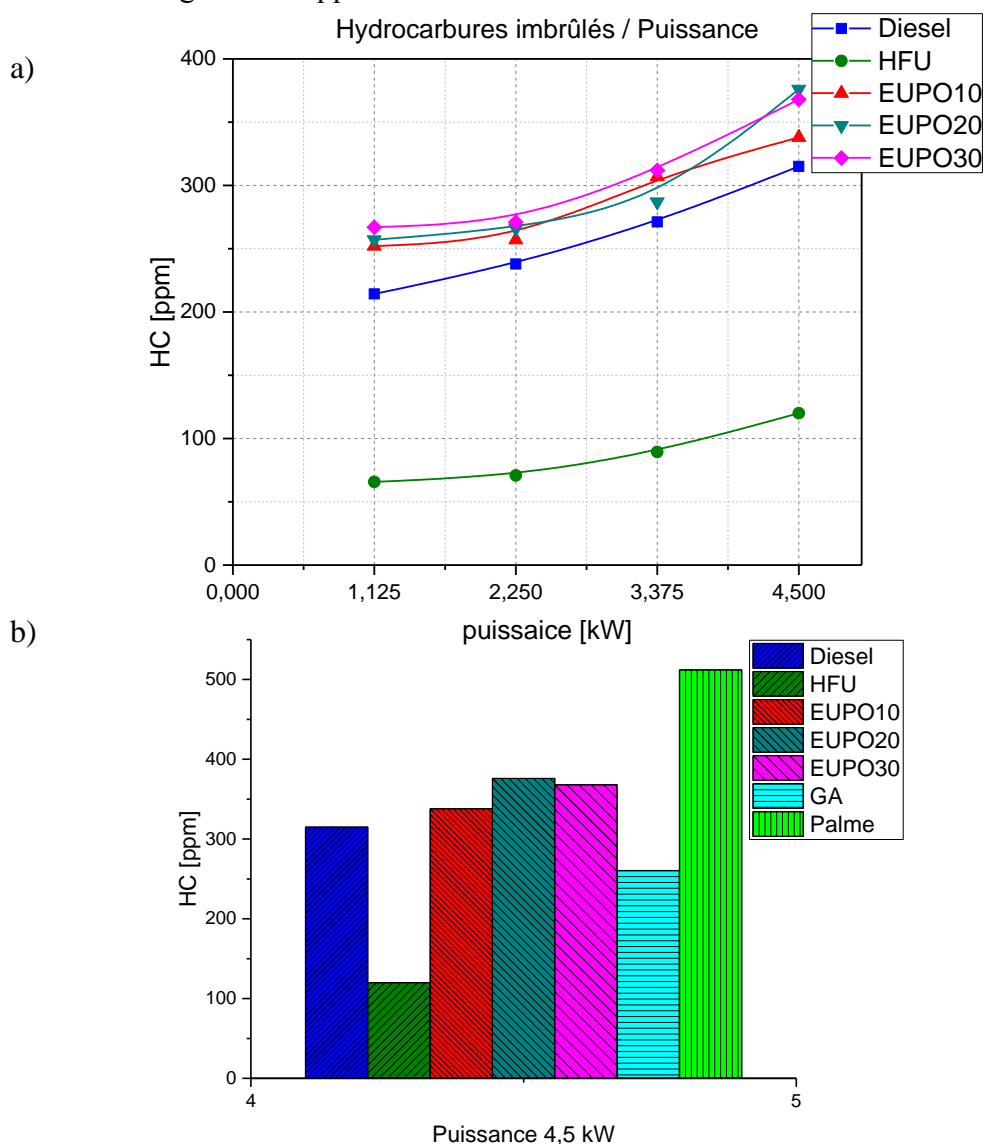


**Figure V.15 :** Evolution de la concentration des CO dans les gaz d'échappement

La viscosité élevée de ces combustibles, B100 des huiles des palmes, peut aussi en être la cause. En effet, la faible atomisation du carburant entraîne des mélanges riches par endroit et pauvres dans d'autres, ce mélange brûlera donc mal, ce qui entraîne une combustion incomplète et des émissions élevées de CO.

### V.4.3.3. Les hydrocarbures imbrûlés (HC)

Les hydrocarbures imbrûlés (HC) sont l'un des paramètres importants pour décrire le comportement des émissions dans un moteur diesel. Les émissions de HC sont liées principalement au processus de combustion, car si un mélange d'hydrocarbures ne rencontre pas suffisamment d'oxygène à une température assez élevée pour compléter la combustion, il sera émis avec les gaz d'échappement.



**Figure V.16 :** Evolution de la concentration des HC dans les gaz d'échappement

La variation des émissions des HC en fonction de la puissance du moteur, est illustrée dans la figure V.16. Il a été constaté que le B100 des HFU émet des émissions des HC nettement inférieures par rapport au carburant diesel, tandis que les mélanges issus des EUPO ont des valeurs élevées des émissions des HC. Ceci est principalement dû à la présence d'oxygène dans

la composition chimique du B100 qui améliore la qualité de combustion à l'intérieur de la chambre de combustion, entraînant une combustion plus complète. En effet, lors de la phase de combustion diffusive, l'oxygène présent dans les molécules du biodiesel rend la zone moins riche en carburant. D'autre part, l'indice de cétane élevé de B100 réduit le délai d'allumage qui entraîne un effet significatif sur la réduction des émissions de HC. À pleine charge (puissance effective de 4,5 kW), le B100 des huiles de palmes a rapporté des émissions des HC les plus élevées, ce qui peut être dû à la viscosité élevée de ce carburant qui conduit à la mauvaise atomisation du mélange air-carburant, entraînant une combustion incomplète du carburant.

#### V.4.4.4. Les particules (PM)

Les particules font partie des gaz d'échappement d'un moteur diesel, peuvent être considérées sous forme d'émissions de fumée ou de suie. Dans l'opération de combustion, certaines gouttelettes de carburant injecté brûlent partiellement ou incomplètement à une température élevée de la chambre de combustion, donc ils sont émis sous formes de particules de carbone. La conversion du carburant en particules de carbone est susceptible de se produire lorsque le moteur fonctionne à haute vitesse et avec une charge élevée. Dans ce cas, la quantité de carburant injectée augmente, ce qui conduit à des niveaux plus élevés d'émissions de fumée. De plus, les endroits riches en carburant, où il n'y a pas assez d'oxygène, peuvent augmenter considérablement la quantité de particules de carbone ou l'émission de fumées.

Les résultats des émissions des particules sont représentés dans la figure V.17. La valeur des PM la plus élevée est enregistrée pour le B30 des EUPO à faible charge, et pour le diesel à pleine charge. Par contre, les B100 ont également signalés les émissions des PM les plus faibles. En outre, les B10 et B20 des EUPO ont des émissions des PM presque identique que le diesel à faible charge, l'écart s'élargit à pleine charge.

La présence de l'oxygène dans le biocarburant en plus de celui contenu dans l'air d'admission améliore le processus de mélange qui conduit à préparer plus de carburant pour la phase de combustion pré-mélange. L'indice de cétane plus élevé de biocarburant produit une combustion précoce. En outre, la durée de cette phase de combustion est légèrement inférieure pour le diesel conventionnel. Toutes les raisons mentionnées ci-dessus conduisent à réduire les PM dans l'échappement pour le biodiesel. Pour le diesel conventionnel, le retard d'allumage avec plus de combustible injecté dans la phase de pré-mélange, augmente les émissions de PM.

