

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

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Chimique

## Mémoire de Master en Génie Chimique

Thème :

# Les carburants alternatifs en Algérie

Présenté par :

Hakim BOUNOUA

Soutenu le 17 juin 2015 devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	E-H. BENYOUSSEF	Professeur, ENP
<b>Examineurs :</b>	F. MEZIANI K. DALI	MAA, ENP Directeur des projets, APRUE
<b>Invité :</b>	M. A. AZIZA	Directrice de recherche, CDER
<b>Rapporteur :</b>	C. E. CHITOUR	Professeur, ENP

ENP 2015

# REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier très vivement monsieur le Professeur Chems Eddine CHITOUR de m'avoir fait l'honneur de diriger ce travail, pour ces conseils judicieux et ces orientations. Je le remercie de m'avoir fait découvrir et aimer le monde de l'énergie.*

*Je tiens à remercier Monsieur le Professeur BENYOUSSEF et Mme MEZIANI pour avoir accepté de participer à ce jury et pour leurs encadrements durant le cursus ingénieur.*

*Mes remerciements s'adressent également à Monsieur K. DALI et Mme M. A. AZIZA pour avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Je remercie l'ensemble des enseignants du département de génie chimique, ainsi que tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce document.*

## ملخص:

### أنواع الوقود البديلة في الجزائر

عرف الطلب على المنتجات النفطية المستخدمة في مجال النقل في السنوات الأخيرة تطورا هاما. هذا ما قد يسبب انخفاضا في موارد النفط الوطنية إذا وصلنا بهذه الوتيرة من الاستهلاك.

تبين هذه الدراسة غير حصرية البدائل الممكنة للوقود التقليدي، البنزين والديزل

**كلمات المفاتيح:** غاز البترول المسال، الغاز الطبيعي وقود، وقود الديزل الحيوي، البنزين، وقود الديزل، قطاع النقل

## Résumé :

### **Les carburants alternatifs en Algérie**

La demande en produits pétroliers, utilisés essentiellement dans le domaine des transports, a connu ces dernières années une évolution importante. Les ressources pétrolières nationales risquent à ce rythme de consommation de diminuer rapidement.

Cette étude non exhaustive montre les alternatives possibles aux carburants classiques, essence et gasoil.

Mots clés : Gaz de pétrole liquéfié, Gaz naturel carburant, Biodiesel, Essence, Gasoil, *secteur du transport*.

## Abstract :

### **Alternative fuels in Algeria**

The demand for oil products, used mainly in the field of transport, has increased sharply in the last decade. National oil resources may decrease rapidly at this rate of consumption.

This non-exhaustive study shows the alternatives to conventional fuels, gasoline and diesel.

Keywords: Liquefied petroleum gas, Natural gas fuel, Biodiesel, Gasoline, Gasoil, the transport sector.

## **Abréviations :**

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France)

ATEE : Association Technique Energie Environnement

DGF : Direction Générale des Forêts

EIA : Energy Information Administration (États-Unis)

EUDC: extra urbain driving cycle

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

GNC : Gaz naturel carburant

GNL : Gaz naturel liquéfié

GNV : Gaz naturel pour véhicule

GPL : Gaz de pétrole liquéfié

GPLc : Gaz de pétrole liquéfié carburant

Gtep : Géga tonne équivalent pétrole

IFP : Institut français du pétrole

KWh : kilo watt-heur

MEM : Ministère de l'énergie et des mines (Algérie)

Ms : Matière sèche

MPa : Méga pascal

MPS Matière Première Secondaire

PCI: Pouvoir calorifique inférieur

## **Index des illustrations :**

### **Index des figures :**

Figure II.1 : Comparaison des ressources et réserves mondiales au regard de la production de gaz

Figure II.2 : Émissions comparées essence-gaz naturel de véhicules légers sur cycle ECE-EUDC

Figure II.3 : Analyse du puits à la roue des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction des filières carburants et des motorisations

Figure II.4 : Ventes de véhicules suivant l'infrastructure de recharge disponible dans chaque pays (nombre de stations)

Figure III.1 : Le fétuque

Figure III.2 : La canne de Provence

Figure III.3 : Diagramme de déroulement de la fermentation alcoolique

Figure IV.1 : différentes voies de production du biométhane carburant

Figure IV.2 : Cout de production du biogaz épuré en fonction des substrats utilisés

Figure IV.3 : Cycle de vie des matières méthanisées

Figure V.1 : Procédé de récupération et de traitement des huiles usagées

Figure V.2 : Schéma global pour une catalyse homogène continue

Figure V.3 : Schéma du procédé Esterfip Hétérogène

Figure VII.1 : Comparaison de rendement du moteur thermique et électrique

Figure VII.2 : Émissions de CO<sub>2</sub>, du puits à la roue, des véhicules électriques et thermiques

Figure VII.3 : Coût de possession du véhicule intégrant le coût des infrastructures

### **Index des Tableaux :**

Tableau I.1 : Emissions comparées, mesurées sur moteur GPLc et à essence

Tableau I.2 : Caractéristiques comparées essence, gazole et GPLc

Tableau I.3 : Consommation de GPLc en Algérie

Tableau II.1 : Comparaison de l'énergie stockée pour un même volume de carburant

Tableau III.1 : Occupation des terres forestières en Algérie

Tableau III.2 : Répartition des essences constituant la forêt en Algérie

Tableau III.3 : Composition de la fétuque

Tableau III.4 : Composition de la canne de Provence

Tableau III.5 : Composition du cardon

Tableau V.1 : Cout de production du biodiesel selon le type de matière première

# Table des matières :

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Le gaz de pétrole liquéfié</b>	
I.1. Introduction :.....	2
I.2. Définition :.....	2
I.3. Le GPL carburant (GPLc).....	2
I.4. Provenance du GPL dans le monde : .....	2
I.5. Avantages du GPLc : .....	3
I.6. Inconvénients du GPLc :.....	4
I.7. Utilisation du GPLc dans le monde : .....	4
I.8. Le GPLc en Algérie : Utilisation actuelle et perspective.....	5
I.8.1. Consommation de GPLc en Algérie : .....	5
I.9. Conclusion : .....	6
<b>Chapitre II : Le gaz naturel comprimé</b>	
II.1. Introduction : .....	7
II.2. Panorama mondiale du marché des véhicules au gaz naturel.....	7
II.3. Ressource gazière dans le monde : .....	8
II.4. Ressource gazière en Algérie : .....	9
II.5. Le gaz naturel dans le contexte de la pollution atmosphérique.....	9
II.5.1. Réduction des émissions de polluants : .....	9
II.5.2. Émissions du « puits à la roue » : .....	10
II.6. Contraintes propres du moteur à gaz naturel : .....	11
II.6.1. Problématique du stockage : .....	11
II.6.2. Augmentation du ratio énergie/volume/masse : .....	11
II.6.3. Sécurité : .....	13
II.6.4. Mode de combustion :.....	14
II.6.5. Véhicules dédiés. Véhicules à bicarburation : .....	14
II.6.6. Station GNC à domicile : .....	15
II.7. Le GNC en Algérie :.....	15
II.8. Conclusion : .....	16
<b>Chapitre III : Les biocarburants</b>	
III.1. Introduction :.....	17
III.2. Définitions :.....	17
III.3. Potentiel en biocarburant de l'Algérie : .....	18
III.3.1. Aperçu sur la forêt algérienne : .....	18

III.3.1.1. Espèces valorisable en biocarburant :	20
III.3.1.1.1. Le chêne :	20
III.3.1.1.2. Les gousses du caroubier :	21
II.3.2. Les espèces valorisables en biocarburant deuxième génération :	21
III.3.2.1. La fétuque ( <i>Festuca arundinacea</i> ):	21
III.3.2.2. La canne de Provence ( <i>Arundo donax</i> ) :	22
III.3.2.3. Le cardon ( <i>Cynara cardunculus</i> ) :	23
III.3.2.4. Les raquettes du figuier de barbarie ( <i>Opuntia ficus indica</i> ) :	24
III.3.2.5. L'eucalyptus :	24
III.3.2.6. <i>Jatropha curcas</i> :	25
III.3.2.7. <i>Moringa oleifera</i> :	25
III.3.3. Quelques matières sous forme de déchets pouvant être transformées en biocarburant :	25
III.3.3.1. Pommes de terre déclassées et épluchures :	25
III.3.3.2. Les rebuts de dattes :	26
III.4. Conclusion:	28

#### **Chapitre IV : Le biométhane carburant**

IV.1. Introduction :	29
IV.2. Potentiel énergétique du biogaz dans le monde :	29
IV.3. Production du biométhane carburant :	29
IV.3.1. Le biométhane issu de ressources fatales :	30
IV.3.2. Le biométhane issu de cultures énergétiques:	31
IV.3.3. A plus long terme, la production par gazéification :	32
IV.4. Du biogaz au biométhane carburant :	32
IV.5. Coûts de production :	34
IV.6. Les avantages et les inconvénients de biogaz :	35
IV.6.1. Les intérêts et les avantages d'un projet de méthanisation pour l'environnement :	35
IV.6.2. Les avantages agronomiques de la méthanisation :	36
IV.6.3. Les atouts de la méthanisation dans le bouquet énergétique :	36
IV.6.4. Pourquoi le biogaz n'est-il toujours pas mis en place aujourd'hui ?	37
IV.7. Conclusion :	37

#### **Chapitre V : Biocarburants à partir d'huiles usagées**

V.1. Introduction :	38
V.2. Les huiles alimentaires usagées :	39
V.2.1. Utilisation des huiles alimentaires comme huiles de friture :	40

V.3. Valorisation des huiles alimentaires usagées :	40
V.3.1. La transesterification :	42
V.3.2. Réaction de transestérification des huiles :	42
V.3.2.1. Historique:	42
V.3.2.2. Mécanisme de la réaction :	42
V.3.2.3. Paramètres importants de la réaction de transestérification des huiles :	43
V.3.2.4. Procédés industriels de transestérification :	44
V.3.2.4.1. Procédés industriels homogènes :	44
V.3.2.4.1. Les avantages de ces procédés commerciaux en homogènes :	45
V.3.2.4.2. Les inconvénients de ces procédés commerciaux en homogène ::	45
V.3.2.4.2. Procédés industriels hétérogènes :	45
V.4. Évaluations économiques :	46
V.4.2. Cout opérationnel :	46
V.5. Estimation de la production possible en Algérie :	47
V.6. Collecte des huiles usagées :	47
V.7. Conclusion :	48

### **Chapitre VI : Valorisations des huiles moteurs et industrielles usagées**

VI.1. Introduction :	49
VI.2. Dangerosité des huiles usagées pour l'homme et l'environnement :	49
VI.3. Potentiel d'huiles usagées en Algérie :	50
VI.4. Les procédés de régénération :	50
VI.4.1. La collecte :	50
VI.4.2. La régénération :	51
VI.4.2.1. Première étape :	51
VI.4.2.2. Deuxième étape :	51
VI.4.2.2.1. La distillation sous vide :	51
VI.4.2.2.2. La clarification au solvant (propane ou butane) :	51
VI.4.2.2.3. L'ultrafiltration :	51
VI.4.2.2.4. L'ultrafiltration :	51
VI.4.2.3. Troisième étape:	52
VI.5. Estimation de la production possible en Algérie :	52
VI.6. Autres valorisations possibles :	52
VI.7. Collecte des huiles usagées :	53
VI.8. Conclusion :	54



## **Chapitre VII : Voitures électriques et hybrides**

VII.1. Définitions: .....	55
VII.2. Comparaison des capacités d'un véhicule thermique et d'un véhicule électrique : .....	55
VII.2.1. Problème d'autonomie : .....	55
VII.2.2. Origine de l'électricité et du rendement global : .....	55
VII.2.3. Le coût d'une voiture électrique : .....	57
VII.3. Application en Algérie et conclusion : .....	57
Conclusion générale .....	58
Références .....	59

## Introduction générale

Depuis toujours, l'énergie est au cœur de monde. Sa disponibilité, son abondance ou sa pénurie influe fortement le comportement des humains. Les stratégies énergétiques des états de monde entier ont pour objectif principal d'assurer son approvisionnement.

La consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter depuis la révolution industrielle. Parmi les secteurs les plus énergivores, on trouve le secteur des transports, qui représentent plus d'un tiers de la consommation énergétique mondiale finale. Ce secteur est caractérisé par sa forte dépendance des produits pétroliers (97%). Cette dépendance devient de plus en plus inquiétante car les ressources pétrolières sont sur le déclin et les conséquences d'un réchauffement climatique pour l'homme et l'environnement sont très préoccupantes.

En Algérie, la situation n'est pas différente bien au contraire, le secteur des transports dépend exclusivement des produits pétroliers et la consommation d'essence et de gasoil augmente à un rythme qui ne sera pas soutenable d'ici quelques années.

A côté de tous les carburants classiques, essence et gasoil, provenant du pétrole dont les ressources sont sur le déclin, notre étude a pour objectif de recenser tous les carburants alternatifs pouvant avantageusement remplacer les carburants classiques en Algérie.

## Chapitre I : Le gaz de pétrole liquéfié

### **I.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques essentielles du GPLc qui font de lui un carburant très avantageux pour l'Algérie.

### **I.2. Définition :**

Le GPL (Gaz de pétrole liquéfié) est un mélange à proportion variable de butane ( $C_4H_{10}$ ), de propane ( $C_3H_8$ ), de pentane ( $C_5H_{12}$ ) et d'autres alcanes ( $C_nH_{2n+2}$ ) et alcènes ( $C_nH_{2n}$ ), comme le propylène, le n-butane ou l'isobutane. Il a la particularité de pouvoir être liquéfié à température ambiante, sous une faible de pression (3 bars). À pression atmosphérique, il se liquéfie à une température de l'ordre de  $-30^\circ C$ .

### **I.3. Le GPL carburant (GPLc)**

Le GPLc a été utilisé dès les années 1920, aux Etats-Unis, mais il ne se popularisa réellement que, lorsque la fiscalité devint plus favorable dans certains pays et que les voitures équipées de la bicarburation se sont développées.

Le GPL carburant est similaire au GPL combustible. Il est composé de 50 à 81% butane et de 19 à 50% de propane. Cette proportion varie suivant les pays, et suivant les saisons. Les véhicules qui fonctionnent au GPLc sont souvent équipés d'un double système de bicarburation (essence et GPL). En effet, les stations-services qui proposent le GPLc sont moins nombreuses. De plus, le gaz étant plus « sec » que l'essence, les véhicules au GPLc démarrent généralement à l'essence afin d'avoir une lubrification correcte du moteur froid.

Les véhicules sont rarement équipés en première monte par les constructeurs automobiles, on fait souvent appel à des « kits » hollandais ou italiens montés sur les moteurs essence par des installateurs agréés. Seuls les moteurs à allumage (moteurs à essence) peuvent être équipés pour fonctionner au GPLc. Techniquement, il est aussi possible d'utiliser un mélange gazole-GPLc dans les moteurs Diesel, cette technique est utilisée en Grande-Bretagne.

### **I.4. Provenance du GPL dans le monde :**

Les Gaz de Pétrole Liquéfiés proviennent :

- Des champs de gaz naturel, pour plus de 60 % : Les champs de gaz naturel sont composés, en général, à 90 % de méthane ( $CH_4$ ). Les 10 % restants se répartissent entre 5 % de propane ( $C_3H_8$ ) et 5 % d'autres gaz dont le butane ( $C_4H_{10}$ ). Le pétrole brut contient aussi, en sortie de puits, des fractions souvent importantes de gaz associés dissous, parmi lesquels des GPL. Les pourcentages de GPL contenus dans le brut et le gaz naturel sont variables d'un gisement à un autre. Le gaz naturel, dont la production a très fortement augmenté depuis plus d'une décennie, est devenu la première source de fourniture de GPL avec plus de 60 % des volumes produits dans le monde.

- Des raffineries de pétrole, pour moins de 40 % : Lors du raffinage du pétrole brut, les GPL sont séparés en partie supérieure des colonnes de distillation, au cours des opérations « primaires ». Des volumes supplémentaires sont également récupérés au cours d'opérations de traitements « secondaires ». Les GPL représentent entre 2 et 3 % de l'ensemble des produits obtenus. Selon sa provenance, une tonne de pétrole brut traitée donne 20 à 30 kg de GPL. [1]

### I.5. Avantages du GPLc :

#### Le GPL est moins polluant que l'essence et le gasoil :

- Des émissions de NO<sub>x</sub> réduites par rapport aux véhicules essence et plus encore par rapport aux véhicules diesel,
- Les émissions non réglementées sont elles aussi minimisées,
- la présence de benzène n'est plus mesurable
- le butadiène et le formaldéhyde sont sensiblement réduits.
- Des émissions de CO<sub>2</sub> réduites de 13 % par rapport à un véhicule essence,

Émissions comparées, mesurées sur moteur GPLc et à essence			
Polluants (g/km)	Essence	GPLc	Écarts (en %)
CO .....	1,65	0,89	- 46
HC .....	0,25	0,17	- 32
NO <sub>x</sub> .....	0,45	0,09	- 80
CO <sub>2</sub> .....	198	172	- 13

Tableau I.1 : Emissions comparées, mesurées sur moteur GPLc et à essence  
Source : [2]

#### Le GPL a des avantages techniques :

Le GPL est un carburant qui est injecté sous forme gazeuse dans le cylindre. Sa vaporisation est plus homogène que celle de l'essence. De plus son indice d'octane est plus élevé. Ces deux caractéristiques permettent un fonctionnement du moteur plus souple, moins bruyant, et moins « fatiguant » pour les organes mobiles du moteur. La combustion du GPL ne produit pas de calamine ; l'huile moteur ne s'encrasse pas et conserve ses qualités plus longtemps. La présence d'un deuxième carburant à bord, augmente l'autonomie et protège du risque de « panne sèche ».

Pour un même contenu énergétique admis au sein des cylindres et une conception similaire du moteur à allumage commandé, le rendement du moteur est du même ordre de grandeur en GPLc et en essence.

**Le GPL est disponible en Algérie :**

Le GPL est largement disponible en Algérie avec une production de l'ordre de 7,4 millions de tonnes en 2013, et il est possible de valoriser une partie de cette production sur le marché national en l'utilisant en substitution des carburants qui sont mieux valorisés à l'exportation, tel que l'essence ou le gazole. [3]

**I.6. Inconvénients du GPLc :**

- L'équipement du véhicule entraîne un surcoût,
- Le réseau de distribution reste modeste, surtout loin des grands axes de circulation,
- Le réservoir de GPLc prend de la place dans le coffre. Cependant les réservoirs annulaires prennent beaucoup moins de places.
- Le GPLc a un pouvoir calorifique inférieur (PCI) inférieur au PCI de l'essence et du gasoil :

Le PCI volumique gazeux est inférieur (dans une plage de - 20 à - 30 %) dans la mesure où la masse volumique du GPLc est nettement plus faible (tableau ci-dessous).

Il délivre donc une énergie au litre inférieure à celle des carburants liquides usuels, ce qui se traduit par une chute des performances du moteur d'automobile en terme de couple et de puissance (de l'ordre de -10 %), lorsque le carburant est introduit sous forme gazeuse à l'admission du moteur par effet venturi. Cet inconvénient est atténué dans le cas plus novateur d'une injection mono ou multi-point de GPLc liquide qui entraîne une augmentation de la masse de carburant admise au sein des cylindres. Ce paramètre est surtout pris en compte dans les pays où la vitesse sur autoroute est importante (plus de 120km/h)

<b>Caractéristiques comparées essence, gazole et GPLc</b>			
<b>Caractéristiques</b>	<b>Essence</b>	<b>Gazole</b>	<b>GPLc</b>
Masse volumique..... (kg.m <sup>-3</sup> )	0,725 à 0,780	0,820 à 0,860	0,510 à 0,580
PCI massique ..... (kJ.kg <sup>-1</sup> )	42 700	42 600	45 800
PCI volumique ..... (kJ.m <sup>-3</sup> )	32 000	35 800	25 000

Tableau I.2 : Caractéristiques comparées essence, gazole et GPLc  
Source : [1]

**I.7. Utilisation du GPLc dans le monde :**

En 2007, La production mondiale de Gaz de Pétrole Liquéfié, était de 230 millions de tonnes. La consommation européenne de GPL était de 31 millions de tonnes en 2007, soit 1,9% de la consommation européenne totale d'énergie.

Les principaux producteurs de GPL dans le monde sont les États-Unis, l'Arabie saoudite et la Chine. A eux trois, ils délivrent près de 37% des GPL produits dans le monde. Ce sont

également les trois principaux consommateurs de GPL dans le monde (la Chine se trouvant en 2<sup>e</sup> position devant l'Arabie saoudite).

### I.8. Le GPLc en Algérie : Utilisation actuelle et perspective

Il est plus connu du grand public et commercialisé en stations-service sous le nom de : « SIRGHAZ »

Dès la mise en place de cadre juridique, NAFTAL a procédé à la mise en œuvre d'un plan de généralisation de l'utilisation du GPL/c, qui s'est traduit jusqu'en 2010 par la concrétisation des objectifs suivants :

- Réalisation de 504 stations-services avec une capacité globale de 8084 m<sup>3</sup> et un rayon moyen entre stations 50km au nord et 100km au sud, réparties sur l'ensemble du territoire national ;
- Mise en place de plus de 160 centres et ateliers de conversion véhicules au GPL/c à travers tout le territoire national ;
- Conversion de plus 200 000 véhicules constituant le parc actuel, en circulation ;
- Atteinte d'un niveau de consommation GPL/c de plus de 300 000 TM à fin 2010.

#### I.8.1. Consommation de GPLc en Algérie :

Année	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012
Vente de GPL/c (Tonnes)	182 235	253 769	300 262	316 226	314 583	312 849	306 860

Tableau I.3 : consommation de GPLc en Algérie

Cependant la consommation de GPLc stagne depuis 2004.

#### **Ce qui freine la consommation de GPLc en Algérie :**

- Le GPLc a une mauvaise réputation, il a la réputation d'être dangereux (ce qui n'est pas vrai les réservoirs GPLc sont extrêmement résistant), que le réservoir GPLc occupe tout le coffre, les citoyens ne font pas confiance à l'installateur de kit GPL et ils pensent qu'il sera impossible de revendre leur véhicule.
- Le GPLc n'est pas attractif financièrement par rapport à l'essence, mais surtout par rapport au gasoil

#### **Action pour encourager la consommation de GPLc :**

- Le GPLc doit être très compétitif par rapport à l'essence et au gasoil, pour cela il faut que le GPLc soit trois fois moins cher que l'essence et le gasoil.
- Conversion d'une grande partie des véhicules essence des administrations publiques et des entreprises publiques (L'état doit donner l'exemple)

### **I.9. Conclusion :**

Le GPLc représente une excellente alternative pour remplacer à grande échelle l'essence, il est disponible en grande quantité, il est pratiquement aussi performant que l'essence par contre le réseau de distribution de GPLc a besoin d'être encore développé, mais il est tout de même satisfaisant.

## Chapitre II : Le gaz naturel carburant

### **II.1. Introduction :**

Le gaz naturel pour véhicules (abrégé en GNV) ou gaz naturel carburant (abrégé en GNC) est du gaz naturel utilisé comme carburant automobile. Le gaz naturel est constitué d'environ 97 % de méthane. Le GNC est généralement stocké sous pression (200 bars) dans des réservoirs spécifiques à l'intérieur du véhicule, mais des essais ont également été faits avec du gaz stocké en phase liquide. Il est aussi possible d'utiliser du méthane produit (dans une moindre mesure) dans des stations de méthanisation (usines de traitement des ordures ménagères, stations d'épuration, digesteurs agricoles).

Le gaz naturel est une énergie fossile dont les ressources sont importantes. Cette énergie trouve naturellement sa place comme carburant pour les applications industrielles et le transport. Quel que soit son champ d'application, cet hydrocarbure présente des avantages spécifiques qui en font une alternative stratégique tant pour une recherche de diversification énergétique viable, que pour élargir l'offre que constituent les carburants liquides conventionnels.