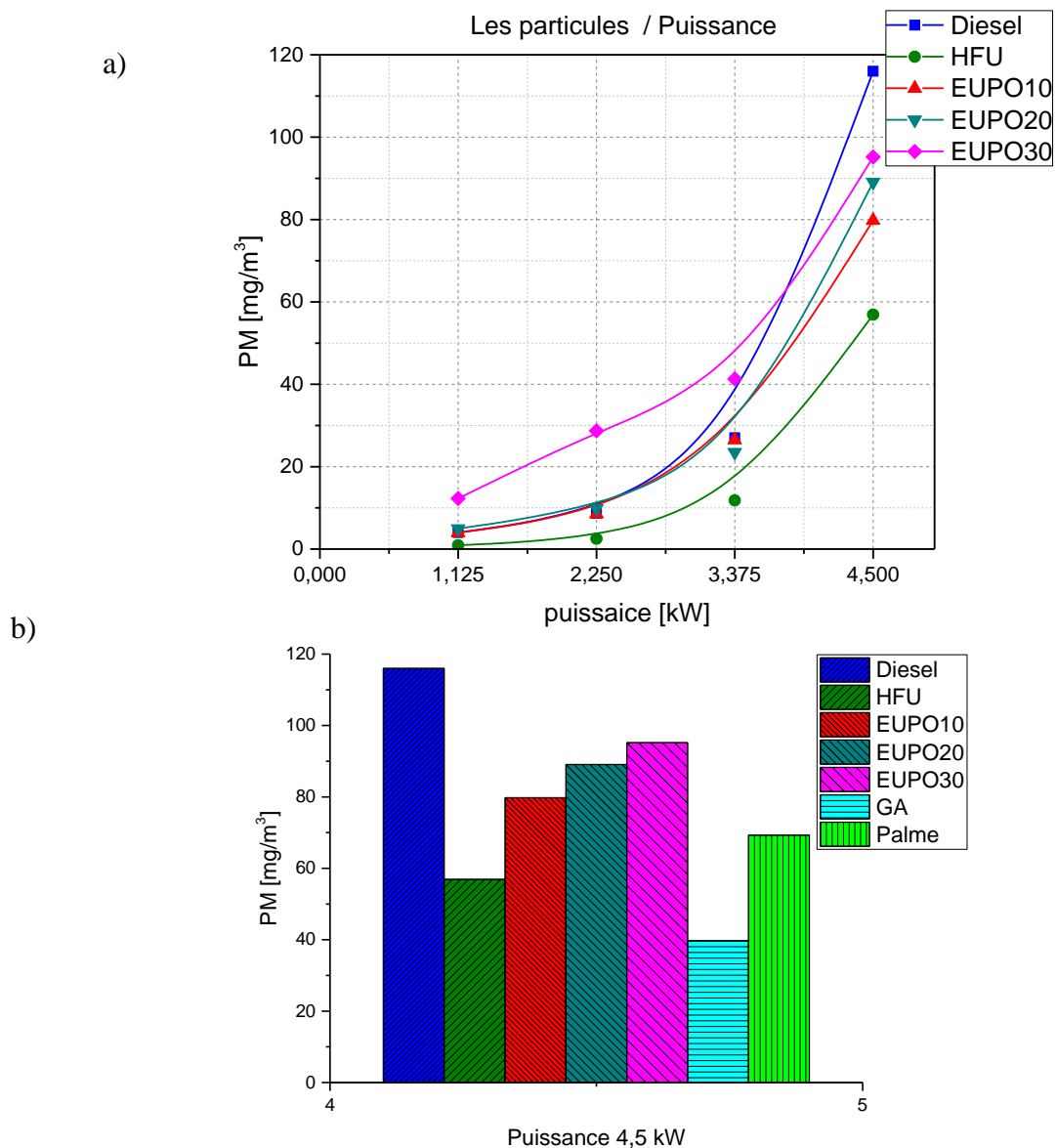


Figure V.17 : Evolution des concentrations des particules PM

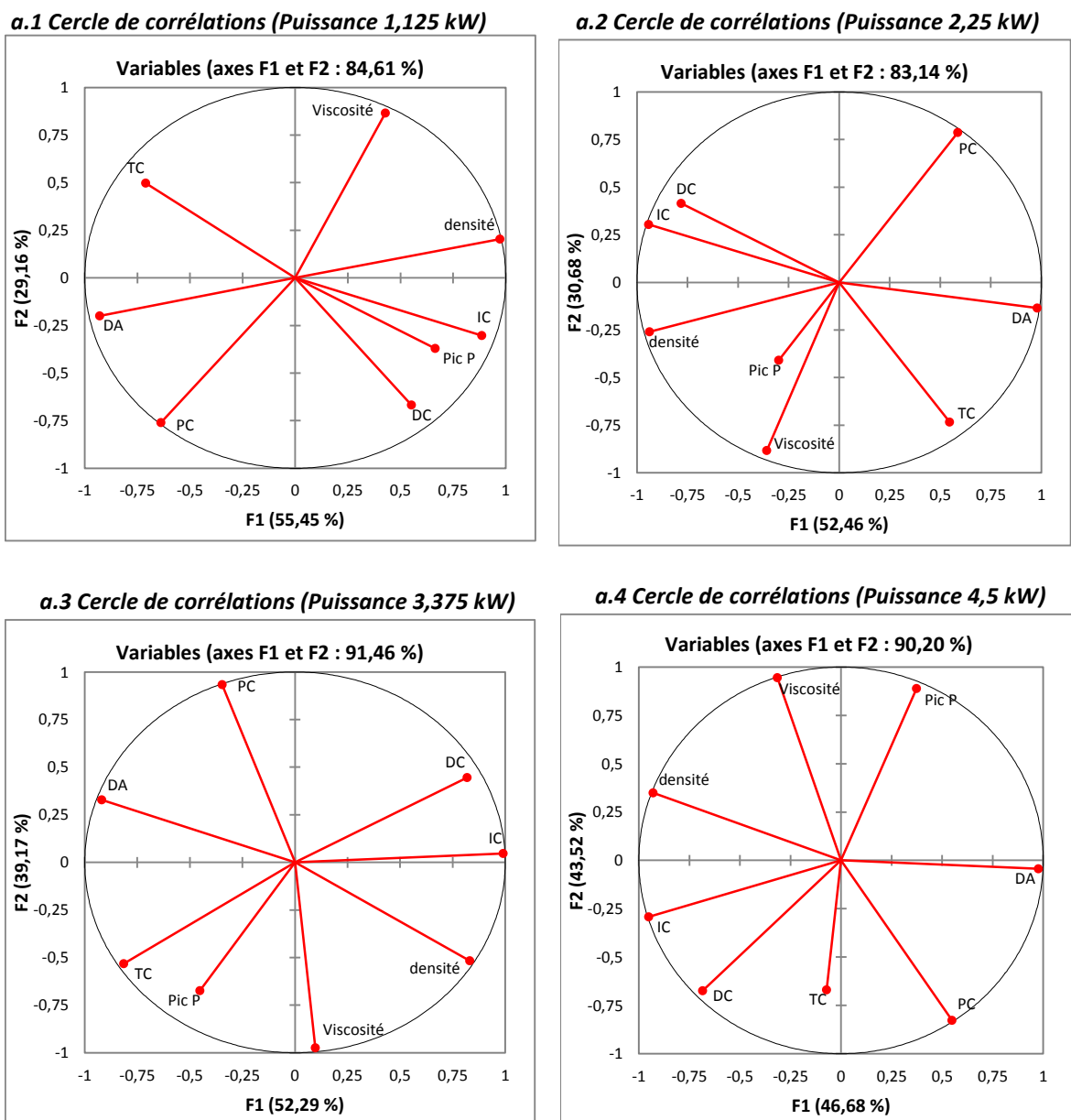
## V.5. Analyse statistique des résultats

La méthode utilisée pour analyser statistiquement l'influence des propriétés physico-chimiques des sept carburants étudiés (tableau V.4) sur les réponses d'un moteur Lister Petter est à l'aide de la méthode ACP. L'analyse en composantes principales (ACP) est un outil extrêmement puissant de synthèse de l'information, très utile lorsque l'on est en présence d'une somme importante de données quantitatives à traiter et interpréter. L'apparition au cours des dernières années de logiciels chaque fois plus performants et faciles à utiliser rend aujourd'hui accessible ce type d'analyses des données à tous les chercheurs. C'est pourquoi que cette méthode a été utilisée pour extraire les corrélations existant entre les propriétés physico-chimiques principales, les performances et les émissions polluantes du moteur.



### V.5.1 L'influence des propriétés des carburants sur la combustion

Dans un moteur diesel, l'analyse de la combustion est un paramètre très important pour connaître le comportement du carburant dans la chambre de combustion. Chaque injection s'accompagne par d'un délai d'auto-inflammation, dont la durée dépend directement des conditions thermo-chimiques locales de la chambre de combustion et des propriétés physico-chimiques du carburant. Après ce délai, la combustion est caractérisée par une pression, une température et une durée de combustion. La figure V.18 représente les résultats obtenus par l'application de la méthode ACP sur les paramètres de la combustion et les propriétés physico-chimiques principales des carburants étudiés.



**Figure V.18 :** Corrélations entre les paramètres de la combustion et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP

Selon la figure V.18 une forte corrélation négative est enregistrée entre le délai d'auto-inflammation et l'indice de cétane d'ordre (-86,4% ; -96,2% ; -65% ; -92,5%) respectivement pour les puissances effectives (1,125 ; 2,25 ; 3,375 ; 4,5) kW. De plus, l'IC est corrélé négativement aussi avec la température de combustion (TC) avec des coefficients de (-72,6% ; -68,3% ; -80,7% ; -48,3%) pour les différentes puissances analysées. A partir de la figure V.18, il a été observé que le délai d'auto-inflammation s'évolue inversement à la durée de combustion (DC) en charge moyenne et élevées (voir annexe C), de tel sorte que le coefficient de corrélation de Pearson est d'ordre (-76,9% ; -65% ; -58,4%) respectivement pour des puissances de (2,25 ; 3,375 ; 4,5) kW. De plus, la température de combustion (TC) est corrélée négativement avec la DC (-86,3% ; -56,5% ; -83,1%) respectivement pour les puissances effectives (1,125 ; 2,25 ; 3,375) kW. L'interprétation possible pour de ces résultats, comme il a été expliqué dans les chapitres précédents, est que les biocarburants ont un DA plus court que le diesel standard, cela est dû à l'IC élevés de ces carburant. Si le DA augmente, une grande quantité de carburant injectée réside dans la chambre de combustion, avec l'inflammation de cette quantité, une grande énergie est libérée sous forme de pression et de température, ce qui explique la corrélation négative entre le délai d'auto-inflammation et la température de combustion avec l'indice de cétane.

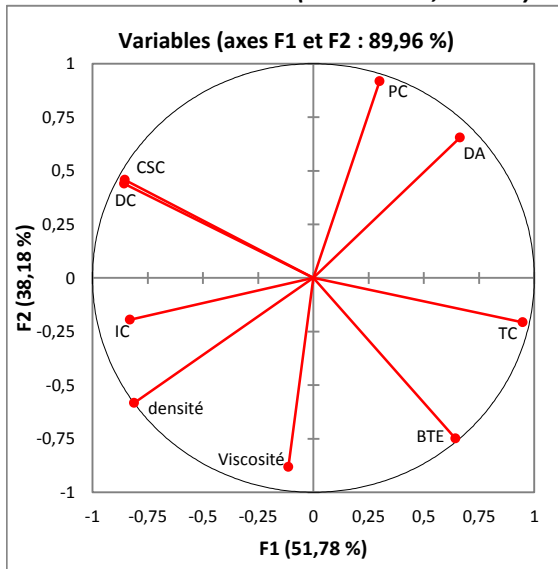
### V.5.1 L'influence des propriétés des carburants sur les performances

Pour analyser l'influence des propriétés physico-chimiques sur les performances du moteur sept carburants ont été utilisés, parmi lesquels les graisses animales et les huiles de palme n'ont été étudiées qu'à pleine charge (puissance 4,5 kW). Les résultats de l'analyse statistique sont représentés dans la figure V.19 sous forme des cercles de corrélations. La consommation spécifique de carburant est corrélée négativement avec le rendement effectif avec des coefficients de (-92% ; -86,9% ; -82,5% ; -92,9%) respectivement pour tous les puissances analysées. l'explication de ces résultats est que le rendement effectif s'évolue inversement à la CSC, cette tendance est bien éprouvée par l'équation IV.3.

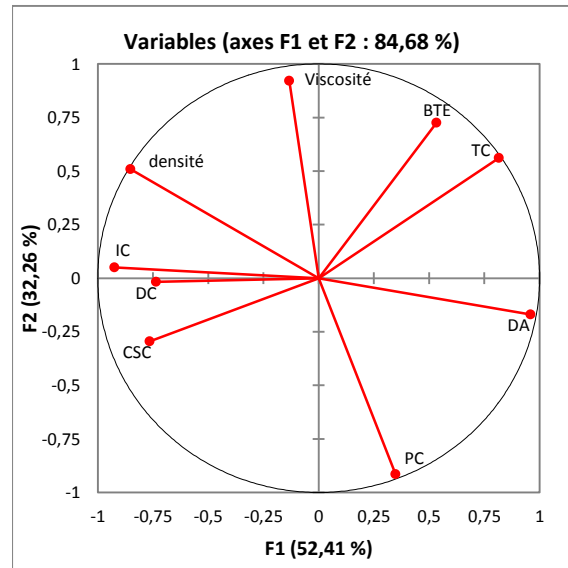
A partir de la figure V.19 une corrélation positive a été enregistrée entre le rendement effectif et la température de combustion d'ordre (76,3% ; 88,3% ; 64,2% ; 76,3%) respectivement pour tous les puissances analysées, en outre, la durée de combustion est corrélée négativement avec le rendement et positivement avec la CSC (voir annexe C). L'interprétation possible pour ces résultats, si la température de la chambre de combustion augmente donc une grande quantité d'énergie est libérée cela augmenterait le rendement effectif du moteur. En

outre, si la CSC augmente donc une grande quantité de carburant est injectée, cela influencera positivement sur la durée de la phase de combustion diffusion, en plus, la durée de la phase de combustion tardive est améliorée avec l'existence l'oxygène dans la composition chimique du biodiesel et la quantité de carburant injectée. Ces deux facteurs vont augmenter la durée de combustion.

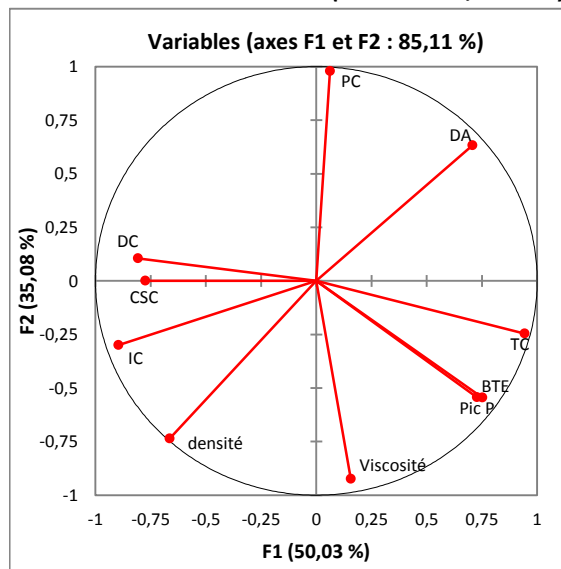
**a.1 Cercle de corrélations (Puissance 1,125 kW)**



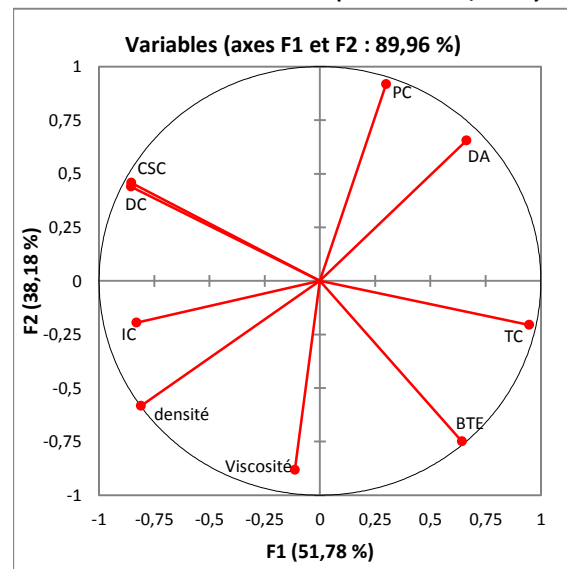
**a.2 Cercle de corrélations (Puissance 2,25 kW)**



**a.3 Cercle de corrélations (Puissance 3,375 kW)**



**a.4 Cercle de corrélations (Puissance 4,5 kW)**



**Figure V.19 : Corrélations entre les performances du moteur et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP**

### V.5.1 L'influence des propriétés des carburants sur les émissions

L'analyse de l'influence des propriétés physico-chimiques principales sur les émissions polluantes de tous les carburants étudiés est très importante, car la principale préoccupation de l'utilisation des biocarburant dans les moteurs est que ces émissions polluantes sont moindres par rapport au diesel standard, en plus de cela ils sont extraits d'une matière renouvelable et biodégradable. Les résultats de l'analyse statistique de l'influence des propriétés sur des émissions sont représentés dans la figure V.19.