### **II.2. Panorama mondiale du marché des véhicules au gaz naturel**

La situation du marché des véhicules au gaz est très disparate géographiquement parlant. Les faibles contraintes d'utilisation du gaz naturel ont permis à certains constructeurs de continuer à répondre aux attentes d'un marché national marginal soutenu par des incitations fiscales, en maintenant des investissements modérés. Par ailleurs ces technologies convenaient tout à fait aux besoins et aux exigences des réglementations d'autres zones géographiques et ont permis de satisfaire à un besoin drastique de réduction des polluants urbains notamment en termes de particules. On notera ainsi un parc de véhicules important dans des pays d'Amérique du Sud (Argentine, Brésil), d'Asie (Pakistan, Inde, Chine) ou du Moyen-Orient (Iran) dépassant tout le million, voire plus, de véhicules au gaz. En Europe l'Italie, avec près de 900 000 véhicules gaz, présente une réelle filière gaz. Sans revenir sur les raisons de cette position atypique, seule l'Italie a réussi à mettre en œuvre les conditions *sine qua non* à l'existence d'une filière pérenne : réseau de distribution étendu (une station de remplissage pour un peu plus de 1 000 véhicules), offre constructeur importante (notamment véhicule dédié) et soutien du marché par des actions fiscales adaptées.

La France présente un nombre important de bus (2500), bennes à ordures ménagères (1 000) et poids lourds (200), en comparaison du reste de l'Europe, mais se retrouve à la traîne côté véhicule particulier avec seulement 13 000 véhicules, essentiellement détenus par des flottes captives et disposant de leur propre station de ravitaillement.

Aux États-Unis, le marché des flottes captives (flottes de véhicules rattachées à un site équipé d'un compresseur) ou des poids lourds longs routiers roulant au gaz fait preuve d'un dynamisme



exceptionnel. Cette situation est notamment liée au coût du gaz naturel en baisse du fait de l'exploitation des gaz de schiste et aux incitations fiscales en vue de réduire les émissions polluantes.

En Europe et au cours de cette décennie, l'offre de véhicules fonctionnant au gaz s'est étoffée voyant disparaître du catalogue certains constructeurs (PSA, Renault) et en apparaître de nouveaux. FIAT est le constructeur qui n'a jamais cessé de prôner les bienfaits du GNV et qui propose une offre catalogue étoffée. Opel et Ford sont également présents mais de façon plus discrète ne proposant que quelques modèles. Plus récemment, le groupe VAG s'est lancé sur le marché et devrait disposer de nombreux modèles dans chacune de ses marques.

Sous l'impulsion des instances européennes et avec l'engagement des constructeurs européens à réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub>, la situation européenne évolue vers une prise en compte du gaz naturel qui semble avoir sa place à plus long terme dans l'offre carburant. Sur un marché européen toujours fébrile, certains constructeurs se positionnent plus nettement et proposent des véhicules à bicarburant optimisés pour le fonctionnement au gaz. [2]

### **II.3. Ressource gazière dans le monde :**

Les réserves prouvées de gaz naturel dans le monde ont augmenté considérablement durant ces quarante dernières années. Elles représentaient en 1970 une quantité d'énergie exploitable équivalente à la moitié des réserves de pétrole ; dans les années 1980 elles représentaient déjà les trois quarts, aujourd'hui elles se maintiennent autour de 80 %, avec une progression bien plus importante pour le gaz naturel, conduisant ainsi en 2008 à une réserve prouvée totale de l'ordre de 180 Gtep.

Cette quantité d'énergie positionne le gaz naturel comme une source énergétique incontournable sur l'échiquier mondial, d'autant plus que, au rythme des consommations actuelles, le ratio entre les réserves prouvées et la production d'énergie est au léger avantage du gaz naturel. En effet, pour une consommation mondiale qui se stabiliserait au niveau de celle de l'année 2010, soixante années de production de gaz naturel seraient assurées, pour environ cinquante-quatre années de production de pétrole. [2]

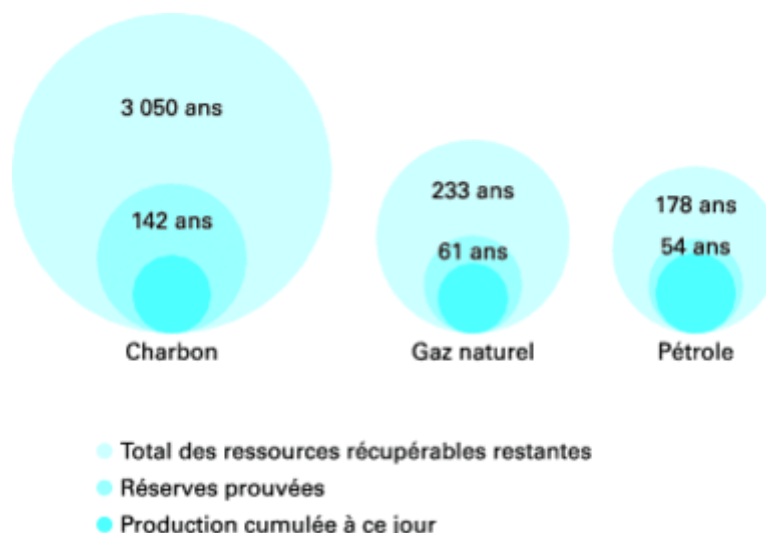


Figure II.1 : Comparaison des ressources et réserves mondiales au regard de la production de gaz naturel, de pétrole et de charbon  
Source : IEA, 2010

### II.4. Ressource gazière en Algérie :

Les réserves prouvées de l'Algérie (conventionnel seulement, les réserves de gaz non conventionnel n'ont pas encore été prouvées) sont de l'ordre de 4 504 milliards de mètres cubes en 2013, soit 2,4% des réserves mondiales prouvées, ce qui place l'Algérie à la dixième place mondiale en termes de réserves prouvées. Le ratio R/P (réserves sur production) du gaz naturel de l'Algérie est égal à 57 ans alors que celui du pétrole est égal à 22 ans. Ceci place le gaz naturel parmi les alternatives par rapport au gasoil et à l'essence.

### II.5. Le gaz naturel dans le contexte de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est un phénomène très complexe, d'une importance stratégique qui polarise aujourd'hui des organisations mondiales, les milieux scientifiques, ministériels, politiques. L'importance du transport et de la mobilité dans nos sociétés et l'accroissement de la consommation énergétique assurée majoritairement par les ressources pétrolières ont un impact direct sur les technologies à employer pour les véhicules urbains.

#### II.5.1. Réduction des émissions de polluants :

Que ce soit sur le plan de la diversification des ressources ou des émissions de polluants non (encore) réglementés, le gaz naturel se positionne comme un excellent carburant offrant des propriétés appréciées par les motoristes. Les traditionnelles comparaisons d'émissions de polluants non réglementés d'un même véhicule en version essence et gaz naturel confirment l'intérêt du gaz naturel, dont la nature des émissions le distingue, par le faible potentiel de formation d'ozone troposphérique irritante (formation de *smog*), par les faibles quantités de composés aromatiques émises (effet cancérigène) et par les faibles (voire nulles) émissions d'aldéhydes toxiques. De plus, du fait de sa stabilité chimique, le méthane constitue l'essentiel

des émissions d'hydrocarbures imbrûlés émis, dont l'inhalation accidentelle ne présente pas de risque sanitaire. Ne contenant du soufre qu'à l'état de traces (principalement du fait de son odorisation), sans fumée visible à l'échappement ni odeurs irritantes, le **gaz naturel est considéré comme un carburant « propre »**.

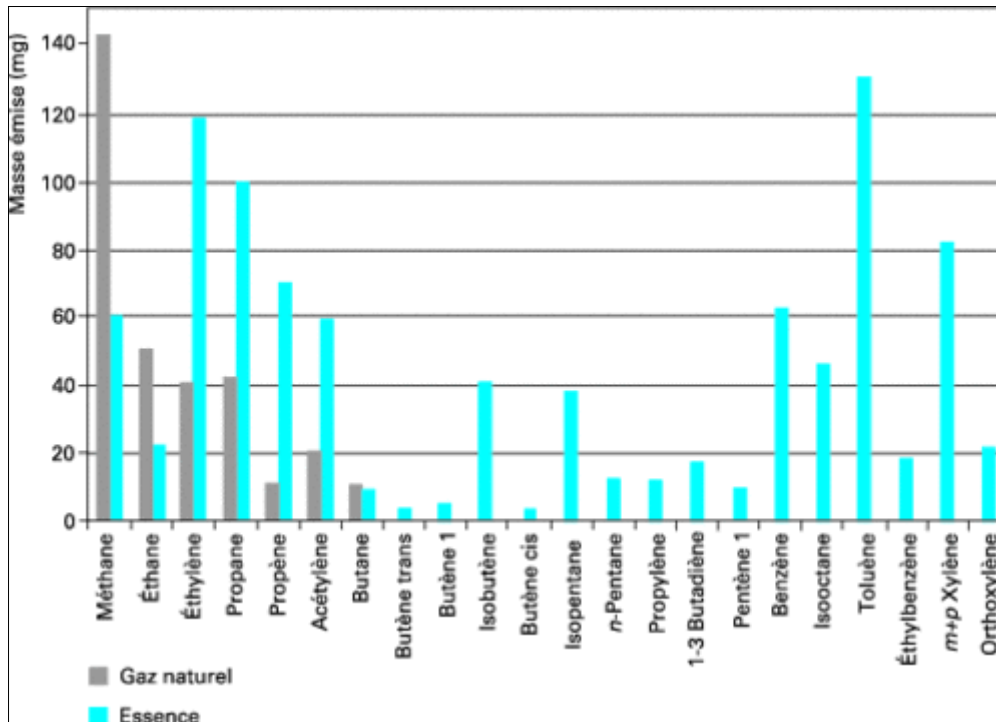


Figure II.2 : Émissions comparées essence-gaz naturel de véhicules légers sur cycle ECE-EUDC  
Source : IFP Énergies nouvelles

### II.5.2. Émissions du « puits à la roue » :

De nombreuses études du puits à la roue ont été menées et publiées.

Chaque carburant pris en compte dans cette étude est considéré comme un carburant consommé sans mélange préalable. Lorsque l'origine est un produit agricole (oléagineux, blé, betterave), le CO<sub>2</sub> consommé par la plante avant récolte (captation du carbone par photosynthèse) a été prise en compte.

L'analyse des performances du puits à la roue confirme l'intérêt de la filière gaz naturel utilisée sur des moteurs tirant partie au maximum de son potentiel et dotés des innovations technologiques les plus performantes. [2]

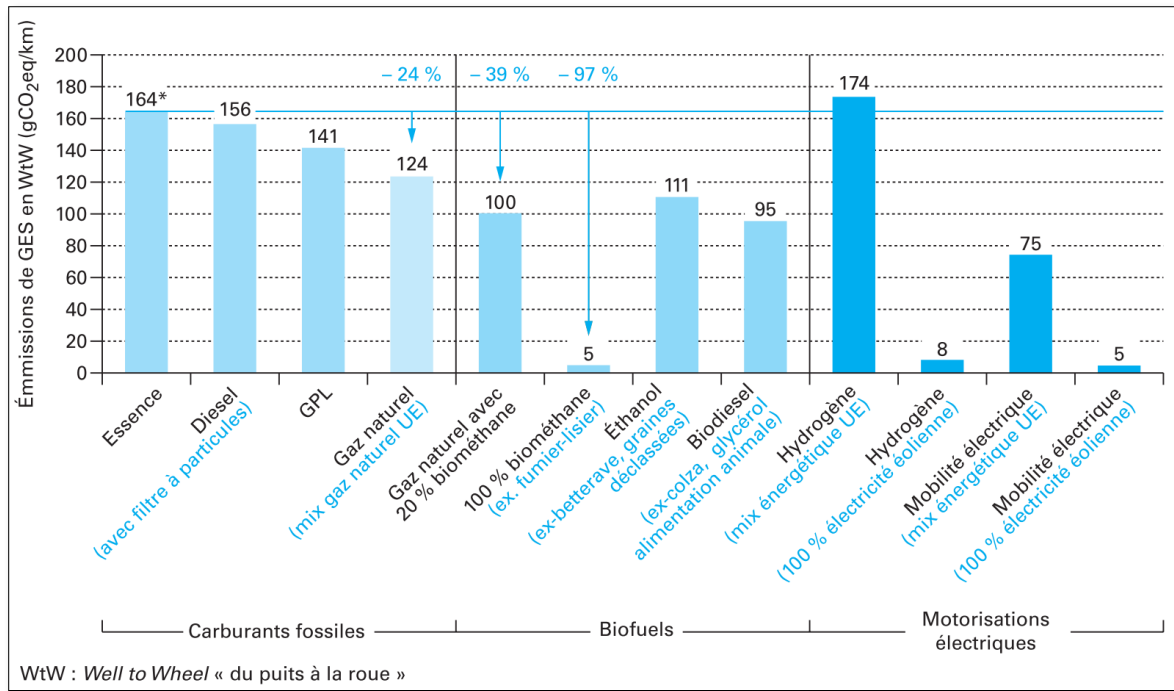


Figure II.3 : Analyse du puits à la roue des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction des filières carburants et des motorisations

Source: DENA German energy agency 2010

## II.6. Contraintes propres du moteur à gaz naturel :

### II.6.1. Problématique du stockage :

Le stockage du gaz naturel reste problématique, compte tenu de son faible *PCI* volumique : volume de stockage et poids des réservoirs (du moins pour une application automobile) sont à prendre en compte avec attention, car ils ont un impact direct sur l'autonomie du véhicule.