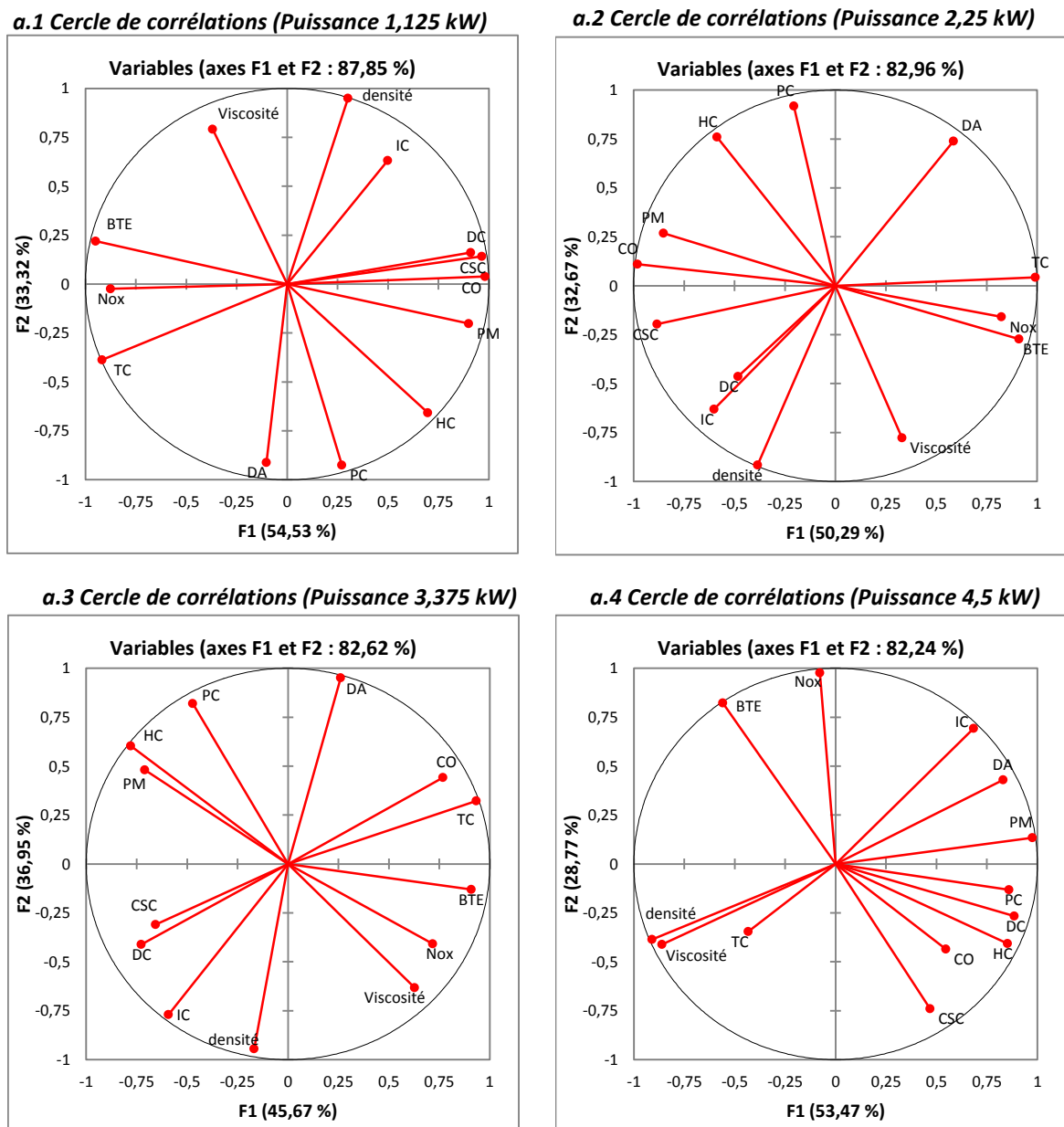


Figure V.20 : Corrélations entre les émissions du moteur et les propriétés physico-chimiques du carburant en ACP

A partir de la figure V.20, il a été observé que les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) sont négativement corrélés avec les autres émissions polluantes analysés (CO, HC, PM), les coefficients de cette corrélation sont représentés dans l'annexe C pour tous les puissances analysées. De plus, les NO<sub>x</sub> sont positivement corrélés avec la température de combustion et le rendement effectif, et négativement corrélés avec la CSC et la DC. L'interprétation de ces résultats, comme il a été expliqué précédemment, l'intervalle des températures maximales du cycle est la plus contribuant dans la formation des oxydes d'azote [247], ce qui explique la corrélation positive de l'NO<sub>x</sub> avec la TC et le rendement. En outre, la température élevée de la chambre de combustion et la présence d'oxygène dans la composition chimique des biodiesel améliorent la bonne combustion du mélange air-carburant, ce qui va influencer négativement sur les HC et les PM. En revanche, pour le monoxyde de carbone, la température élevée et d'existence d'oxygène favorisent la formation de CO, tandis qu'elles encouragent l'oxydation de CO en CO<sub>2</sub>, donc moins d'émission de CO.

## V.6. Conclusion

Afin de modéliser la combustion du biodiesel dans un MCI, sept carburants ont été prises en compte. Les huiles de friture usagées, les huiles de palmes, les graisses animales, les mélanges B10, B20 et B30 issus des eaux usées des pressoirs à olives, et le diesel standard sont les carburants analysés en termes combustion, performances, et émissions polluantes. En raison de la variété des matières premières utilisées pour la production de ces carburants, les réponses du moteur ont été variantes d'un carburant à l'autre. A cet effet, une analyse statistique a été menée de l'influence des propriétés physico-chimiques des biodiesels sur les réponses du moteur.

À partir l'analyse des résultats de la combustion, il a été constaté que tous les carburants analysés donnaient presque les mêmes taux le dégagement de chaleur. Les biodiesels purs ont enregistré les délais d'auto-inflammation les plus court, tandis que les mélange des EUPO ont enregistré des durées de combustion plus longues et des CSC plus élevées. En outre, le B100 des HFU a le plus grand rendement et des émissions de NO<sub>x</sub> les plus élevées, tandis que les mélanges des EUPO ont les plus bas émissions de NO<sub>x</sub> et des émissions des HC plus élevées. Le B10 des EUPO a enregistré les émissions de CO les plus faibles. Les résultats d'analyse montrent que les réponses du moteur sont fortement corrélées avec le régime et la charge du moteur. Ces résultats ont été analysés statistiquement entre eux pour extraire les corrélations existant entre les réponses du moteur et les propriétés des sept carburants analysés. Des explications ont été données selon les principes de la thermodynamique et de la combustion.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'une des raisons de l'intérêt accordé actuellement aux biocarburants est sans conteste le rôle qu'ils peuvent jouer dans la réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES). Les gains en termes de réduction d'émissions pourraient atteindre 60 % pour les meilleures filières. Toutefois, ces biocarburants sont considérés comme une source potentielle de réduction des émissions polluantes. Malgré ses indices de cétane compatible avec un usage dans un moteur diesel, leur utilisation directe (sans modification du moteur) peut être préjudiciable sous certaines conditions en raison de la forte viscosité des matières premières (huiles / graisses). Une telle utilisation peut provoquer des dépôts ou des encrassements dans certains types de moteurs (injection directe), un accroissement du niveau de certains polluants, etc. Seuls des tests de caractérisation spécifiques de chaque huile ou ses mélanges permettent de déterminer ses potentialités en tant que carburant.

Pour découvrir les relations (corrélations) qui existent entre les propriétés physico-chimiques des EM, 22 propriétés physico-chimiques de 34 matières premières ont été prises en considération, il a été constaté que la composition des huiles / graisses d'origine influe sur les propriétés de l'ester méthyle final. La question qui se pose, quelle est la matière première de biodiesel ayant les meilleures propriétés, ou s'il vaut mieux utiliser des huiles saturées ou insaturées pour la production des esters méthyliques. Bien que le coût de production, en dehors des propriétés chimiques, joue ici un rôle important, il n'est pas facile de répondre à cette question de manière unique et définitive. Les matières premières saturées (telles que celles dérivées de la noix de coco, du palmier et du suif) sont excellentes en termes d'indice de cétane et de stabilité d'oxydation (et généralement des émissions de NO<sub>x</sub> plus faibles), tout en présentant de faibles propriétés d'écoulement à froid, une viscosité cinématique plus élevée, un point d'éclair inférieur (mais toujours assez élevé) et un pouvoir calorifique inférieur. En revanche, l'augmentation de l'insaturation diminue la viscosité cinématique, améliore les propriétés d'écoulement à froid (des additifs sont probablement encore nécessaires) et augmente le pouvoir calorifique, mais diminue également l'indice de cétane et dégrade la stabilité à l'oxydation. Il est intéressant de noter que ce sont les matières premières les plus insaturées qui sont susceptibles d'être rejetées en fonction des limites de spécification existantes. Plus précisément, sur la base des cercles de corrélation, les matières premières ayant plus de double liaison dans leur molécule (maïs, croton, poisson, lin, graines de caoutchouc, carthame, tournesol, soja) doivent être exclues en EN.

D'après l'analyse statistique la densité, la viscosité, le pouvoir calorifiques, l'indice de cétane et le point d'éclair ont été choisies comme propriétés physico-chimiques principales, en raison de leurs fortes corrélations avec les autres propriétés physico-chimiques, donc elles peuvent représentées la totalité des propriétés physico-chimiques des biodiesel, en plus ces propriétés a été choisies pour bien comprendre le phénomène de la combustion.

Par la suite, pour connaître l'influence des propriétés physico-chimiques des biodiesels et ses mélanges sur le fonctionnement du moteur en termes performance, combustion, et émissions polluantes, 15 carburants testés sur un banc d'essais équipé d'un moteur Lister Petter ont été prises en comptes. Étant donné que le moteur de la base de données fonctionne avec un régime de 1500 tr/min avec différentes charges (puissances), ainsi que les propriétés physico-chimiques différent d'un carburant à l'autre, ce qui influencera sur la combustion et ses résultats, et conduira souvent à des résultats dispersés et parfois controversés. Dans cette partie d'étude, on a subdivises les données en trois partie, la performance (consommation spécifique de carburant, rendement effectif, température d'échappement), la combustion (délai d'auto-inflammation, durée de combustion, pression cylindre), les émissions polluantes (NO<sub>x</sub>, CO, HC, PM). Des corrélations ont été établies pour la quantification des avantages (ou pénalités) du biodiesel sur les performances et les émissions réglementées par rapport au fonctionnement du moteur. Les différentes tendances observées ont été discutées et des explications possibles ont été proposées sur la base des aspects fondamentaux de la combustion et des émissions des moteurs diesel.

L'étude a été enrichie par une modélisation thermodynamique de la combustion, sept carburants ont été modélisés, composés de trois biodiesels purs (huiles de friture usagées, huiles de palmes, graisses animales) et trois mélanges des biodiesels (B10, B20, et B30 issus des eaux usées des pressoirs à olives) et d'un diesel standard. Cinq carburant ont été modélisés en différentes charge étudiées (1,125 ; 2,25 ; 3,375 ; 4,5) kW, tandis que, les biodiesels des graisses animales et des huiles de palmes ont été modélisés à pleine charge seulement (4,5 kW). Les mesures expérimentales de la modélisation ont été réalisées au niveau des laboratoires d'IMT atlantique de Nantes. L'objectif de la modélisation de la combustion consiste à la mise en forme d'un code de calcul pour le modèle thermodynamique d'un moteur à combustion interne à quatre temps, afin de comparer les résultats de la combustion des sept carburants cités précédemment. En raison de la variété des matières premières (végétale/animale ; alimentaire/non-alimentaire) utilisées pour la production du biodiesel, les réponses du moteur sont aussi distincte d'un carburant à l'autre. Par conséquent, une analyse statistique de l'influence des propriétés



physico-chimiques des sept carburants sur les réponses du moteur et les résultats de la modélisation devient indispensable, des interprétations des fortes corrélations (positives ou négatives) ont été données.

D'après les comparaisons effectuées, on peut dire que le biodiesel est un carburant très similaire au diesel, à la fois en termes propriétés physico-chimiques et en termes réponses du moteur. On remarque également que lors de l'utilisation, les émissions polluantes du biodiesel sont largement plus faibles que celle du diesel standard. On pense que les résultats de la présente étude peuvent être utilisés pour les administrations et les institutions internationales en fournissant une bonne estimation des impacts attendus des performances et les émissions des biodiesels et ses mélanges sur les moteurs.

## **Références bibliographiques**

**Références bibliographiques**

- [1] Poitrat E. Biocarburants, Techniques de l'Ingénieur, Génie énergétique. 1999 ; 3 ; n° BE8550, BE8550, 1-BE8550.
- [2] Shay E.G. Diesel Fuel From Vegetable Oils: Status and Opportunities. *Biomass and Bioenergy* 1993; 4: 227 - 242.
- [3] Srivastava A. et Prasad R. Triglycerides-Based Diesel Fuels. *Renewable and Sustainable Reviews* 2000; 4: 111 - 133.
- [4] Jegannathan K.R., Chan E.S., and Ravindra P., Harnessing biofuels: A global renaissance in energy production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 2009; 13; 2163-2168.
- [5] Hoekman SK, Broch A, Robbins C, Cenicerros E, Natarajan M. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16(1): 143-169.
- [6] Knothe G.. The history of vegetable oil-based Diesel fuels. *The Biodiesel Handbook*, 2005.
- [7] Biogasmax. Technologie Biogaz Biocarburants. Consulté le Février 9, 2010, sur Biogasmax. A driving force. Stratégies et enjeux du biogaz.: [www.biogasmax.fr](http://www.biogasmax.fr)
- [8] Abdesahian P., Lim J.S., W.S. Ho. Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 60: 714-723.
- [9] Amirta R., Herawati E., Suwinarti W.. Two-steps utilization of Shorea wood waste biomass for the production of oyster Mushroom and biogas - A zero waste approach. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2016; 9: 202-208.
- [10] Chen H., X. Fu. Industrial technologies for bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 57: 468-478.
- [11] Bourne J.K. Green Dreams: Making fuel from crops could be good for the planet —after a breakthrough or two. *National Geographic* (accessed on 10 May 2014)
- [12] Ma F. et Hanna M.A. Biodiesel production: a rev. *Bioresource Technology* 1999; 70:1-15.
- [13] Zhang Y., Dube M., McLean D.D. et Kates M. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource Technology* 2003; 90(3): 229–240.
- [14] Encinar J.M., González J.F., Rodríguez J.J. et Tejedor A. Biodiesel fuels from vegetable oils: transesterification of cynara cardunculus l. oils with ethanol. *Energy Fuels* 2002; 16: 443–450.
- [15] Sivaprakasam S. et Saravanan, C. G. Optimization of the transesterification process for biodiesel production and use of biodiesel in a compression ignition engine. *Energy and Fuels* 2007; 21 (5): 2998–3003.
- [16] Meng X., Chen G. and Wang Y. Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. *Fuel Processing Technology* 2008; 89: 851–857.
- [17] Ahn E., Koncar M., Mittelbach M. et Marr R. A low-waste process for the production of biodiesel. *Separation Science and Technology* 1995; 30 (7–9): 2021–2033.
- [18] Ryan R., Dodge L.G. and Callahan T.J. The effects of vegetable oil properties on injection and combustion in two different diesel engines. *Journal of American Oil Chemical Society* 1984; 61: 1610–1620.
- [19] Alcantara R., Amores J., Canoira L., Fidalgo E., Franco M. J. et Navarro A. Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil used frying oil and tallow. *Biomass and*

- Bioenergy 2000; 18: 515–527.
- [20] Datta A., Mandal B. K. A comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine. *Renewable and Sustainable Energy Rev* 2016; 57: 799-821.
- [21] N. Özbay E. Apaydın-Varol B.B. Uzun. Characterization of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis. *Energy* 2008; 33(8):1233-1240.
- [22] Goyal H., Seal D., et Saxena R. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008; 12(2):504-517
- [23] Vaitilingom G. Extraction, conditionnement et utilisation des huiles végétales pures comme carburant. *Enjeux et perspectives des biocarburants pour l'Afrique*, Edition Fondation 2iE, 2007.
- [24] Ndayishimiye P. Utilisation d'un biocarburant à base d'huile de palme dans les moteurs à combustion interne. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Nantes, Nantes, 2010.
- [25] Khiari k. Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques des biocarburants de seconde génération et leur influence sur le comportement des moteurs. THÈSE DE DOCTORAT Discipline : Energétique, thermique, combustion Spécialité : Génie des procédés. *Présentée et soutenue publiquement par karim KHIARI Le 13 décembre 2016 à ENSTIM de Nantes*
- [26] P.S. Nigam, A. Singh, Production of liquid biofuels from renewable resources, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37, n° 1, 2011.
- [27] A. Filemon, J. Uriarte, Biofuels from plant oils, Asean Foundation, supported by National Academy of Science and Technology, Government of Japan, 2010.
- [28] Graboski MS, McCormick RL. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Prog Energ Combust Sci* 1998 ; 24:125-64.
- [29] Reyes J.F., Sepulveda M. PM-10 emissions and power of a Diesel engine fueled with crude and refined biodiesel from Salmon oil. *Fuel* 2006; 85: 1714-1719.
- [30] Srivastava P., Verma M. Methyl ester of Karanja oil as an alternative renewable source energy. *Fuel* 2008; 87(8):1673-1677.
- [31] Hazar H., Aydin H. Performance and emission evaluation of a CI engine fueled with preheated raw rapeseed oil (RRO) - Diesel blends. *Applied Energy* 2010; 87(3):786-790.
- [32] Benerab N., Étude comparative des procédés de la transestérification assistée par microonde des huiles végétales et usagées en milieu liquides ioniques, THÈSE DE DOCTORAT Discipline : Science de la matière, Spécialité : Chimie et environnement. *Présentée et soutenue publiquement par Benerab Nouredine, Le 21 juin 2016 à Université M'hamed Bougara de Boumerdès*,
- [33] CEA Techno(s). LA SECONDE GÉNÉRATION SERA THERMOCHIMIQUELe CEA développe des moyens . *CEA Techno(s)* 2008; 89.
- [34] National Renewable Energy Laboratory. *Thermochemical Process Development Unit : Researching Fuels from Biomass* .Consulté le Mai 15, 2010, sur National Renewable Energy Laboratory: <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/44034.pdf> (2009, Janvier).
- [35] Ballerini, D., et Alazard-Toux, N. *Les Biocarburants État des lieux, perspectives et enjeux du développement*. Paris: IFP Publication 2006.
- [36] Moletta, R. *Méthanisation de la biomass*. Consulté le Mai 17, 2010, sur Techniques de l'ingénieur : [ingenieur.fr/book/bio5100/methanisation-de-la-biomasse .html](http://ingenieur.fr/book/bio5100/methanisation-de-la-biomasse.html) Moreault, E. (2010, Janvier 11). De l'eau dans le biocarburant. *Le Soleil* 2008 : 13.

- [37] European Biofuels Technology Platform. Biomass to Liquids (BtL). Consulté le Mai 17, 2010, sur European Biofuels Technology Platform: <http://www.biofuelstp.eu/btl.html>
- [38] Basha S. A., Raja Gopal, K., et Jebaraj S. A Review on Biodiesel Production, Combustion, Emissions and Performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13: 1628–1634 .
- [39] Meher, L. C., Vidya Sagar, D., & Naik, S. N. . Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification—a Review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2006; 10:248-268.
- [40] Ellis N., Guan F., Chen T., Poon C. Monitoring biodiesel production (transesterification) using in situ viscometer. *Chemical Engineering Journal* 2008;138: 200–206
- [41] Demirbas A., Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods, *Progress in Energy and Combustion Science* 2005; 31:466–487
- [42] Demirbas A., Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review, *Applied Energy* 2009 a; 86: 108–117
- [43] West A. H., Posarac D., Ellis N., Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS. *Plant, Bioresource Technology* 2008; 99: 6587–6601
- [44] Balat M., Balat H., A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel, *Energy Conversion Management* 2008; 49: 2727–2741
- [45] Freedman B., and al., Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils, *Journal of the American Oil Chemists Society* 1984; **61**(10): 1638-1643.
- [46] Freedman B., and al., Transesterification kinetics of soybean oil 1, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1986; **63**(10): 1375-1380.
- [47] Agarwal D., Agarwal A. K., Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine, *Applied Thermal Engineering* 2007; 27:2314–2323
- [48] Sharma Y.C., Singh B., Development of biodiesel from karanja, a tree found in rural India, *Fuel* 2008; 87: 1740–1742
- [49] Van Gerpen J., Shanks B., Pruszko R., Clements D., Knothe G., Biodiesel Production Technology, July 2004 NREL/SR-510-36244
- [50] Dias J. M., Alvim-Ferraz M. C.M., Almeida M. F., Production of biodiesel from acid waste lard, *Bioresource Technology* 2009; 100: 6355–6361
- [51] Awad S. , Contribution à l'étude de la valorisation énergétique des résidus gras et de leur combustion dans les moteurs à combustion interne THÈSE DE DOCTORAT Discipline : Sciences pour l'ingénieur Spécialité : Énergétique. *Présentée et soutenue publiquement par Sary AWAD Le 06 Octobre 2011 à ENSTIM de Nantes,*
- [52] Aksoy H. A., I. Kahraman, F. Karaosmanoglu, and H. Civelekoglu, 1988. Evaluation of Turkish sulphur olive oil as an alternative diesel fuel. *JAOCS*, 65(6): 936-938.
- [53] Keim, G.; Treating Fats and Fatty Oils. US Patent No. 2.383.601, 28 de agosto 1945.
- [54] Lam M. K., Lee K. T., Mohamed A., Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review, *Biotechnology Advances* 2010; 28: 500–518
- [55] Yuji Ueki, et al. Optimization of Grafted Fibrous Polymer as a Solid Basic Catalyst for Biodiesel Fuel Production. *International Journal of Organic Chemistry* 2014; 4 :91-105.
- [56] Lam, M.K. et Lee, K.T. . Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology Advances* 2012; 30: 673-690.

- [57] Azcan N., Danisman A., Microwave assisted transesterification of rapeseed oil, *Fuel* 2008; 87: 1781–1788
- [58] Lertsathapornsuk V., Pairintra R., Aryasuk K., Krisnangkur K., Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator, *Fuel processing technology* 2008; 89: 1330–1336
- [59] Ji J., Wang J., Li Y., Yu Y., Xu Z., Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation, *Ultrasonics* 2006; 44:411–414
- [60] Hanh H. D., Dong N. T., Okitsu K., Nishimura R., Maeda Y., Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field, *Renewable Energy* 2009 a; 34: 766–768
- [61] Salamatinia B., Mootabadi H., Bhatia S., Abdullah A. Z., Optimization of ultrasonicassisted heterogeneous biodiesel production from palm oil: A response surface methodology approach, *Fuel Processing Technology* 2010; 91: 441–448
- [62] Yu D., Tian L., Wu H., Wang S., Wang Y., Ma D., Fang X.; Ultrasonic irradiation with vibration for biodiesel production from soybean oil by Novozym 435, *Process Biochemistry* 2010; 45: 519–525
- [63] Fukuda H., Kondoand A., Noda H., Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils, *Journal of Bioscience and Bioengineering* 2001; 92 No. 5: 405 – 416
- [64] Deshpande A., Anitescu G., Rice P.A., Tavlarides L.L., Supercritical biodiesel production and power cogeneration: Technical and economic feasibilities, *Bioresource Technology* 2010; 10:1834–1843
- [65] He H., Wang T., Zhu S., Continuous production of biodiesel fuel from vegetable oil using supercritical methanol process, *Fuel* 2007; 86: 442–447
- [66] Joelianingsiha, Maedaa H., Hagiwaraa S., Nabetania H., Sagarac Y., Soerawidjayad T. H., Tambunane A. H., Abdullah K., Biodiesel fuels from palm oil via the non-catalytic transesterification in a bubble column reactor at atmospheric pressure: A kinetic study, *Renewable Energy* 2008; 33: 1629–1636
- [67] A. SRamadhas et al .Use of vegetable oils as I.C. engine fuels—A review. *Renewable Energy*. 2004; 29, No 5: 727-742
- [68] Prerna Goyal et al . Optimization of Conversion of High Free Fatty Acid *Jatropha curcas* Oil to Biodiesel Using Response Surface Methodology. *International Scholarly Research Network*. 2012; 327049: 8p.
- [69] X. Yuan, J. Liu, G. Zeng, J. Shi, J. Tong, and G. Huang, “Optimization of conversion of waste rapeseed oil with high FFA to biodiesel using response surface methodology,” *Renewable Energy*, 2008; 33, no 7: 1678–1684.
- [70] G. T. Jeong and D. H. Park, “Optimization of biodiesel production from castor oil using response surface methodology,” *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2009; 156, no.1–3: 431–441.
- [71] G. T. Jeong, H. S. Yang, and D. H. Park, “Optimization of transesterification of animal fat ester using response surface methodology,” *Bioresource Technology*, 2009; 100, no 1: 25–30.
- [72] G. Vicente et al .Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production. *Industrial Crops and Products*. 1998; 8, Issue 1: 29-35
- [73] A. K. M. Aminul Islam et al. Preparation of Biodiesel from *Jatropha Hybrid Seed Oil* through Two-step Transesterification. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2015; 37:1550–1559.