Deux approches sont présentées ici : augmentation du ratio énergie stockée/volume/masse des réservoirs et adsorption sur solide microporeux.

### II.6.2. Augmentation du ratio énergie/volume/masse :

Le pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel par unité de volume est faible, le recours au stockage sous pression est donc indispensable pour limiter la capacité des réservoirs des véhicules à gaz. Malgré cela, pour un même volume de stockage, l'énergie maximale qui peut être stockée sur le véhicule est toujours plus faible que pour un véhicule à essence (tableau II.1), quelle que soit la pression de stockage, volontairement limitée pour des raisons de conception. La solution la moins pénalisante pour ce critère est le **stockage sous forme liquide (ou cryogénique)**.

Carburant	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	PCI(kJ/kg)	PCI(MJ/m <sup>3</sup> )	Écart	Volume isoénergie
Essence	750	42 690	32 020		
Gazole	835	42 770	35 710	+ 11,5 %	× 0,9
CH <sub>4</sub> gazeux (1 013 hPa, 273 K)	0,716	50 010	36	- 99,9 %	× 889
CH <sub>4</sub> gazeux (20,3 MPa, 293 K)	133	50 010	6 650	- 79,2 %	× 4,8
CH <sub>4</sub> liquide (0,2 MPa, 115 K)	419	50 010	20 954	- 34,6 %	× 1,5

Tableau II.1 : Comparaison de l'énergie stockée pour un même volume de carburant  
Source : [1]

Dans le cas du **stockage gazeux**, la technologie des réservoirs, et notamment le choix des matériaux, a un impact direct sur le ratio entre l'énergie stockée et la masse totale englobant les masses du réservoir, du gaz enfermé et du système de fixation dont la contribution est importante. En effet, les normes en vigueur pour l'homologation des réservoirs prévoient de nombreux tests, en statique (résistance au feu, résistance au tir de balles...) et en dynamique (étanchéité suite à une chute sur poinçon, résistance à la décélération...).

Pour des pressions de service de l'ordre de quelques centaines de bars, la forme cylindrique s'impose, d'autant plus que les réservoirs doivent supporter une pression d'épreuve très élevée (coefficient de sécurité > 2). Pour un véhicule léger, l'implantation de réservoirs cylindriques totalisant un volume de stockage le plus élevé possible conduit bien souvent à des compromis. Pour une pression de stockage voisine de 200 bar (20 MPa), nous avons vu (tableau précédent) qu'il faut multiplier le volume de stockage par environ 4,5 pour embarquer la même quantité d'énergie qu'un carburant liquide.

Sans prendre en compte un écart de consommation moyenne entre un moteur à essence moderne et un moteur à gaz (en majorité en défaveur des véhicules au gaz naturel commercialisés en Europe), ni les variations de pouvoir calorifique du gaz naturel distribué sur réseau, maintenir la même autonomie qu'un véhicule à essence doté d'un réservoir de 50 L conduirait à implanter des réservoirs à gaz de plus de 200 L, ce qui semble difficilement réalisable. Sans modification spécifique de l'architecture du véhicule, tripler le volume de stockage par rapport à un véhicule à essence semble constituer aujourd'hui une limite extrême, même si la mise en place de plusieurs réservoirs à gaz de plus petite taille facilite l'implantation (au prix bien souvent d'une réduction importante du volume du coffre). Le problème est d'autant plus compliqué pour les véhicules à bicarburant pour lesquels un réservoir à essence de capacité identique ou réduite est préservé. **En moyenne, on constate que le parc commercialisé des véhicules à gaz naturel a donc une autonomie plus faible que celui des véhicules à essence, désavantage d'autant plus pénalisant quand le réseau de distribution est peu étendu : dans ce cas, seul le concept de flotte captive ou de véhicule urbain est viable.** Pour les technologies classiques de réservoir, le développement de la filière gaz passe donc nécessairement par une extension du réseau de distribution, associée à la production de véhicules légers au gaz naturel dotés de

moteurs de technologie adaptée, idéalement dédiés. L'implantation de réservoir sur des véhicules volumineux, gros utilitaires et bus notamment, est moins pénalisante : mise en place des réservoirs sur le toit des bus, par exemple, même si une telle implantation engendre des contraintes en dynamique (balourd).

Signalons également que le remplissage des réservoirs s'effectue de façon étanche, contrairement au remplissage de l'essence ou du gazole, ce qui contribue à réduire les émissions des hydrocarbures volatils.

Le **stockage cryogénique à basse pression** permet de réduire significativement le volume des réservoirs nécessaire pour assurer une quantité d'énergie embarquée comparable à celle de l'essence (rapport 1,5 dans le tableau précédent). Bien que séduisante par rapport à ce critère, la filière gaz naturel liquéfié n'est viable que pour les flottes de véhicules évoluant à proximité d'infrastructures portuaires équipées pour maintenir le gaz sous sa forme liquide ou proche de centres de distribution adaptés pour le GNL, sans quoi le coût d'une liquéfaction spécifique du gaz serait rédhibitoire (la température de liquéfaction du méthane est de  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans les conditions normales). Le stockage cryogénique reste cependant réservé aux flottes de véhicules sans arrêt prolongé (plusieurs jours par exemple), car le dégazage contrôlé, indispensable pour limiter l'augmentation de pression inévitable (les échanges thermiques deviennent sensibles quelle que soit la qualité d'isolation thermique des réservoirs), deviendrait assez problématique dans des zones fermées et, de toute façon, assez peu économique, ni d'ailleurs écologique.

On peut également signaler que :

- le remplissage des réservoirs est rapide et économique (consommation électrique d'une pompe) ;
- si le carburant est stocké sous forme liquide, il est quand même consommé par le moteur sous forme de gaz ;
- la liquéfaction avant transport peut modifier la composition en fonction du processus industriel sélectionné, limitant le nombre de constituants selon la stratégie utilisée. Pour mémoire, les températures de liquéfaction aux conditions normales des principaux constituants du gaz naturel sont les suivantes :  $\text{CO}_2 - 78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ; éthane  $- 88,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ; méthane  $- 161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ; azote  $- 195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Il est intéressant de noter que les récents travaux concernant ce mode de stockage et **le développement de corridor GNL (réseau maillant les grands axes routiers) permettent d'envisager le GNL comme une alternative viable aux tracteurs poids lourds longs routiers.**

### II.6.3. Sécurité :

D'un point de vue sécurité, la législation française, par exemple, impose des essais de résistance pour les éléments d'ancrage et les réservoirs : les accidents relatés sur des véhicules à gaz confirment l'extrême fiabilité du système de stockage et d'alimentation. Le fait que le gaz naturel soit plus léger que l'air (diffusion rapide dans l'atmosphère) réduit considérablement les risques d'inflammation dans le cas d'éventuelles éventrations des réservoirs.

### II.6.4. Mode de combustion :

Les caractéristiques du gaz naturel facilitent son utilisation dans les moteurs à allumage commandé. Mis à part sa spécificité liée à son état gazeux aux conditions thermodynamiques classiquement rencontrées dans un moteur, aucune adaptation fondamentale n'est *a priori* nécessaire. C'est donc un avantage dans le cas où l'utilisation de ce carburant est envisagée avec un minimum de développement, ou dans le cas d'une application en mode bicarburation essence-gaz naturel. De plus, il est possible de bénéficier de l'ensemble des évolutions technologiques des moteurs à allumage commandé, dont la géométrie et les réglages peuvent être optimisés pour tirer parti du potentiel de ce carburant. Que ce soit dans le domaine des véhicules légers, des véhicules utilitaires légers et des véhicules industriels (benches à ordures ménagères), du transport en commun (bus), l'ensemble du parc automobile est équipé de moteurs à allumage commandé. Ces dernières années, on a vu se déployer des applications **Dual Fuel** pour les applications poids lourds à l'instar de ce qui se faisait sur les moteurs marins. Il apparaît dès lors un fort potentiel d'utilisation du gaz également sur des moteurs à allumage par compression.

### II.6.5. Véhicules dédiés. Véhicules à bicarburation :

Dans l'optique de tirer parti au maximum du potentiel du gaz naturel en tant que carburant, le moteur dédié permet une optimisation poussée garantissant des performances améliorées. L'optimisation peut, par exemple, concerner la géométrie du moteur (piston, chambre de combustion, calage distribution, rapport volumétrique), la mise en place de stratégies « moteur » spécifiques (prise en compte des variations de composition du gaz), l'intégration de réservoirs plus volumineux.

Du point de vue de l'utilisateur, si les moteurs dédiés doivent *a priori* offrir davantage de prestations, le point d'achoppement reste la disponibilité du gaz naturel sur certains territoires. D'ailleurs, pour une application pour véhicule léger, l'analyse des flottes de véhicules dédiés en circulation montre que seuls les pays offrant un réseau de distribution dense et de sensibles avantages fiscaux sont concernés (figure II.4). Pour les marchés sans infrastructure de distribution adaptée, le recours à la bicarburation s'impose donc.

Aujourd'hui, une majorité du parc européen des véhicules légers fonctionnant au gaz naturel est en bicarburation, avec une tendance à optimiser le fonctionnement au gaz naturel au détriment du fonctionnement à l'essence pour les modèles les plus récents. En ce qui concerne le choix du carburant pour les phases de démarrage, aucune limitation technologique n'impose un carburant plus que l'autre. Tout dépend donc du choix du constructeur en fonction du matériel retenu sur le moteur, sachant que la gestion du démarrage conditionnera la performance générale du véhicule vis-à-vis des normes de pollution.

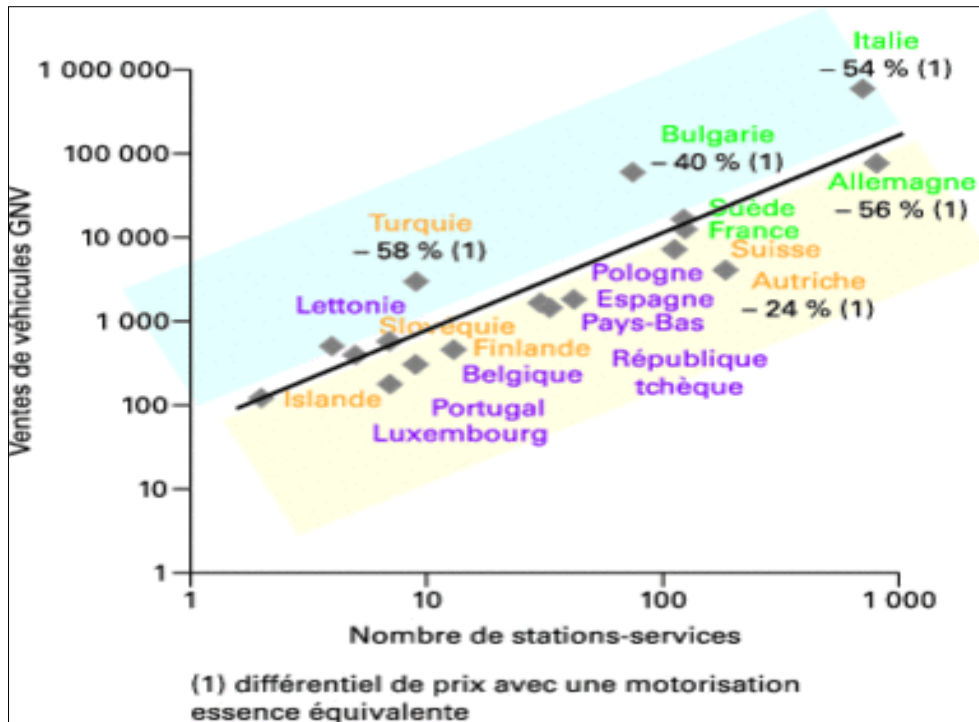


Figure II.4 : Ventes de véhicules suivant l'infrastructure de recharge disponible dans chaque pays (nombre de stations)

Source : [2]

La situation est différente pour les véhicules de flottes captives, pour lesquels les points de remplissage sont bien identifiés, réduisant la contrainte de réapprovisionnement. Ainsi, dans le cas des bus, des bennes à ordures ménagères et des véhicules industriels, les moteurs sont des moteurs dédiés. [2]

### II.6.6. Station GNC à domicile :

Pour les particuliers, une alternative existe au ravitaillement dans les stations GNC, en effet une mini station GNC est disponible pour les particuliers. Elle peut être installée dans un garage ou en extérieur, elle est raccordée au branchement de gaz naturel du domicile, elle ne prend pas plus de place qu'un chauffe-eau et permet de faire le plein la nuit en quelques heures au tarif du gaz naturel domestique. Cependant, le prix actuel de ce type de station est encore élevé.

### II.7. Le GNC en Algérie :

La promotion de l'utilisation de ce carburant a été lancée en 1998 avec une opération pilote de Sonelgaz, avec la réalisation de deux stations de compression à Alger, la mise en circulation de 10 autobus roulant au GNC en plus de 85 véhicules de Sonelgaz convertis depuis 2002.

Naftal a procédé à la réalisation d'une unité pilote de distribution de GNC à la station-service Sissane à Alger ; et prévoit le lancement d'études pour trois autres unités de distribution à Alger, Oran et Annaba. Dans ce cadre, une étude a été lancée pour le raccordement au réseau de distribution de gaz de Sonelgaz des stations-service Naftal.



Pour le développement de ce produit, deux programmes ont été arrêtés par le Ministère de l'Energie et des Mines couvrant la période 2007-2025 :

**Période 2007-2011** : le coût global de l'investissement est estimé à environ 7,3 milliards DA et porte sur la conversion de 175 bus (dont 100 pour Alger), la réalisation de 40 stations-service, la conversion de 14 000 véhicules taxis et quatre terrains de remisage (stationnement et maintenance pour la flotte de transport urbain).

**Période 2012-2025** : le coût global de l'investissement s'élève à 20,3 milliards DA, (à raison de 600 millions DA par an) prévoit la construction de 112 stations-service GNC, réparties à travers l'ensemble des grandes villes, le raccordement de ces stations au réseau du gaz naturel et l'acquisition de 500 bus dédiés au GNC. [4]

### **II.8. Conclusion :**

Grâce à son potentiel, le gaz naturel a sa place parmi les carburants du futur. En partant de la situation actuelle où le gaz naturel alimente des moteurs thermiques issus pour la plupart des applications essence, le gaz naturel est une alternative viable, fiable et disponible en masse. Pour y arriver, de nombreux efforts de recherche et de développement ont été consentis et devront encore l'être afin de proposer des systèmes de combustion appropriés à chaque usage et mode de transport.

## Chapitre III : Les biocarburants

### **III.1.Introduction :**

L'usage des biocarburants a commencé il y a une vingtaine d'années principalement pour suppléer à la pénurie d'essence notamment en Union européenne et au Brésil.

Les biocarburants couvrent l'ensemble des carburants liquides, solides ou gazeux produits à partir de la biomasse et destinés à une valorisation énergétique dans les transports. Les biocarburants sont utilisés sous forme d'additifs ou de complément aux carburants fossiles : gazole (incorporation en tant que biodiesel), essence (incorporation sous forme d'éthanol), au kérosène et aux carburants gazeux.

On distingue 3 générations de biocarburants selon l'origine de la biomasse utilisée et les procédés de transformation associés. Aujourd'hui seule la première génération a atteint le stade industriel. Des études et des projets sont en cours de réalisation pour mettre en œuvre des biocarburants de 2<sup>e</sup> génération et 3<sup>e</sup> génération qui ne sont pas en concurrence avec la production alimentaire.

### **III.2.Définitions :**

Un biocarburant de première génération est un agrocarburant produit à partir de cultures destinées traditionnellement à l'alimentation. Plus spécifiquement, ce sont les organes de réserve des plantes oléifères (à huile) ou des plantes à sucre qui sont utilisés pour produire du biodiesel ou du bioéthanol.

Les biocarburants de deuxième génération sont les successeurs des biocarburants actuels (dits de première génération) et sont appelés à résoudre le problème de la compétition avec la production alimentaire. En n'utilisant que les parties non comestibles des plantes et les déchets agricoles, les biocarburants à base de lignine et de cellulose devraient permettre de produire, sur la même surface cultivée, à la fois des aliments et de l'énergie.

Les biocarburants à partir d'algues, algocarburant, sont dits de « troisième génération ». C'est probablement à partir des cultures de microalgues (dont cyanophycées), d'un point de vue théorique 30 à 100 fois plus efficaces que les oléagineux terrestres d'après certains auteurs (10 à 20 fois plus qu'avec le colza ou le tournesol selon le CEA). Des biocarburants pourront être produits avec les meilleurs rendements, rendant ainsi envisageable une production de masse (par exemple pour l'aviation), sans déforestation massive ni concurrence avec les cultures alimentaires. Mais il y a encore beaucoup de défis techniques et économiques à relever, avant que ces biocarburants soient un jour peut-être dans nos réservoirs.

### **III.3. Potentiel en biocarburant de l'Algérie :**

L'évaluation de potentiel algérien en matière de biocarburant est une tâche compliquée. La production nationale en termes de biocarburant est presque nulle, elle se résume en essai dans des laboratoires et des centres de recherches.

On essayera de donner un aperçu sur les sources qui peuvent être valorisées en biocarburant.

Les critères pour notre choix des espèces sont :

- Elles doivent être non alimentaires (non comestibles, non incluses dans les habitudes alimentaires), ainsi tout produit à grande consommation est exclu tel que les céréales.
- Disponibilité en Algérie (adaptable à notre climat)
- Disponibilité en quantité suffisante.
- Elles poussent sur des terres non fertiles, voire hostiles, s'il s'agit de cultures, pour éviter toute concurrence avec les terrains agricoles fertiles réservés aux cultures alimentaires.

Le respect de ces critères impose l'élimination de toute tentative de production des biocarburants de première génération. L'Algérie doit opter pour les biocarburants dits « deuxième génération ».

#### **III.3.1. Aperçu sur la forêt algérienne :**

À l'indépendance, l'Algérie a hérité d'une forêt dégradée, délaissée et désorganisée. Son rôle économique et social était négligé.

L'Algérie mène une politique forestière en prenant compte les multiples rôles que peut jouer la forêt : protection, production et promotion sociale pour l'intégrer dans un plan global de développement économique et social. Son action s'est axée sur trois volets :

- Protection et mise en valeur des forêts existantes et de l'ensemble des ressources forestières.
- Extension du patrimoine forestier par le reboisement.
- Lutte contre l'érosion.

Une estimation récente établie par la Direction Générale des Forêts (DGF) en collaboration avec la FAO donne l'occupation des terres forestières comme suit :

### Chapitre III : Les biocarburants

<b>Formations Forestières</b>	<b>Type</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>% de la surface totale du nord</b>
<b>Formations principales</b>	<b>Forets économiques</b>	1 249 000	
	<b>Forets de protection</b>	219 000	
	<b>Divers</b>	47 000	6,06
	<b>Total</b>	1 515 000	7,50
<b>Maquis</b>		1 876 000	2,14
<b>Reboisements réalisés par l'administration (1962 à 1998)</b>		536 000	
<b>Plantations Réalisées</b>	<b>Dans le cadre du barrage vert</b>	86 909	
	<b>Par le volontariat</b>	105 031	
	<b>Total</b>	191 940	0,77
<b>Total formations forestières</b>		4 118 940	16,47

Tableau III.1 : Occupation des terres forestières en Algérie

Source : DGF et FAO

Les forêts occupent 16.47% des terres du nord de l'Algérie soit environ 1,7% de la surface totale. [5] Cette proportion est très faible et la valorisation de cette biomasse en biocarburant sera difficile.

La majeure partie des superficies forestières ont connu une nette diminution, principalement pour les feuillus comme les Chênes et une augmentation des résineux comme les Pins. Cela est probablement dû au choix des espèces lors des reboisements car on a tendance à choisir les espèces à croissance rapide et qui ne nécessitent pas beaucoup d'entretien.

Les valeurs sont résumées dans le tableau qui donne la dernière estimation faite par la DGF en collaboration avec la FAO et publiée dans le rapport FOSA 2000.

<b>Espèce</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>% de la surface total occupée par les espèces</b>
<b>Pin d'Alep</b>	880 000	21,36
<b>Chêne liège</b>	230 000	5,59
<b>Chêne Zéen et Afarès</b>	48 000	1,17
<b>Cèdre</b>	16 000	0,39
<b>Pin maritime</b>	32 000	0,78
<b>Eucalyptus</b>	43 000	1,04

Tableau III.2 : Répartition des essences constituant la forêt en Algérie

Source : DGF et FAO

L'espèce prédominante est le pin d'Alep qui occupe 880 000 ha et se rencontre principalement dans les zones semi arides. Le chêne liège avec 230 000 ha se localise principalement dans le nord-est du pays.

Les chênes Zéen et Afarés avec 48 000 ha occupent les milieux les plus frais dans la subéraie. Les cèdres sont éparpillés sur 16 000 ha en îlots discontinus dans le tell central et les Aurès. Le pin maritime est naturel dans le nord-est du pays et couvre 32 000 ha. Les eucalyptus introduits dans le nord et surtout l'est du pays occupent 43 000 ha. [5]

Ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économiques qui totalisent 1 249 000 ha. Le second groupe, constitué par le chêne vert, le thuya et le genévrier qui, en étage semi-aride jouent un rôle de protection essentiellement, ne couvre que 219 000 ha.

Le reste des surfaces forestières qui s'étendent sur 2 603 940 ha se répartissent entre les reboisements de protection qui couvrent 727 940 ha et les maquis et broussailles qui occupent une superficie de 1 876 000 ha. [5]

### **III.3.1.1. Espèces valorisable en biocarburant :**

#### **III.3.1.1.1. Le chêne :**

Le chêne est le nom vernaculaire de nombreuses espèces d'arbres et d'arbustes appartenant au genre *Quercus*, et à certains genres apparentés, notamment *Cyclobalanopsis* et *Lithocarpus* de la famille des Fagacées.

Le chêne est un arbre très abondant en Algérie il s'étend sur une superficie de **280 000 hectares** il présente l'avantage de protéger le sol et de le stabiliser. Un chêne peut produire jusqu'à 600 kg/ha/an.

Les chênes locaux à glands non comestibles sont : *Quercus suber*, *Quercus coccifera*, *Quercus faginea* et *Quercus afares*. Parmi ces chênes, le **Quercus suber** est le plus abondant.

**Quercus suber (chêne de liège) :** C'est le chêne le plus abondant en Algérie. Arbre monoïque à feuilles persistantes de la famille des Fagacées, exploité pour son écorce qui fournit le liège. Il peut aller de 5 à 20 mètres il vit environ 150 ans en culture mais jusqu'à 500 ans à l'état naturel. On le trouve souvent associé au chêne vert, au chêne pédonculé et au pin maritime. Il est cultivé dans des exploitations appelées "subéraie". [6]

#### **Localisation :**

- *Littoral EST* : Boumerdes, Tizi Ouzou, Bejaia, Jijel, Skikda, Annaba, El Tarf, Guelma,
- *Tell Central* : Chlef, Tipaza, Ain Defla, Chlef, Relizane, Ain Defla, Tissemsilt, Médéa, Blida, Bouira).
- *Région forestière Ouest* : Tell Oranais, Ain Témouchent, Mostaganem Dahra, Mont de Traras (Wilaya de Tlemcen), Beni Saf, El Amria (Wilaya de Ain Témouchent), Massif côtiers d'Oran. [7]

#### **Utilisation pour la production des biocarburants (bioéthanol) :**

Les fruits sont très riches en amidon 20.28%. La subéraie mondiale serait d'environ **2 687 000 ha** (Institut Méditerranéen du Liège) ; l'Algérie en possède plus de **14 %**. [8]

### III.3.1.1.2. Les gousses du caroubier :

#### Description du caroubier :

Le caroubier est un arbre de la famille des légumineuses, (césalpiniacées) c'est un arbre à feuilles persistantes atteignant 10 m de haut, à écorce lisse de couleur grise. Aujourd'hui cultivé essentiellement dans le bassin méditerranéen, mais qui est originaire d'Asie. Un caroubier peut produire jusqu'à 800kg de caroubes par an. La caroube algérienne est connue pour ses vertus et sa couleur très caractéristique (un marron qui tire vers le foncé). [8]

#### Utilisation des gousses du caroubier pour la production du bioéthanol :

Chaque caroube pèse une quinzaine de grammes et contient de la pulpe charnue constituée de 40 % de sucres (glucose et du saccharose), 35 % d'amidon, 7 % de protéines. L'Algérie a un important potentiel de production en caroubes (4600 tonnes en 2004).