- [74] A. V. Tomasevic et al. Methanolysis of used frying oil. *Fuel Processing Technology*. 2003; 81, Issue: 1-6
- [75] Pedro Felizardo et al. Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste Management*. 2006; 26, Issue 5:487-494
- [76] L. H. Chin et al. Process Optimization for Biodiesel Production from Waste Cooking Palm Oil (*Elaeis guineensis*) Using Response Surface Methodology. *Energy Fuels* 2009; 23, 2: 1040–1044.
- [77] P.K. Sahoo et L.M. Das. Process optimization for biodiesel production from *Jatropha*, *Karanja* and *Polanga* oils. *Fuel*. 2009 ; 88, Issue 9 :1588-1594
- [78] J.M. Encinar et al . Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. *Fuel Processing Technology*. 2007; 88, Issue 5: 513-522
- [79] A. Bouaid et al . Optimization of Biodiesel Production from *Jojoba* Oil. *Process Safety and Environmental Protection*. 2007; 85, Issue 5: 378-382
- [80] P. Chitra et al . Optimisation of experimental conditions for biodiesel production from alkali-catalysed transesterification of *Jatropha curcus* oil. *Energy for Sustainable Development*. 2005; 9, Issue 3: 13-18
- [81] M. Canaki et al. Biodiesel production from oils and fat with high free fatty acids. *Soc. Agric. Eng.* 1999; 42, no 5 :1203 .
- [82] Anh N. Phan et al . Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel*. 2008 ; 87, Issues 17–18 : 3490-3496.
- [83] Ashish Birla et al. Kinetics studies of synthesis of biodiesel from waste frying oil using a heterogeneous catalyst derived from snail shell. *Bioresource Technology* 2012; 106: 95–100.
- [84] Ravikumar R, et al. Biofuel Production and Characterization from Waste Chicken Skin and Pig Fat. *IJRTE*. 2019; 8 , Issue-3
- [85] FAO. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2008 - les biocarburants: perspectives, risques et opportunités*. Rome: Food and Agriculture Organisation of the United Nation. 2008.
- [86] ADEME (2012a). Biocarburants : de quoi parle-t-on? In ADEME. *Énergies et matières renouvelables*. <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=23697>. 2012.
- [87] ADEME (2012b). Des qualités techniques et environnementales. In ADEME. *Énergies et matières renouvelables*. <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=23698>. 2012.
- [88] IFPEN. Les carburants alternatifs pour les transports - Les travaux de recherche d'IFP Energies nouvelles, 2012.
- [89] Gabrielle, B. Significance and limitations of first generation biofuels. *Journal de la Societe de biologie* 2008 ; 202(3) : 161-165.
- [90] Gurtler, J. Biocarburants : développement et perspectives. *Oléagineux Corps Gras Lipides* 2008 ; 15(4) : 235-239.
- [91] Teodoro, A. . Un rapport critique les conséquences de l'affectation des sols aux biocarburants. In EurActif.fr. *Énergie & environnement*. 2011.
- [92] Chum, H. L . Advanced biofuels overview: Promises, challenges, and sustainability issues. In Anonyme, *8th World Congress of Chemical Engineering: Incorporating the 59th*

- Canadian Chemical Engineering Conference and the 24th Interamerican Congress of Chemical Engineering*. 2009.
- [93] Lutzky, A. Biocarburants de 2e génération: la solution? *In L'usine Nouvelle. Énergie*. <http://www.usinenouvelle.com/article/biocarburants-de-2e-generation-la-solution.N24102> 2008.
- [94] Dumont, A. (2009). La science à la rescousse des biocarburants. *In Agence Science Presse*. <http://www.sciencepresse.qc.ca/actualite/2009/04/01/science-rescousse-biocarburants>
- [95] Knocke, C. et Vogt, J. Biofuels - challenge & chances: How biofuel development can benefit from advanced process technology. *Energy Life Science* 2009 ; 9(2) ; 96-99.
- [96] CDE (2012). Biocarburant. *In Fondation d'entreprise Alcen pour la connaissance des énergies. Connaissance des énergies*. <http://www.connaissancedesenergies.org/fichepedagogique/biocarburant>. 2012.
- [97] Sims, R., Mabee, W., Saddler, J.N. et Taylor, M. An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology* 2010; 101: 1570-1580.
- [98] Liégeois, P. Le biométhane carburant : une solution prometteuse pour un transport plus vert. *L'eau, l'industrie, les nuisances* 2011 ; 342 : 70-74.
- [99] Suali, E. et Sarbatly, R. Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16(6): 4316-4342
- [100] Brennan, L. et Owende, P. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14(2): 557-577.
- [101] Chisti, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 2007; 25(3): 294-306.
- [102] Chisti, Y. . Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in biotechnology* 2008 ; 26(3) : 126-131.
- [103] La production de biodiesel à partir de cultures oléagineuses, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Publication no EVC 031, 2008
- [104] K. Melhyas, Étude de l'optimisation des conditions opératoires et de l'influence de la teneur en eau de la production du biodiesel par transestérification éthanolique en catalyse basique homogène, mémoire de Master, *Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement*, Burkina Faso, 2010.
- [105] B. Hamad, Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique, Thèse de doctorat, *université Claude Bernard Lyon I*, 2009.
- [106] Mitchell D., A note on rising food prices, The World Bank Development Prospects Group 2008
- [107] S. Mélanie, Biodiesel / Bioéthanol, Quel avenir pour les biocarburants?, p 17, Université de Strasbourg, France 2009.
- [108] Singh S.P., Singh D., Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14: 200–216
- [109] González Gómez, et al., Winterisation of waste cooking oil methyl ester to improve cold temperature fuel properties, *fuel* 2002; 81: 33-39.
- [110] Bouaid A., Martinez M., Aracil J., Long storage stability of biodiesel from vegetable and used frying oils, *Fuel* 2007; 86:2596–2602



- [111] Das L.M., Bora D. K., Pradhan S., Naik M. K., Naik S.N., Long-term storage stability of biodiesel produced from Karanja oil, *Fuel* 2009; 88:2315–2318
- [112] Knothe G., Some aspects of biodiesel oxidative stability, *Fuel Processing Technology* 2007; 88:669–677
- [113] Xin J., Imahara H., Saka S., Kinetics on the oxidation of biodiesel stabilized with antioxidant, *Fuel* 2009; 88:282–286
- [114] Hilaire Bewa, Luc Bodineau, Glossaire ADEME abrégés, Octobre 2004.
- [115] C. Martín, et al., “Fractional characterization of jatropha, neem, moringa, trisperma, castor and candlenut seeds as potential feedstocks for biodiesel production in Cuba,” *Biomass and Bioenergy* 2010; 34(4): 533-538
- [116] E. Aluyor, P. Aluyor, and C. Ozigagu, “Effect of refining on the quality and composition of groundnut oil,” *African Journal of Food Science* 2009; 3, (8), 201-205.
- [117] E. Akbar, Z. Yaakob, S.K. Kamarudin, M. Ismail, and J. Salimon, “Characteristic and composition of Jatropha curcas oil seed from Malaysia and its potential as biodiesel feedstock,” *European Journal of Scientific Research* 2009; 29, (3);396-403.
- [118] Phan A. N., Phan T. M., Biodiesel production from waste cooking oils, *Fuel* 2008; 87: 3490–3496
- [119] Ozbay N., Oktar N., Tapan N. A., Esterification of free fatty acids in waste cooking oils(WCO): Role of ion-exchange resins *Fuel* 2008; 87: 1789–1798
- [120] Demirbas, A. Economic and environmental impacts of the liquid biofuels. *Energy Educat. Sci. Techno.* 2008 ; 22 : 37-58
- [121] Z. Bettahar et al., Etude de la transestérification d’un mélange des huiles usagées pour la production du biodiesel *Revue des Energies Renouvelables* 2016 ; 19 (4) : 605 – 615
- [122] Basu, H.N. et Norris, M.E. (1996). Process for production of esters for use as a diesel fuel substitute using a non-alkaline catalyst. US Patent 5525126.
- [123] Nag A., *Biofuels refining and performance*, McGraw Hill, 2008.
- [124] Sarin, A., *Biodiesel production and properties*, RSC publishing, 2012.
- [125] Geller D. P. and Goodrum J. W., Effects of specific fatty acid methyl esters on diesel fuel lubricity, *Fuel*, 2004; 83: 2351–2356.
- [126] Bhatnagar A. K., Kaul S., Chhibber V. K., and Gupta A. K., HFRR studies on methyl esters of nonedible vegetable oils, *Energy & Fuels* 2006; 20(3): 1341–1344.
- [127] Schober S. and Mittelbach M., The impact of antioxidants on biodiesel oxidation stability, *European Journal of Lipid Science and Technology* 2004; 106: 382–389.
- [128] Prankl H. and Wörgetter M., Influence of the iodine number of biodiesel to the engine performance, In: *Liquid Fuels and Industrial Products from Renewable Resources*, Proceedings of the 3rd Liquid Fuel Conference, J. S., Cundiff, et al. (Eds.), St Joseph, MI:ASAE 1996; 191–196.
- [129] Lapuerta M., Rodriguez-Fernandez J. and de Mora EF., Correlation for the estimation of the cetane number of biodiesel fuels and implications on the iodine number. *Energy Policy* 2009; 37(11): 4337–4344.
- [130] Knothe G. and Steidley K. R., Lubricity of components of biodiesel and petrodiesel, the origin of biodiesel lubricity, *Energy & Fuels* 2005; 19: 1192–1200.
- [131] Knothe G., Dunn R. O., and Bagby M. O., Biodiesel: The use of vegetable oils and their derivatives as alternative diesel fuels, ACS Symposium Series 666, In: *Fuels and Chemical*

- from Biomass, American Chemical Society, Washington, DC 1997; 172–208.
- [132] Dunn R. O. and Bagby M. O., Low-temperature properties of triglyceride-based diesel fuels: Transesterified methyl esters and petroleum middle distillate/ester blends, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1995; 72: 895–904.
- [133] Knothe G., Dunn R. O., Shockley M. W., and Bagby M. O., Synthesis and characterization of some long-chain diesters with branched or bulky moieties, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 2000; 77: 865–871.
- [134] Dunn R. O., Shockley M. W., and Bagby M. O., Improving the low-temperature properties of alternative diesel fuels: Vegetable-oil derived methyl esters, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1996; 73: 1719–1728.
- [135] Lee I., Johnson L. A., and Hammond E. G., Reducing the crystallization temperature of biodiesel by winterizing methyl soyate, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1996; 73: 631.
- [136] Dunn R. O., Shockley M. W., and Bagby M. O., Winterized methyl esters from soybean oil: an alternative diesel fuel with improved low-temperature flow properties, *SAE Technical Paper* 1997; 971682.
- [137] Reitz R.D. and Braco F.B., On the dependence of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions, *SAE Paper* 1979; 790494.
- [138] Kent H., Review of biodiesel composition, properties, and specifications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16: 143-169.
- [139] De Filippis P., Giavarini C., Scarsella M. and Sorrentino M., Transesterification processes for vegetable oils: A simple control method of methyl ester content, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1995; 71: 1399–1404.
- [140] Tat M. E. and Van Gerpen J. H., The kinematic viscosity of biodiesel and its blends with diesel fuel, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1999; 76: 1511–1513.
- [141] Allen C. A. W., Watts K. C., Ackman R. G., and Pegg. M. J, Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition, *Fuel* 1999; 78: 1319–1326.
- [142] Knothe G. and Steidley K. R., Kinematic viscosity of biodiesel fuel components, Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components, *Fuel* 2005; 84: 1059-1065.
- [143] Du L. M. P., Plant oils as diesel fuel extenders: Stability tests and specifications on different grades of sunflower seed and soybean oils, *CHEMSA* 1982; 8: 150–154.
- [144] Knothe G., Analysis of oxidized biodiesel by <sup>1</sup>H-NMR and effect of contact area with air, *European Journal of Lipid Science and Technology* 2006; 108: 493–500.
- [145] Allard L. N et al., Diesel fuel ignition quality as determined in the ignition quality tester (IQT), *SAE Technical Paper* 1996; 961182.
- [146] Canakci M., Monyem A., and Van Gerpen J., Accelerated oxidation processes in biodiesel, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 1999; 42: 1565–1572.
- [147] Knothe G., Structure indices in FA chemistry. How relevant is the iodine value?, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 2002; 79: 847–854.
- [148] Prankl H., Wörgetter M., and Rathbauer J., Technical performance of vegetable oil methyl esters with a high iodine number, In: *Biomass, Proceedings of the 4th Biomass Conference of the Americas*, Oakland, California 1999; 805–810.