La caroube représente un énorme potentiel pour le bioéthanol puisque 100g de caroubes contiennent un total de 88g de glucides pouvant être fermentés en éthanol. D'autant plus que la consommation des algériens en caroubes a beaucoup diminué, ces dernières années, et qu'il n'existe aucune industrie de transformation de ce produit. Seulement 2.3% des gousses et 2.5% des graines sont exploités dans tout le territoire algérien. [8]

#### Conclusion :

L'analyse de la forêt algérienne montre que son utilisation comme source de biocarburant est un choix déconseillé. La forêt algérienne est une forêt « pauvre » et les espèces qui la constituent sont en lutte permanente contre les incendies et la sécheresse, son utilisation pour la production des biocarburants constituera un autre facteur de sa dégradation. Le choix le plus raisonnable est de développer d'autres espèces plus aptes à être utilisées pour la production des biocarburants.

## II.3.2. Les espèces valorisables en biocarburant deuxième génération :

### III.3.2.1. La fétuque (*Festuca arundinacea*):

La fétuque (*Festuca arundinacea*) est une espèce de fétuque communément appelé **fétuque élevée**. C'est une espèce graminée vivace de saison fraîche originaire d'Europe, elle représente un important fourrage d'herbe dans toute l'Europe, c'est aussi une herbe ornementale dans les jardins, utilisée aussi dans la phytoremédiation (dépollution des sols). [8]



FigureIII.1 : Le fétuque

Source : [8]

#### **Culture :**

La fétuque élevée est sans doute la graminée la plus pérenne, la plus productive et l'une des plus capables de pousser en été. Elle supporte aussi bien la chaleur, le froid la sécheresse et l'excès d'eau. Cette espèce présente une grande variabilité physiologique mais aussi phénotypique.

En Algérie, c'est la variété *lunibelle* qui donne le meilleur rendement avec 16.79 tonnes par hectare avec 3 à 5 coupes par an et une pérennité de 6 à 15 ans. [8]

#### **Localisation :**

La fétuque existe en Algérie, à l'état spontané dans différents terroirs. Dans les prairies naturelles situées le long des oueds ou dans les bas-fonds, la fétuque constitue le peuplement de base. [8]

#### **Utilisation pour la production du bioéthanol :**

Cette dernière a un grand potentiel, elle peut être utilisée pour produire du bioéthanol puisque elle est riche en cellulose et pauvre en lignine.

	Cellulose (kg/100 kg Ms)	Hémicellulose (kg/100kg Ms)	Lignine (kg/100 kg Ms)
Fétuque	33,3 ± 2,7	30,4 ± 1,8	6,5 ± 2,2

Tableau III.3 : composition de la fétuque

Source : [8]

#### **III.3.2.2. La canne de Provence (Arundo donax) :**

**Arundo Donax** - Roseau de Mauritanie ou canne de Provence – est une plante rhizomateuse formant des touffes composées de tiges ou chaumes, souvent hauts de 5 m, avec des feuilles assez longues, presque coupantes. Les inflorescences au sommet des tiges sont en panache, presque laineux. [8]

#### **Localisation :**

Il est très répandu en Algérie surtout aux abords des rivières, des ruisseaux et dans les lieux humides.



Figure III.2 : La canne de Provence

Source : [8]

**Utilisation pour la production du bioéthanol :**

Sa richesse en cellulose fait de lui un bon candidat pour la production du bioéthanol de deuxième génération :

Composition (%)	Cellulose	Hémicellulose	lignine
<b>Arundo donax</b>	<b>31.1</b>	<b>30.3</b>	<b>21.1</b>

Tableau III.4 : composition de la canne de Provence

Source : [8]

**III.3.2.3. Le cardon (*Cynara cardunculus*) :**

Le Cardon est une plante appartenant à la famille des Astéracées, Composées, elle est originaire du bassin méditerranéen. Les variétés de Cardon et d'artichauts sont issues de sélections de *Cynara cardunculus* qui est un cardon sauvage épineux, originaire du sud du bassin méditerranéen. [8]

**Culture :**

Le cardon se cultive sans difficulté. Un sol bien travaillé même pauvre en matières organiques lui conviendra parfaitement même en période de sécheresse.

**Localisation :**

En Algérie, *Cynara cardunculus* est rencontrée dans le secteur tell Constantinois principalement dans la région de Meskiana à Tebessa, le sous-secteur de l'atlas tellien, notamment à Oran et Mascara.

**Utilisation pour la production du bioéthanol :**

La teneur en cellulose de cette plante, son adaptation à la sécheresse ainsi que sa sensibilité à l'excès d'eau font d'elle un candidat sérieux pour la production de l'éthanol de deuxième génération.

Le tableau suivant montre la composition des différentes parties de la plante en pourcentage du poids sec.

Partie de la plante	Répartition de la MS	hémicellulose	cellulose	Lignine
<b>Feuilles</b>	25%	11.6	28.3	8.9
<b>Tige</b>	40.1%	17.9	34.2	13.3
<b>Capitule</b>	34.1	12.7	22.7	9.7
<b>Plante entière</b>	100%	14.5	28.7	10.9

Tableau III.5 : Composition du cardon

Source : [8]



#### **III.3.2.4. Les raquettes du figuier de barbarie (*Opuntia ficus indica*) :**

Le Fiquier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*) est une espèce de plante de la famille des *Cactaceae*, originaire du Mexique, qui s'est naturalisée dans d'autres continents, notamment le pourtour méditerranéen et l'Afrique du Sud. Il produit un fruit comestible appelé figue de Barbarie. Cette espèce appartient à la sous-famille des *Opuntioideae*, tribu des *Opuntieae*. [8]

##### ***Culture :***

L'*Opuntia Ficus Indica* est une espèce peu exigeante en eau et en engrais ; elle peut pousser sur des terres très hostiles, pendant des années sans irrigation.

##### ***Localisation :***

Durant l'époque coloniale, les premières réalisations à base de cactus ont été menées dans le cadre des périmètres de défense et restauration des sols dans la région de Nédroma (Tlemcen).

Une intéressante collection a été créée dans le périmètre de rénovation rurale à Zériba (Grande Kabylie) en 1974, et une a été installée à Chebli (Alger). Le cactus a fait l'objet de plusieurs études par la FAO en Algérie. Les vergers et les collections installés dans des régions comme Berrouagua semblent avoir disparu. L'*Opuntia ficus indica* fait l'objet d'une importante utilisation dans la région steppique où elle est très demandée. [8]

##### ***Utilisation pour la production du bioéthanol :***

L'*Opuntia ficus indica* représente un excellent substrat pour produire de l'éthanol en Algérie. En effet cette plante pousse dans des conditions climatiques extrêmes, dans les climats aride et semi-aride, où il n'y a pas de concurrence pour l'utilisation de matières premières à des fins alimentaires ou pour les terres agricoles. L'éthanol est issu de la transformation de ses raquettes riches en cellulose qui représentent 15 % de son poids. [8]

#### **III.3.2.5. L'eucalyptus :**

Il existe de nombreuses espèces d'Eucalyptus en Algérie parmi elles : *E accidentalis*, *E astringens*, *Espatula*, *Eforrestiana*, *Eucalyptus globulus*. Le gommier bleu (*Eucalyptus globulus*) est un arbre sempervirent de la famille des *Myrtaceae* originaire d'Australie. Il est largement cultivé et peut croître jusqu'à 30-55 m de haut. [8]

##### ***Localisation :***

On recense pour les eucalyptus une superficie de 43 000 ha avec une possibilité annuelle récoltable de 144 800 m<sup>3</sup>/an. Des reboisements ont été effectués dans le nord du pays et surtout à l'est (Annaba : 16 310 ha, Guelma: 3 940 ha, Skikda: 2 845 ha, Tizi Ouzou: 6 070 ha). Les espèces principalement utilisées sont *E. camaldulensis*, et *E. globulus*, et à moindre degré *E. grandis*, *E. gomphocephala*, *E. leucoxydon*.

##### ***Utilisation pour la production du bioéthanol :***

Le bois d'*Eucalyptus globulus* est employé principalement pour la production de pâte à papier. On l'utilise parfois localement comme bois rond d'œuvre et d'industrie et comme bois de feu. Cet arbre et comme tous les eucalyptus pourrait être un excellent substrat pour la production de

bioéthanol de deuxième génération puisque il est riche en cellulose ; en effet il contient près de 40.4% de cellulose avec écorce et près de 46.7 % de cellulose sans écorce. [8]

### **III.3.2.6. *Jatropha curcas* :**

C'est une plante oléagineuse non alimentaire qui se développe dans les régions arides et semi-arides et les zone tropicales. Le *J. Curcas* est une espèce pérenne résistante à la sécheresse. Elle pousse sur des terres marginales et son cycle de culture est de 50 ans. La teneur en huile varie entre 30-50% du poids de la graine et entre 45 à 60% du poids de l'amande seule. [9]

#### ***Culture :***

Le *Jatropha curcas* peut être cultivé sur des terres marginales, ce qui fait de cette plante une espèce non concurrente pour la production alimentaire. Le contenu d'huile de *Jatropha* varie selon les types des espèces et les conditions climatiques, mais principalement selon l'altitude à laquelle elle est cultivée. Les teneurs moyennes en huile dans les *J. curcas* diminue selon l'altitude en passant de 30,66%, 42,12 % et 43,19 % de leur poids de graine, entre 800-1000m, 600-800m et 400-600 m respectivement.

C'est une plante à croissance rapide et sa multiplication est facile. Le *J. curcas* pourrait s'adapter à une pluviométrie de 250 mm comme minimum avec un optimum entre 900 et 1200 mm. Les rendements en graines sont de 4-5 t/ha avec un rendement en huile d'environ 1.5 t/ha. [9]

### **III.3.2.7. *Moringa oleifera* :**

*Moringa oleifera* est un petit arbre originaire d'Asie tropicale, naturalisée et cultivé dans de nombreux pays tropicaux. C'est un arbre assez **résistant à la sécheresse**, facile à cultiver, très commun aux Indes, dans tout le sud-est de l'Asie, aux Philippines, en Afrique. Il est également présent en Amérique du sud.

Cet arbre peut mesurer jusqu'à 10 à 12 m. Il tolère la sécheresse et s'adapte à des précipitations annuelles de 250 à 1 500 mm. Il préfère une altitude inférieure à 600 m mais peut pousser à jusqu'à 1 200 m d'altitude dans certaines régions tropicales et a déjà été observé à 2 000 m. La plage de température idéale du *Moringa* est de 25 à 35 °C mais il peut tolérer des températures de jusqu'à 48 °C pendant de courtes périodes de temps.

Le *Moringa* est un arbre à croissance extrêmement rapide. Il peut pousser jusqu'à 4 m de hauteur en un an ; sa hauteur finale est de 6 à 15 m. [10]

## **III.3.3. Quelques matières sous forme de déchets pouvant être transformées en biocarburant :**

### **III.3.3.1. Pommes de terre déclassées et épiluchures :**

Les parties non comestibles des pommes de terre que nous avons coutume de jeter à la poubelle pourraient, remplacer les combustibles fossiles, elles contiennent en effet une quantité d'amidon résiduelle qui peut profiter à une production de bioéthanol, sachant que la pomme de terre contient plus de 17,6% d'amidon.[11] Cette matière ne pose pas de problèmes de disponibilité car la pomme de terre reste le légume féculent le plus consommé en Algérie, elle génère des tonnes de pelures chaque jour.