- [149] Hu J., Du Z., Liu C., and Min E., Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers, *Fuel* 2005; 84: 1601–1606.
- [150] Drown D. C., Harper K. and Frame E., Screening vegetable oil alcohol esters as fuel lubricity enhancers, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 2001; 78: 579–584.
- [151] Goodrum J. W. and Geller D. P., Influence of fatty acid methyl esters from hydroxylated vegetable oils on diesel fuel lubricity, *Bioresource Technology* 2005; 96(7): 851–855.
- [152] Ramos M. J., Fernández C. M., Casas A., Rodríguez L., Pérez A., Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology* 2009; 100:261–268
- [153] Tsolakis A. Effects on particle size distribution from the diesel engine operating on RME-biodiesel with EGR. 4, s.l.: American Chemical Society, 2006; 20:1418–1424.
- [154] Lapuerta M et al. Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils. s.l.: Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, 2002 :01-1657.
- [155] Senatore A et al. A comparative analysis of combustion process in D.I. Diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel. *SAE* 2000; 01: 0691.
- [156] Kaplan C, Arslan R, Sürmen Ali. Performance Characteristics of Sunflower Methyl Esters as Biodiesel. *Energy Sources*, 2006; 28:751-755.
- [157] Çetinkaya M et al. Engine and winter road test performances of used cooking oil originated biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 2005; 46:1279–1291.
- [158] Yuan-Chung Lin et al. Comparison of PAH and regulated harmful matter emissions from biodiesel blends and paraffinic fuel blends on engine accumulated mileage test. *Energy Fuel*, 2006; 85: 2516–2523.
- [159] Altıparmak D et al. Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester diesel fuel blends. *Bioresource Technology* 2007; 98:241–246.
- [160] İlkılıç C, Yücesub H S. The Use of Cottonseed Oil Methyl Ester on a Diesel Engine. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, 2008; 30:742-753.
- [161] Randall von Wedel. Technical handbook for biodiesel: Marine biodiesel. National Renewable Energy Laboratory. 1999. ACG-7-16688-01.
- [162] Spataru A, Romig C. Emissions and engine performance from blends of soya and canola methyl esters with diesel in a DDC 6V92TA MUI Engine. *SAE Technical Paper*. 1995:25-34.
- [163] Tat M E, Van Gerpen. Measurement of biodiesel speed of sound and its impact on injection timing. National Renewable Energy Laboratory, 2003:510-31462.
- [164] Usta N. An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester. *Energy Conversion Management*, 2005; 46: 2373–2386.
- [165] Tat M E. Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines. 2003. Thesis/dissertation, Manuscript. 59131725. 177
- [166] Monyem A, Van Gerpen, Canakci M. The effect of timing and oxidation on emissions from biodiesel-fueled engines. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1, 2001; 44: 35-42.
- [167] Satputaley SS, et al. Performance, combustion and emission study on CI engine using microalgae oil and microalgae oil methyl esters. *J Energy Inst* 2016.
- [168] Jayaprabakar J, Karthikeyan A. Performance and emission characteristics of rice bran and alga biodiesel blends in a CI engine. *Mater Today: Proc* 2016; 3: 2468–74.
- [169] Singh Devendra, Singal SK, Garg MO, Maiti Pratyush, Mishra Sandhya, Ghosh Pushpito K. Transient performance and emission characteristics of a heavy-duty

- diesel engine fuelled with microalga *Chlorella variabilis* and *Jatropha curcas* biodiesels. *Energy Convers Manag* 2015;106:892–900.
- [170] Atmanli Alpaslan. Comparative analyses of diesel–waste oil biodiesel and pro-panol, n-butanol or 1-pentanol blends in a diesel engine. *Fuel* 2016;176:209–15.
- [171] Pradhan Piasy, Chakraborty Sourojeet, Chakraborty Rajat. Optimization of infrared radiated fast and energy-efficient biodiesel production from waste mustard oil catalyzed by Amberlyst 15: engine performance and emission quality assessments. *Fuel* 2016;173:60–8.
- [172] Zare Ali, Nurun Nabi Md, Bodisco Timothy A, Hossain Farhad M, Rahman MM, Ristovski Zoran D, et al. The effect of triacetin as a fuel additive to waste cooking biodiesel on engine performance and exhaust emissions. *Fuel* 2016;182:640–9.
- [173] Zhu Lei, Xiao Yao, Cheung CS, Guan Chun, Huang Zhen. Combustion, gaseous and particulate emission of a diesel engine fueled with n-pentanol (C5 alcohol) blended with waste cooking oil biodiesel. *Appl Therm Eng* 2016;102:73–9.
- [174] Isik M Zerrakki, Bayındır Hasan, Iscan Bahattin, Aydin Huseyin. The effect of n-butanol additive on low load combustion, performance and emissions of biodiesel–diesel blend in a heavy duty diesel power generator. *J Energy Inst* 2017;90(2):174–84.
- [175] Awad Sary, Loubar Khaled, Tazerout Mohand. Experimental investigation on the combustion, performance and pollutant emissions of biodiesel from animal fat residues on a direct injection diesel engine. *Energy* 2014;69:826–36.
- [176] Gnanasekaran Sakthivel. Prediction of CI engine performance, emission and combustion characteristics using fish oil as a biodiesel at different injection timing using fuzzy logic. *Fuel* 2016;183:214–29.
- [177] Behçet Rasim, Yumrutas Recep, Oktay Hasan. Effects of fuels produced from fish and cooking oils on performance and emissions of a diesel engine. *Energy* 2014;71:645–55.
- [178] Sakthivel G, Nagarajan G, Ilangkumaran M, Gaikwad Aditya Bajirao. Comparative analysis of performance, emission and combustion parameters of diesel engine fuelled with ethyl ester of fish oil and its diesel blends. *Fuel* 2014;132:116–24.
- [179] Buyukkaya Ekrem, Benli Serdar, Karaaslan Salih, Guru Metin. Effects of trout-oil methyl ester on a diesel engine performance and emission characteristics. *Energy Convers Manag* 2013;69:41–8.
- [180] R. Ravikumar et al. Experimental Analysis of Biofuel Produced from Fat Derivatives of Bird and Animal as an Additive Fuel in CI Engine. *IJORER*, 2020; 3.
- [181] Sunil Kumar et al. Experimental Study on Biodiesel Production Parameter Optimization of *Jatropha*–Algae Oil Mixtures and Performance and Emission Analysis of a Diesel Engine Coupled with a Generator Fueled with Diesel/Biodiesel Blends. *ACS Omega* 2020; 5: 17033–17041.
- [182] Hirkude Jagannath Balasaheb, Padalkar Atul S. Performance and emission analysis of a compression ignition Engine operated on waste fried oil methyl esters”. *Appl Energy* 2012;90:68–72.
- [183] Can Ozer. Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture. *Energy Convers Manag* 2014;87:676–86.

- [184] Nantha Gopal K, et al . Investigation of emissions and combustion characteristics of a CI engine fueled with waste cooking oil methyl ester and diesel blends. *Alex Eng J* 2014;53:281–7.
- [185] Bhaskar K, Nagarajan G, Sampath S. Optimization of FOME (fish oil methyl esters) blend and EGR (exhaust gas recirculation) for simultaneous control of NO<sub>x</sub> and particulate matter emissions in diesel engines. *Energy* 2013;62:224–34.
- [186] Sanli H, Canakci M, Alptekin E, Turkcan A, Ozsezen AN. Effects of waste frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine. *Fuel* 2015;159:179–87.
- [187] An H, Yang WM, Maghbouli A, Li J, Chou SK, Chua KJ. Performance, combustion and emission characteristics of biodiesel derived from waste cooking oils. *Appl Energy* 2013;112:493–9.
- [188] Muralidharan K, Vasudevan D. Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends. *Appl Energy* 2011;88:3959–68.
- [189] M. Senthil Kumar et al. Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel – Part 2: Engine test analysis. *Fuel* 85 (2006) 2646–2652.
- [190] Muhammad Aminul Islam et al. Combustion analysis of microalgae methyl ester in a common rail direct injection diesel engine. *Fuel* 2015; 143: 351–360
- [191] Haik Y, Selim MYE, Abdulrehman T. Combustion of algae oil methyl ester in an indirect injection diesel engine. *Energy* 2011;36(3):1827–35.
- [192] Banapurmath N.R. et al. Combustion and emission characteristics of a direct injection CI engine when operated on Marotti oil methyl ester and blends of Marotti oil methyl ester and diesel. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2009; 3: 192–200
- [193] Banapurmath N.R. et al. Experimental investigations of a four-stroke single cylinder direct injection diesel engine operated on dual fuel mode with producer gas as inducted fuel and Honge oil and its methyl ester (HOME) as injected fuels. *Renewable Energy* 2008;33: 2007–2018
- [194] Aakash G. et al. Performance, Emission and Combustion Characteristics of a Diesel Engine using “Cotton Seed Oil and Microalgae Oil” Methyl Ester. *IJLTEMAS*, 2017; VI: Issue IX
- [195] R. PRADEEPRAJ et K. RAJAN . An experimental investigation on diesel engine performance using moringa olifera biodiesel with the effect of different injection pressures. *IJMPERD*,2019 ; 9 : 549-560.
- [196] Ashok B. et al. Calophyllum inophyllum methyl ester biodiesel blend as an alternate fuel for diesel engine applications. *Alexandria Engineering Journal* 2017
- [197] Banapurmath N.R. et al. Performance and emission characteristics of a DI compression ignition engine operated on Honge, Jatropha and sesame oil methyl esters. *Renewable Energy* 2008; 33: 1982–1988
- [198] Silitonga AS, et al. Biodiesel conversion from high FFA crude jatropha curcas, Calophyllum inophyllum and Ceiba pentandra oil. *Energy Proc* 2014; 61: 480–4
- [199] Ong HC, et al. Optimization of biodiesel production and engine performance from high free fatty acid Calophyllum inophyllum oil in CI diesel engine. *Energy Convers Manage* 2014; 81: 30–40.
- [200] Rizwanul Fattah IM, et al. Effect of antioxidant on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm biodiesel blends. *Energy Convers Manage* 2014; 79:265–8.

- [201] Bhupendra Singh Chauhan et al. A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with *Jatropha* biodiesel oil and its blends. *Energy* 2012; 37: 616-622
- [202] Banapurmath N.R. et al. Combustion and emission characteristics of a direct injection, compression-ignition engine when operated on Honge oil, HOME and blends of HOME and diesel. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2008; 2:80–93
- [203] Rodriuez RP, Sierens R, Verhelst S. Ignition delay in a palm oil and rapeseed oil biodiesel fuelled engine and predictive correlations for the ignition delay period. *Fuel* 2011; 90:766e72.
- [204] Piloto-Rodríguez R, Sánchez-Borroto Y, Lapuerta M, Goyos-Pérez L, Verhelst S. Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression. *Energy Convers Manag* 2013; 65: 255e61.
- [205] Alptekin Ertan, Canakci Mustafa, Ozsezen Ahmet Necati, Turkcan Ali, Sanli Huseyin. Using waste animal fat based biodiesel bioethanol–diesel fuel blends in a DI diesel engine. *Fuel* 2015;157:245–54.
- [206] Valente Osmano Souza, et al.. Exhaust emissions from a diesel power generator fuelled by waste cooking oil biodiesel. *Sci Total Environ* 2012;431:57–61.
- [207] Mikulski Maciej, Duda Kamil, Wierzbicki Slawomir. Performance and emissions of a CRDI diesel engine fuelled with swine lard methyl esters–diesel mixture. *Fuel* 2016;164:206–19.
- [208] Kalargaris Ioannis, Tian Guohong, Gu Sai. Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Process Technol* 2017;157:108–15.
- [209] Ushakov Sergey, Valland Harald, Esøy Vilmar. Combustion and emissions characteristics of fish oil fuel in a heavy-duty diesel engine. *Energy Convers Manag* 2013;65:228–38.
- [210] Cheung CS, Man XJ, Fong KW, Tsang OK. Effect of waste cooking oil biodiesel on the emissions of a diesel engine. *Energy Procedia* 2015;66:93–6.
- [211] Hansen AC, Kyritsis DC, Lee CF. Characteristics of biofuels and renewable fuel standards. In: Vertes AA, Qureshi N, Blaschek HP, Yukawa H, editors. *Biomass to biofuels - strategies for global industries*. Oxford: Blackwell Publishing; 2009.
- [212] Gopinath A, Puhani S, Nagarajan G. Theoretical modeling of iodine value and saponification value of biodiesel fuels from their fatty acid composition. *Renew Energ* 2009; 34: 1806-11.
- [213] Pinzi S, Leiva D, Arzamendi G, Gandia LM, Dorado MP. Multiple response optimization of vegetable oils fatty acid composition to improve biodiesel physical properties. *Biores Technol* 2011; 102: 7280-8.
- [214] Demirbas A. Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels. *Fuel* 2008; 87: 1743-8.
- [215] Ramirez-Verduzco LF, Rodriguez-Rodriguez JE, Jaramillo-Jacob ADR. Prediction of cetane number, kinematic viscosity, density, and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. *Fuel* 2012; 91:102-11.
- [216] Giakoumis EG, A statistical investigation of biodiesel physical and chemical properties, and their correlation with the degree of unsaturation. *Renewable Energy* 2012; 07.040.
- [217] Giakoumis EG, Rakopoulos CD, Dimaratos AM, Rakopoulos DC. Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends. *Prog Energ Combust Sci* 2012;38: 691-705.
- [218] Giakoumis EG. A statistical investigation of biodiesel effects on regulated exhaust

- emissions during transient cycles. *Appl Energy* 2012; 98: 273-91.
- [219] Agarwal AK. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels in internal combustion engines. *Prog Eng Combust Sci* 2007; 32:233-71.
- [220] Hwai Chyuan Ong et al. . Engine performance and emissions using *Jatropha curcas*, *Ceiba pentandra* and *Calophyllum inophyllum* biodiesel in a CI diesel engine. *Energ* 2014; 01-19
- [221] Rachan Karmakar et al. Fuel properties and emission characteristics of biodiesel produced from unused algae grown in India. *Petroleum Science* 2017; s12182-017-0209-7.
- [222] Gvidonas Labeckas, Stasys Slavinskas. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection Diesel engine performance and exhaust emissions. *Energy conv.& management* 2005; 49: 1954-1967.
- [223] H.C. Ong et al. Comparison of palm oil, *Jatropha curcas* and *Calophyllum inophyllum* for biodiesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy* 2012; 44: 955-963
- [224] McCormick RL, Graboski MS, Alleman TL, Herring AM. Impact of biodiesel source material and chemical structure on emissions of criteria pollutants from a heavy-duty engine. *Environ Sci Technol* 2001; 35:1742-7.
- [225] Giakoumis EG, Rakopoulos CD, DimaratosAM, Rakopoulos DC. Combustion noise radiation during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with biodiesel or n-butanol diesel fuel blends. *IMEchE* 2012; 226: 971-86. 226 (Part D).
- [226] Peterson CL, Taberski JS, Thompson JC, Chase CL. The effects of biodiesel feedstock on regulated emissions in chassis dynamometer tests of a pickup truck. *Trans ASABE* 2000;43: 1371-81.
- [227] Klopfenstein WE. Effect of molecular weights of fatty acid esters on cetane numbers as diesel fuels. *J Am Oil Chem Soc* 1985; 62: 1029-31.
- [228] Rodrigues JA, Cardoso FP, Lachter ER, Estevao LRM, Lima E, Nascimento RSV. Correlating chemical structure and physical properties of vegetable oil esters. *J Am Oil Chem Soc* 2006; 83: 353-7.
- [229] Knothe G. “Designer” biodiesel: optimizing fatty ester composition to improve fuel properties. *Energy Fuels* 2008;22: 1358-64.
- [230] Moser BR, Williams A, Haas MJ, McCormick RL. Exhaust emissions and fuel properties of partially hydrogenated soybean oil methyl esters blended with ultra low sulfur diesel fuel. *Fuel Process Technol* 2009; 9: 1122-8.
- [231] Rakopoulos CD, Antonopoulos KA, Rakopoulos DC, Hountalas DT, Giakoumis EG. Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or biodiesels of various origins. *Energ Convers Manag* 2006; 47: 3272-87.
- [232] Imahara H, Minami E, Saka S. Thermodynamic study on cloud point of biodieselwith its fatty acid composition. *Fuel* 2006; 85: 1666-70.
- [233] Knothe G. Improving biodiesel fuel properties by modifying fatty ester composition. *Energ Environ Sci* 2009; 2:759-66.
- [234] Bhale PV, Deshpande NV, Thombre SB. Improving the low temperature properties of biodiesel fuel. *Renew Energ* 2009; 34:794-800.
- [235] Sharanappa Godiganur et al. 6BTA 5.9 G2-1 Cummins engine performance and emission tests using methyl ester mahua (*Madhuca indica*) oil/diesel blends. *Renew Energ* 2009; 34: 2172–2177.

- [236] Syed Aalam C. Reduction of Emissions from Common-rail Diesel Engine using Mahua and Pongamia Methyl Esters. IJAERS 2019; 6(4): 268-277.
- [237] Saravanan N. et al. Experimental investigation on a DI diesel engine fueled with Madhuca Indica ester and diesel blend. biomass and bioenergy 2010; 34: 838–843
- [238] Amarnath H. K. et Prabhakaran P. A study on the thermal performance and emissions of a variable compression ratio diesel engine fuelled with karanja biodiesel and the optimization of parameters based on experimental data. International Journal of Green Energy 2012; 9: 841–863
- [239] Deshmukh S.J., Bhuyar L.B. Transesterified Hingan (Balanites) oil as a fuel for Compression ignition engines. Biomass and bioenergy 2009; 33: 108–112
- [240] Tarabet I. et al. Eucalyptus Biodiesel as an Alternative to Diesel Fuel: Preparation and Tests on DI Diesel Engine. Journal of Biomedicine and Biotechnology, 2012; 23548.
- [241] Alloune R. et al. Performance, combustion and exhaust emissions characteristics investigation using Citrullus colocynthis L. biodiesel in DI diesel engine. Journal of the Energy Institute 2017; xxx: 1-11.
- [242] Khiari k. et al. Experimental investigation of pistacia lentiscus biodiesel as a fuel for direct injection diesel engine. Energy Conversion and Management 2016; 108: 392–399
- [243] Kezrane C., Combustions alternatives dans les moteurs à combustion interne, Cas des moteurs alimentés en biocarburants. THÈSE DE DOCTORAT Discipline : Sciences de l'ingénieur Spécialité : Systèmes Energétiques avancés. *Présentée et soutenue publiquement par Cheikh KEZRANE Année 2015/2016 à Université Boumerdes*
- [244] Nadia Mrad et al. Effects of biofuel from fish oil industrial residue e Diesel blends in diesel engine. Energy 2012; 44: 955-963
- [245] Ambarish Datta et al. An experimental study on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with Jatropha biodiesel and its blends with diesel. Journal of Mechanical Science and Technology 2014; 28(5): 1961-1966
- [246] Lounici M. S., Contribution à la réduction de la pollution urbaine en Algérie par recours à l'utilisation de carburants alternatifs. THÈSE DE DOCTORAT Discipline : Sciences de l'ingénieur Spécialité : Energétiques. *Présentée et soutenue publiquement par Mohand Said LOUNICI le 03 Novembre 2011 à Université Boumerdes,*
- [247] Heywood J. B., Internal combustion engines fundamentals, Mc Graw Hill, 1988
- [248] Colin R. Ferguson, Allin T. Kirkpatrick . Internal combustion engines, applied thermo sciences, third edition. New York: Wiley, 2016.
- [249] Kreiger R. B. and. Borman G. L. The computation of apparent heat release for internal combustion engines. ASME(66-WA, DGP-4), 1966.
- [250] Borman G., Nishiwaki K. Internal-combustion engine heat transfer. Progress in. Energy and Combustion. Sciences 1987; 13: 1–46.
- [251] G. Eichelberg, Some New Investigations on Old Combustion Engine Problems, Engineering 1939; 148: 446-463.
- [252] Woschni G, Doll M, Spindler W. Simulation of the stationary and transient performance of small high speed car diesel engines. MTZ 1991; 52:468–77.
- [253] Aklouch F. Z. et al. Predictive model of the diesel engine operating in dual-fuel mode fuelled with different gaseous fuels. Fuel 2018; 220: 599–606

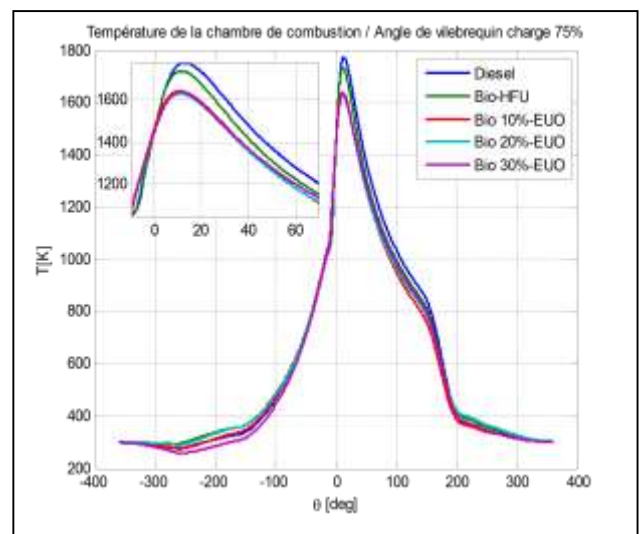
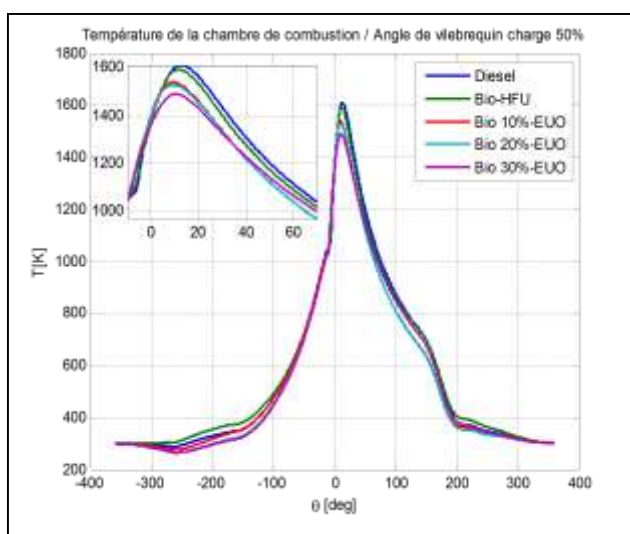
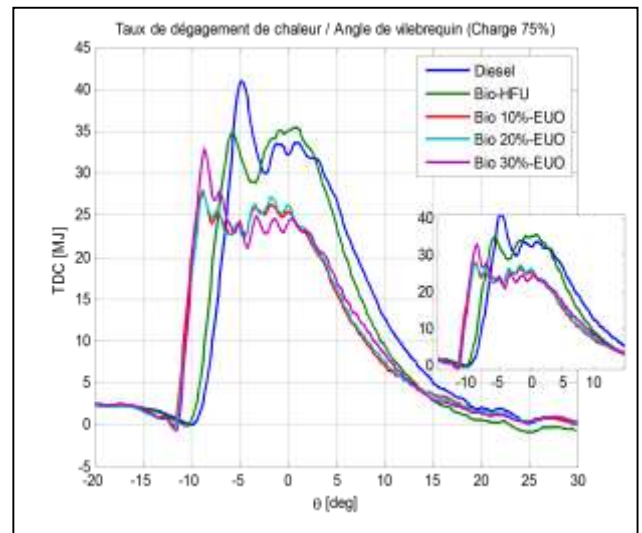
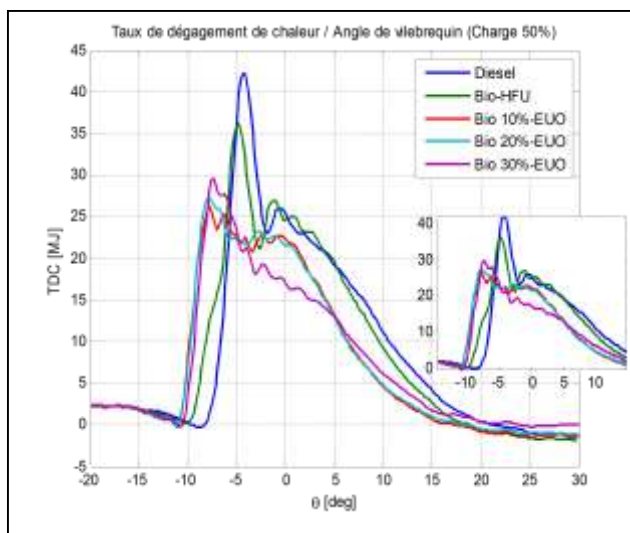
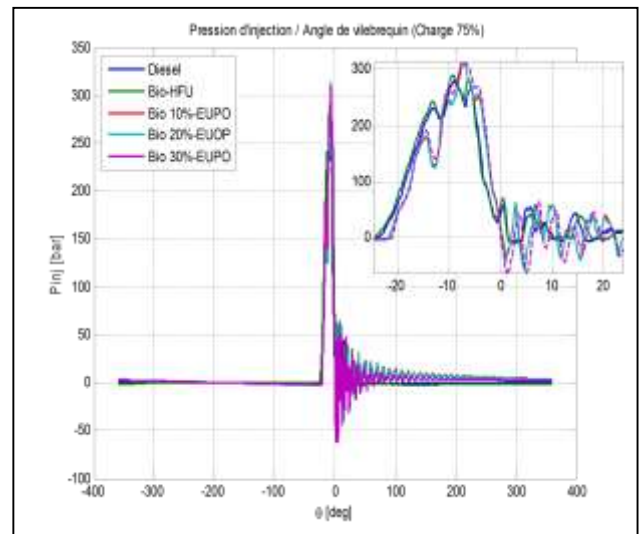
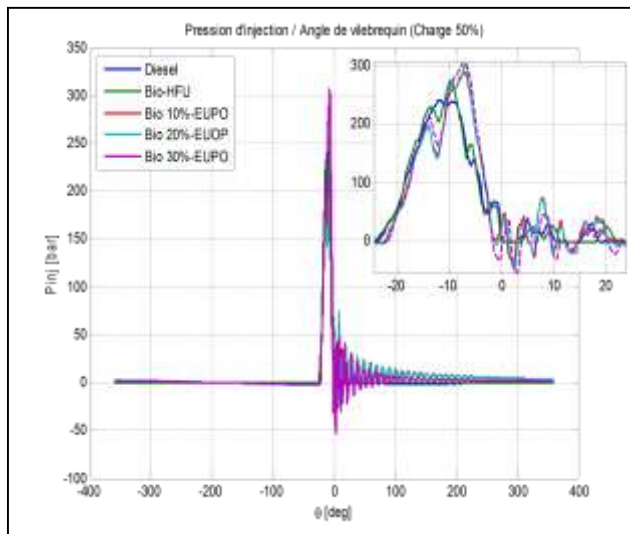