Sachant qu'un algérien consomme en moyenne 60kg par an et que le poids des pelures est de 114g sur 1Kg. L'algérien jette donc 6.85 Kg de pelures ce qui correspond à un total de 239750 tonnes par an. [8]

### III.3.3.2. Les rebuts de dattes :

Les dattes de part leur grande richesse en sucres (64 à 69%) et leur durée de conservation relativement longue peuvent constituer un substrat de choix pour produire de nombreuses substances à forte valeur ajoutée tel que l'éthanol.

En Algérie, les cultivars de dattes sont nombreux et sont estimés à plus de 800. Ces ressources sont très mal exploitées à l'exception de *Deglet Nour* et à degré moindre, *Ghars*, *Degla Beida* et *Mech Degla* qui présentent une importance économique majeure. Par contre, le secteur phoenicicole algérien fournit chaque année un tonnage très élevé de dattes communes, malgré cela la valeur marchande des dattes communes reste faible.

Les rebuts de dattes ou écarts de tri de dattes représentent les fruits du palmier dattier non consommables ; ces dattes ont une faible valeur marchande comparée à *deglet Nour*, *degla Baida*, *Ghars* ou encore *Mech degla*. Elles sont destinées à l'alimentation animale ou à l'échange sous forme de troc vers le Mali et le Niger. Cependant aucune industrie de transformation de la datte, n'est implantée. Aujourd'hui grâce aux procédés biotechnologiques, il est possible de valoriser les dattes communes de faible valeur marchande et de mettre sur le marché local et international, une nouvelle génération de produits à forte valeur ajoutée tel que le bioéthanol.

Il ressort que les écarts de tri représentent une moyenne de 25 % de la production dattier annuelle.

En se basant sur la production de 270 000 tonnes / an de 2010.

On peut estimer le tonnage annuel de rebuts de dattes comme suit :

$$270\ 000 * 25 \% = 67500$$

Soit : **67500 tonnes de rebuts de dattes / an**

Nous constatons que ces sous-produits sont disponibles avec un tonnage très appréciable, justifiant une étude de leur valeur en vue de leur utilisation rationnelle pour produire du bioéthanol.

#### Procédé :

##### a- Préparation du moût de dattes

Après lavage, l'imbibition des dattes est faite à l'aide d'une eau chaude (90 à 95 °C) afin de faciliter le dénoyautage. Le broyage des pulpes est effectué par la suite. L'eau d'imbibition riche en sucre sera utilisée comme eau de dilution du moût.

Les dattes -ainsi traitées- sont ensuite diluées à raison de 200 g de pulpes pour 800 ml d'eau. Le pH du moût est ajusté entre 4.3 et 4.7 par l'acide sulfurique. Ce pH acide préjudiciable au développement des bactéries s'avère propice à la prolifération des levures.

##### b- Procédé de la fermentation alcoolique

Après ensemencement du milieu par la levure de boulangerie *Saccharomyces cerevisiae* (1 g/l), le bio réacteur est plongé dans un bain-marie où la température est maintenue à  $30 \pm 2$  °C. La fermentation est conduite en anaérobiose pendant 72 heures. Toutefois, la fermentation est favorisée par une agitation due au mouvement des bulles du CO<sub>2</sub> dégagé. Après 72 heures, la fermentation est arrêtée.

#### c- Distillation alcoolique

A la fin de la fermentation, le vin de dattes obtenu est distillé afin d'extraire l'éthanol. La température de distillation est de l'ordre de 78 °C.

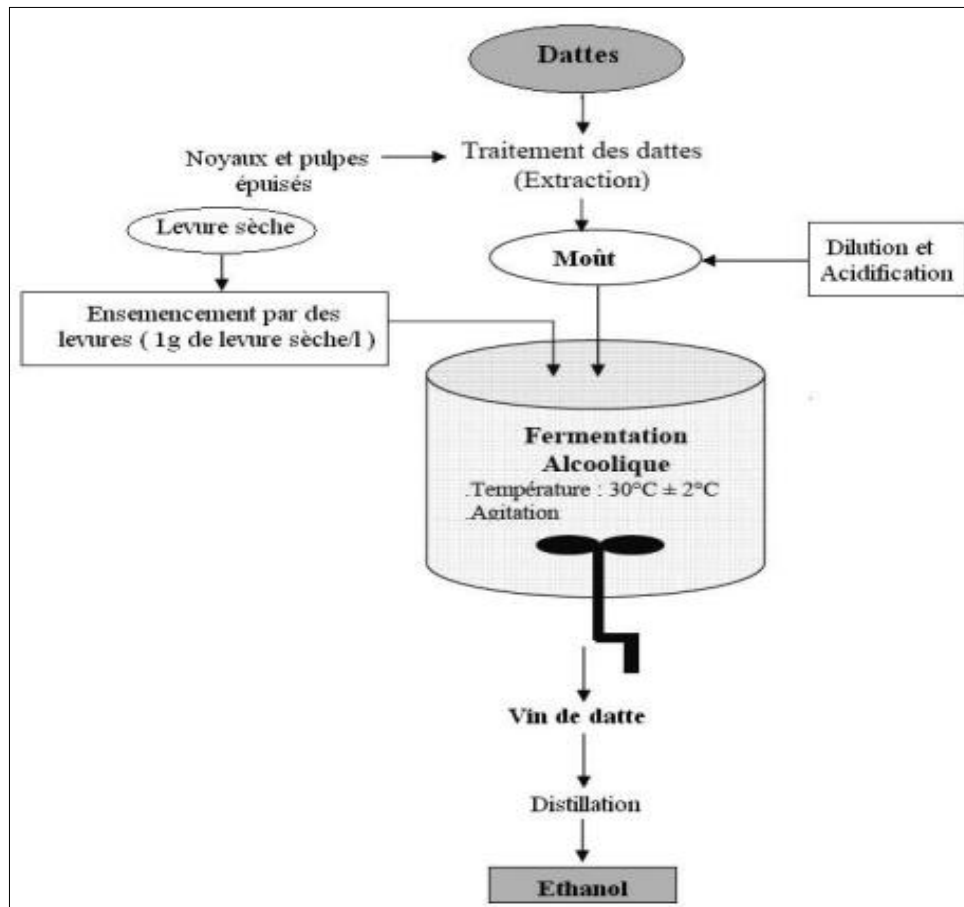


Figure III.3 : Diagramme de déroulement de la fermentation alcoolique

Source : [12]

En conclusion, les dattes communes présentent un très bon substrat de fermentation alcoolique pour la réalisation d'une installation semi-pilote de production d'éthanol dans le futur proche. [8][12]

### **III.4.Conclusion:**

Par leur caractère totalement renouvelable, les biocarburants se positionnent clairement pour faire partie des carburants de l'après-pétrole. Cependant, la recherche doit s'intensifier pour développer les carburants de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> générations, vu que les carburants de 1<sup>ère</sup> génération ne peuvent pas être une option viable. L'Algérie doit se lancer dans ce secteur pour acquérir l'expérience nécessaire dans les prochaines années.

## Chapitre IV : Le biométhane carburant

### IV.1. Introduction :

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (CH<sub>4</sub>) et de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) produit par fermentation anaérobie (en absence d'air) de matières organiques.

Cette fermentation appelée aussi méthanisation se produit naturellement (dans les marais) ou spontanément dans les décharges contenant des déchets organiques, mais on peut aussi la provoquer artificiellement dans des digesteurs (pour traiter des boues d'épuration, des déchets ménagers organiques, des déchets organiques industriels ou agricoles, etc.).

Elle permet ainsi d'agir sur notre environnement en éliminant des **déchets** et de plus, produit une **énergie « verte »** car la matière utilisée est issue du vivant (animal ou végétal). En utilisant ce biogaz, on économise de l'énergie fossile.

Dans les années 1940, le processus de digestion anaérobie a été utilisé pour produire de l'énergie à partir des fumiers que l'on dénommait « gaz de fumier ». Aujourd'hui, elle s'est principalement implantée comme un outil de **dépollution** intéressant. Le fait que cela soit couplé à une production d'énergie (le méthane) en a augmenté l'intérêt.

L'application de la digestion anaérobie au **traitement des effluents** s'est fortement développée dans les années 1970 et de nombreuses applications industrielles ont vu le jour. Elle a été appliquée aux effluents des industries agroalimentaires, chimiques, pétroliers, agricoles.

Elle a vu aussi un important développement dans le cadre du traitement des déchets municipaux, agricoles et industriels. Les centres d'enfouissement techniques (CET) appliquaient déjà cette stratégie, mais leurs temps de stabilisation (de plusieurs dizaines d'années) sans récupération du biogaz laissent aujourd'hui la place à des traitements plus intensifs de la matière organique solide.

### IV.2. Potentiel énergétique du biogaz dans le monde :

Selon une étude de l'ADEME, le biogaz représente dans le monde un gisement comparable à plus de la moitié de la consommation annuelle de gaz fossile soit 1 800 Mtep/an. Cette énergie étant trop dispersée pour être facilement récupérable on évalue le potentiel valorisable à une fourchette de 100 à 300 Mtep/an. La quantité valorisée aujourd'hui est de 0,5% du potentiel valorisable. [13]

### IV.3. Production du biométhane carburant :

Le biométhane est du biogaz qui a été épuré pour être similaire à du gaz naturel (pouvoir calorifique, composition). Il peut être valorisé comme biocarburant gazeux ; on parle alors de biométhane carburant. Il s'utilise exactement comme le gaz naturel, nécessitant pour alimenter un véhicule d'être comprimé à 200 bars par une station de compression.

Plusieurs voies de production pour le biométhane sont possibles :

- A court terme, il s'agit d'utiliser des déchets ou effluents d'origine organique. Cette filière est déjà bien développée dans de nombreux pays d'Europe.
- A moyen terme, la production de biométhane pourra être éventuellement réalisée à partir de cultures énergétiques (Sorgho Biomasse par exemple).
- A plus long terme, la gazéification de la biomasse issue de ressources lignocellulosiques est également envisageable.

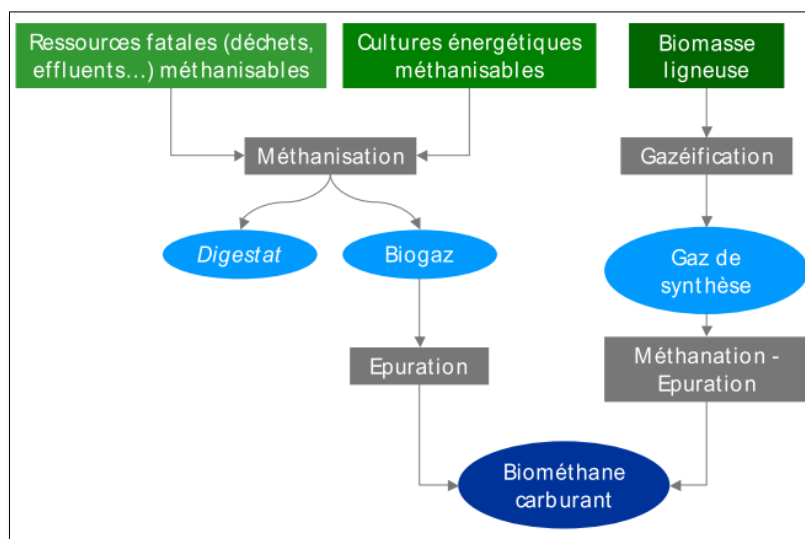


Figure : IV.1 : différentes voies de production du biométhane carburant  
Source : [14]

Le biométhane ayant une qualité similaire à celle du gaz naturel, l'incorporation de biométhane dans le GNV, quelle qu'en soit la proportion, peut être réalisée sans modification des véhicules fonctionnant au gaz naturel, ni des infrastructures de distribution associées. Ces deux carburants sont tout à fait complémentaires, dans la mesure où le biométhane apporte une part renouvelable au GNV, mais il ne pourra se développer que si la filière GNV est elle-même bien implantée. Les investissements dédiés au GNV (technologie moteur, accroissement du nombre de stations) participent donc au développement progressif du biométhane carburant.