**Tableau Méthodes et limites du biodiesel des normes ASTM D-6751 et EN 14214.**

<i>Propriété / unités</i>	<i>Méthode d'essai</i>		<i>Limites de l'ASTM</i>	<i>Méthode d'essai EN</i>		<i>Limites de EN</i>
	<i>ASTM</i>					
Stabilité à l'oxydation à 110 °C/h	EN 14112		Min. 3 h	EN-ISO 14112		Min. 6 h
Point trouble / °C	D-2500		-3 à -12	EN-ISO 23015		-
Point d'écoulement / °C	D-97		-15 à -16	EN-ISO 3016		-
Point de colmatage du filtre froid/ °C	D-6371		5 (max)	EN 116		Variable
Filtrabilité à froid / s (max)	D-7501		360			-
Viscosité à 40 °C / mm <sup>2</sup> /s	D-445		1,9 à 6,0	EN-ISO 3104		3,5-5,0
Cendres sulfatées /% masse	D-874		0,002 (max)	EN ISO 3987		0,02 (max)
Soufre /% masse	D-5453 / D-4294		0,0015 (S15, max) 0,05 (S500, max)	EN-ISO 20846/20884		0,0010 (max)
Le sodium et le potassium / mg.kg <sup>-1</sup>			-	EN 14108/14109		5 (max)
Le calcium et le magnésium / mg.kg <sup>-1</sup>			-	EN 14538		5 (max)
Point éclair / °C	D-93		130 (min)	EN-ISO 3679		101 (min)
Indice de cétane	D-613		47 (min)	EN-ISO 5165		51 (min)
Le méthanol ou l'éthanol /% masse			-	EN 14110		0,20%
la corrosion de la bande de cuivre	D-130		3 (max)	EN-ISO 2160		1 (max)
Le phosphore /% masse	D-4951		0,001 (max)	EN 14107		0,001 (max)
résidu de carbone Conradson (100%) /% masse	D-4530		Max. 0,05	EN ISO 10370		0,3 (max)
Teneur en esters /% masse			-	EN 14103		96,5 (min)
Température de distillation / °C	D-1160		90% à 360 °C			-
Contamination totale / mg.kg <sup>-1</sup>			-	EN-ISO 12662		24 (max)
L'eau et les sédiments /% vol.	D-2709		0,005 vol %	EN-ISO		500 mg/kg
Indice d'acide / mg. KOH/mg par g	D-664		0,5 (max)	EN-ISO 14104		0,5 (max)
Glycérine libre /% masse	D-6584		0,02 (max)	EN-ISO 14105/14106		0,02 (max)
Glycérine totale /% masse	D-6584		0,24 (max)	EN-ISO 14105		0,25 (max)
Mono-glycéride /% masse			-	EN ISO 14105		Max. 0,8
di-glycérides /% masse			-	EN ISO 14105		Max. 0,2
Teneur de triglycérides /% masse			-	EN ISO 14105		Max. 0,2
Densité / kg.m <sup>-3</sup>	D-1298		880	EN ISO 14105		860-900
Lubrlicité @ 60 °C, WSD / µm	D-6079		520 (max)	EN 3675		-

## Annexe A

## Annexe B



## Annexe C

## Matrice de corrélation (Puissance 1,125 kW)

Var	Visc	densité	PC	IC	PE	BTE	CSC	DA	DC	Pic P	TC	Nox	CO	HC	PM
Viscosité	<b>1</b>														
densité	0,619	<b>1</b>													
PC	-0,962	-0,786	<b>1</b>												
IC	0,031	0,772	-0,291	<b>1</b>											
PE	0,927	0,714	-0,976	0,277	<b>1</b>										
BTE	0,519	-0,090	-0,455	-0,306	0,604	<b>1</b>									
CSC	-0,193	0,432	0,100	0,490	-0,277	-0,929	<b>1</b>								
DA	-0,489	-0,912	0,707	-0,864	-0,720	-0,118	-0,176	<b>1</b>							
DC	-0,213	0,450	0,095	0,524	-0,250	-0,915	0,974	-0,225	<b>1</b>						
Pic P	-0,116	0,514	-0,122	0,731	0,167	-0,255	0,315	-0,641	0,491	<b>1</b>					
TC	0,045	-0,640	0,101	-0,726	0,054	0,763	-0,920	0,461	-0,863	-0,341	<b>1</b>				
Nox	0,134	-0,250	-0,127	-0,278	0,315	0,752	-0,822	-0,012	-0,672	0,207	0,834	<b>1</b>			
CO	-0,262	0,319	0,194	0,440	-0,373	-0,898	0,947	-0,083	0,856	0,085	-0,922	-0,950	<b>1</b>		
HC	-0,917	-0,401	0,873	0,099	-0,924	-0,805	0,551	0,414	0,535	0,112	-0,391	-0,491	0,617	<b>1</b>	
PM	-0,348	0,052	0,355	0,172	-0,533	-0,844	0,825	0,197	0,691	-0,207	-0,763	-0,969	0,948	0,673	<b>1</b>

## Matrice de corrélation (Puissance 2,25 kW)

Var	Visc	densité	PC	IC	PE	BTE	CSC	DA	DC	Pic P	TC	Nox	CO	HC	PM
Viscosité	<b>1</b>														
densité	0,619	<b>1</b>													
PC	-0,962	-0,786	<b>1</b>												
IC	0,031	0,772	-0,291	<b>1</b>											
PE	0,927	0,714	-0,976	0,277	<b>1</b>										
BTE	0,447	-0,136	-0,391	-0,298	0,553	<b>1</b>									
CSC	0,036	0,567	-0,114	0,479	-0,077	-0,869	<b>1</b>								
DA	-0,213	-0,893	0,456	-0,962	-0,412	0,328	-0,592	<b>1</b>							
DC	-0,130	0,533	-0,112	0,910	0,144	-0,119	0,205	-0,769	<b>1</b>						
Pic P	0,205	0,230	-0,337	0,266	0,501	0,558	-0,459	-0,286	0,198	<b>1</b>					
TC	0,363	-0,416	-0,206	-0,683	0,337	0,883	-0,850	0,655	-0,565	0,395	<b>1</b>				
Nox	0,129	-0,183	-0,151	-0,168	0,348	0,786	-0,798	0,183	-0,112	0,884	0,738	<b>1</b>			
CO	-0,326	0,286	0,250	0,447	-0,422	-0,935	0,891	-0,442	0,337	-0,657	-0,947	-0,908	<b>1</b>		
HC	-0,932	-0,484	0,911	0,004	-0,956	-0,720	0,291	0,127	0,082	-0,471	-0,585	-0,456	0,615	<b>1</b>	
PM	-0,288	0,084	0,299	0,176	-0,481	-0,823	0,758	-0,154	0,156	-0,884	-0,777	-0,986	0,930	0,589	<b>1</b>

## Annexe C (suite)

## Matrice de corrélation (Puissance 3,725 kW)

Var	Visc	densité	PC	IC	PE	BTE	CSC	DA	DC	Pic P	TC	Nox	CO	HC	PM
Viscosité	<b>1</b>														
densité	0,619	<b>1</b>													
PC	-0,962	-0,786	<b>1</b>												
IC	0,031	0,772	-0,291	<b>1</b>											
PE	0,927	0,714	-0,976	0,277	<b>1</b>										
BTE	0,481	-0,139	-0,412	-0,351	0,570	<b>1</b>									
CSC	0,093	0,596	-0,166	0,489	-0,030	-0,825	<b>1</b>								
DA	-0,364	-0,898	0,604	-0,915	-0,611	0,053	-0,357	<b>1</b>							
DC	-0,397	0,381	0,149	0,879	-0,121	-0,403	0,276	-0,650	<b>1</b>						
Pic P	0,496	-0,135	-0,418	-0,415	0,565	0,960	-0,785	0,069	-0,521	<b>1</b>					
TC	0,435	-0,432	-0,215	-0,807	0,277	0,774	-0,642	0,570	-0,831	0,762	<b>1</b>				
Nox	0,494	0,127	-0,521	0,023	0,683	0,919	-0,693	-0,275	-0,044	0,817	0,515	<b>1</b>			
CO	0,391	-0,434	-0,136	-0,837	0,126	0,507	-0,376	0,689	-0,852	0,475	0,928	0,241	<b>1</b>		
HC	-0,939	-0,483	0,911	0,037	-0,948	-0,720	0,215	0,348	0,411	-0,748	-0,542	-0,710	-0,377	<b>1</b>	
PM	-0,576	-0,234	0,603	0,035	-0,736	-0,812	0,547	0,337	0,264	-0,896	-0,429	-0,777	-0,101	0,813	<b>1</b>

## Matrice de corrélation (Puissance 4,5 kW)

Var	Visc	densité	PC	IC	PE	BTE	CSC	DA	DC	Pic P	TC	Nox	CO	HC	PM
Viscosité	<b>1</b>														
densité	0,987	<b>1</b>													
PC	-0,805	-0,832	<b>1</b>												
IC	-0,886	-0,863	0,496	<b>1</b>											
PE	0,556	0,571	-0,926	-0,175	<b>1</b>										
BTE	0,203	0,166	-0,622	0,205	0,854	<b>1</b>									
CSC	-0,072	0,038	0,267	-0,213	-0,508	-0,847	<b>1</b>								
DA	-0,869	-0,785	0,481	0,865	-0,252	-0,087	0,239	<b>1</b>							
DC	-0,748	-0,739	0,954	0,468	-0,941	-0,719	0,441	0,506	<b>1</b>						
Pic P	0,942	0,936	-0,948	-0,700	0,802	0,499	-0,275	-0,733	-0,913	<b>1</b>					
TC	0,411	0,285	0,069	-0,483	-0,204	-0,076	-0,348	-0,793	0,013	0,232	<b>1</b>				
Nox	-0,302	-0,328	-0,221	0,579	0,569	0,834	-0,716	0,374	-0,385	0,015	-0,389	<b>1</b>			
CO	-0,223	-0,080	0,174	0,059	-0,309	-0,621	0,921	0,519	0,357	-0,305	-0,671	-0,419	<b>1</b>		
HC	-0,668	-0,665	0,946	0,289	-0,981	-0,838	0,554	0,418	0,956	-0,878	0,018	-0,470	0,415	<b>1</b>	
PM	-0,915	-0,844	0,736	0,758	-0,589	-0,425	0,441	0,929	0,770	-0,902	-0,609	0,067	0,597	0,723	<b>1</b>