### IV.3.1. Le biométhane issu de ressources fatales :

Un carburant renouvelable attractif, en plein développement :

A l'échelle industrielle, deux types de production du biogaz peuvent être cités:

- l'installation de stockage de déchets non dangereux : le biogaz est issu de la dégradation spontanée de la fraction fermentescible des déchets ménagers et assimilés enfouis. La production de biogaz peut durer, en mode de gestion classique, environ 20 à 30 ans.

- la méthanisation en digesteur : le processus de base de « méthanisation » a été mis en œuvre industriellement via la technologie de méthanisation ou de digestion anaérobie. Après avoir été débarrassée des composés indésirables, la matière organique est introduite dans un réacteur, appelé digesteur, maintenu à des températures de l'ordre de 35°C ou 50-55°C selon le procédé.

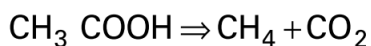
Le volume du réacteur est fonction des quantités à traiter : de quelques centaines à plusieurs milliers de mètres cubes

La fermentation anaérobie des matières organiques dure de 1 à 3 semaines et produit le biogaz contenant de 55 % à 80 % de méthane, soit environ 500 m<sup>3</sup> de méthane par tonne de matière organique dégradée. Il contient également 20 à 45 % de dioxyde de carbone, quelques dizaines à quelques milliers de ppm (parties pour million) d'hydrogène sulfuré et il est saturé en eau. Il peut également contenir des traces d'autres éléments selon la nature du substrat d'origine. Il est donc nécessaire de l'épurer pour l'utiliser comme carburant.

En plus du biogaz, il est également produit un digestat qui peut être traité et composté pour aboutir à un produit organique valorisable. [14]

Les réactions mises en œuvre permettent de distinguer trois étapes de dégradation de la biomasse :

- l'hydrolyse du substrat en composés simples solubles ;
- l'acidogénèse et l'acétogénèse : formation d'acides volatils, d'ammoniac, de dioxyde de carbone, d'hydrogène et d'acide acétique ;
- la méthanogénèse soit par dégradation de l'acide acétique : [15]



Soit par oxydation de l'hydrogène :



### IV.3.2. Le biométhane issu de cultures énergétiques:

Une filière en débat : Au-delà du potentiel biométhane associé au gisement que représentent les déchets, un potentiel important pourrait être atteint à moyen terme grâce à l'utilisation de surfaces agricoles pour la production de cultures dédiées méthanisables, sous réserve que celles-ci ne soient pas en concurrence avec les filières alimentaires, ou d'autres filières énergétiques ou matériaux.

Il y a lieu de souligner que la méthanisation présente un atout spécifique, le digestat, sous-produit organique valorisable en amendement, qui peut être utilisé sur les terres agricoles mobilisées pour les cultures énergétiques, en substitution aux engrais chimiques.

La méthanisation de cultures énergétiques s'est fortement développée en Allemagne, grâce à une fiscalité avantageuse ; toutefois, la plante majoritairement utilisée est le maïs dont le



pouvoir méthanogène est intéressant, mais dont la culture pour un usage énergétique fait face à différents questionnements : besoins en irrigation, hausse des prix, etc. Il est donc essentiel d'identifier des plantes qui permettront de produire du biométhane carburant de façon encore plus durable (luzerne, sorgho...). [14]

### IV.3.3. A plus long terme, la production par gazéification :

Le biocarburant gazeux peut aussi être produit à partir de biomasse ligno-cellulosique par une première étape de gazéification, suivie d'une étape de méthanation.

Ce processus permet de produire du Substitute Natural Gas (SNG). Aujourd'hui, la gazéification et la méthanation sont technologiquement connues, mais elles doivent être adaptées à la biomasse ; la technologie de production de SNG est encore au stade de démonstration. Cette filière, complémentaire de la production de biocarburants liquides de seconde génération, se positionne sur une biomasse différente de celle utilisée pour la digestion anaérobie (plus ligneuse et moins humide). A long terme, elle permettrait donc d'atteindre un potentiel de biocarburant gazeux encore plus important que celui constitué uniquement par les déchets.

Elle devrait se positionner favorablement au sein des biocarburants de seconde génération grâce à des rendements énergétiques élevés, supérieurs à 60%. Les tailles d'installation de production de biométhane carburant par cette filière pourront être adaptées à un approvisionnement local en biomasse et à une valorisation locale aisée de la chaleur co-produite. [14]



### IV.4. Du biogaz au biométhane carburant :

L'épuration du biogaz est indispensable pour assurer la compression et l'utilisation du gaz dans les moteurs.

La chaîne de production du biométhane carburant se divise en quatre grandes étapes :

- la production du biogaz brut,
- l'épuration de ce biogaz pour en faire du biométhane,
- le comptage, l'odorisation, et la vérification de la qualité du biométhane,
- le stockage du biométhane carburant, sa distribution et sa compression à 200 bars.

### Différents procédés d'épuration :

L'épuration du biogaz sert à la fois à éliminer les composés indésirables et à augmenter le pouvoir calorifique du biogaz (notamment par l'élimination du CO<sub>2</sub>, énergiquement inerte). Elle comporte généralement au moins trois étapes :

- **la décarbonatation** : le dioxyde de carbone représente le deuxième constituant principal du biogaz, après le méthane. Son élimination permet de réduire les risques de corrosion et d'augmenter le pouvoir calorifique du biogaz. Ce traitement peut être réalisé par adsorption, par lavage (eau ou autre solvant) ou par procédés membranaires ;

- **la désulfuration** : l'H<sub>2</sub>S est toxique et, en présence d'eau, très corrosif même à faible teneur. Il peut être séparé notamment par lavage et/ou par adsorption sur charbon actif imprégné ; L'hydrogène sulfuré ramenées à moins de 7 mg/m<sup>3</sup>

- **la déshydratation** : pour atteindre le point de rosée de - 10 °C à 200 bars, soit 35 mg/m<sup>3</sup>, de plus l'eau est le principal facteur de risques de corrosion. Pour atteindre des teneurs en eau aussi faibles que dans le GNV, il est possible d'utiliser les procédés suivants : une adsorption sur alumine activée, gel de silice ou tamis moléculaire, ou bien par lavage avec un solvant hydrophile (cette dernière option étant plutôt réservée à des débits de gaz très importants).

Si besoin, à ces traitements s'ajoute l'élimination d'éléments traces problématiques, notamment les métaux lourds (généralement par adsorption). La technologie du lavage à l'eau, qui consiste à dissoudre le CO<sub>2</sub> et l'H<sub>2</sub>S dans l'eau est sans doute la plus utilisée.

Après épuration aux normes du gaz naturel, le biogaz est identique au GNV (gaz naturel pour véhicule) et il est utilisable comme carburant pour moteurs. Il est constitué au minimum de 97 % de méthane.

La faible aptitude à l'auto-inflammation implique un allumage commandé, donc des modifications relativement importantes des moteurs Diesel. Les véhicules à essence doivent également être adaptés (réservoirs, détenteur, mélangeur...) pour fonctionner en bicarburant. Actuellement, l'essentiel des véhicules utilisant le méthane sont des véhicules à essence ou diesel convertis, mais plusieurs constructeurs proposent des véhicules conçus d'origine pour la carburant au méthane, soit aussi au gaz naturel, ces véhicules sont appelés GNV (gaz naturel véhicules).

Pour réduire l'encombrement des réservoirs, le gaz est comprimé à haute pression (200 bar maximum) et à quantité d'énergie égale, il occupe 5 fois plus de volume qu'un carburant liquide (1 Nm<sup>3</sup> de biogaz épuré représente l'équivalent de 1,1 L d'essence, le pouvoir calorifique inférieur du biogaz épuré est identique à celui du gaz naturel, soit 9,94 kWh/Nm<sup>3</sup>).

Au plan des émissions, un certain nombre d'avantages apparaissent en utilisant le GNV et le biogaz, avec les émissions de CO, COVNM, NO<sub>x</sub> par rapport au diesel, SO<sub>x</sub> et particules. [14]

### IV.5. Coûts de production :

Le coût de production du biogaz épuré, odorisé, contrôlé et compté, produit à partir de cultures énergétiques et de lisier se situe respectivement entre 8 et 21 c€/kWh, et entre 5 et 15 c€/kWh, et décroît lorsque la puissance augmente. Dans le cas d'une production à partir de déchets, le coût du biogaz épuré est inférieur à 7 c€/kWh, et son évolution en fonction de la puissance est difficile à estimer.

En France, le prix à la pompe du GNV est de l'ordre de 0,89 €/L équivalent diesel, c'est-à-dire environ 8 c€/kWh. Il est difficile de définir une taille critique pour les installations de production de biogaz. En effet, le prix à la pompe comprend les taxes éventuelles sur ce carburant, qui diffèrent selon les pays. Il inclut également les frais relatifs aux infrastructures pour acheminer le carburant du site de production jusqu'au réservoir du client.

Cependant, un projet de production de biométhane carburant à partir de déchets devrait être a priori plus rentable qu'un projet utilisant des cultures énergétiques. Sans redevance pour le lisier, les projets de production de biométhane s'appuyant sur cette ressource devraient également intégrer d'autres déchets organiques pour rendre ces projets plus rentables. Seule une étude au cas par cas permettrait de trancher sur la rentabilité d'un projet de production de biométhane carburant.

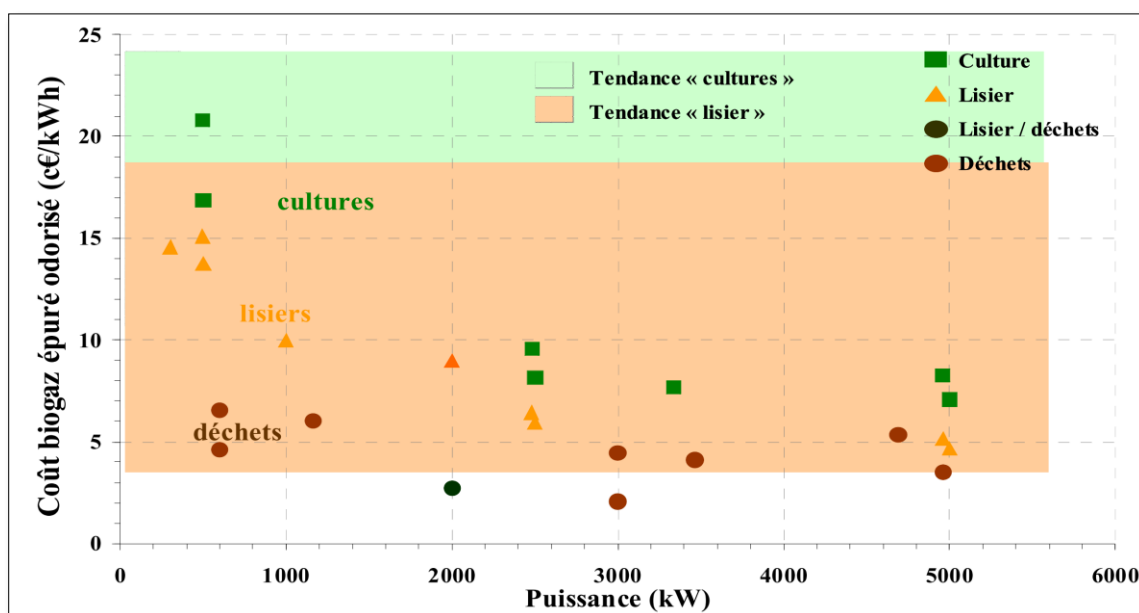


Figure IV.2 : Cout de production du biogaz épuré en fonction des substrats utilisés  
Source : [14]

Le coût de production du biogaz épuré, odorisé, contrôlé et compté varie en fonction des substrats utilisés et de la puissance de l'installation de production.

Les plages tracées ne sont qu'une représentation visuelle des grandes tendances d'évolution des coûts du biogaz épuré selon le substrat considéré. Elles ne représentent pas des frontières réelles. [14]

## IV.6. Les avantages et les inconvénients de biogaz :

### IV.6.1. Les intérêts et les avantages d'un projet de méthanisation pour l'environnement :

#### ➤ Réduction des émissions de gaz à effet de serre :

Les matières organiques en fermentation dans des conditions anaérobies (sans oxygène) émettent naturellement du méthane, dont l'effet de serre est 20 à 25 fois plus important que celui du CO<sub>2</sub> émis lors de la combustion de méthane. De plus, ce CO<sub>2</sub> fait partie du cycle de vie naturel de la biomasse et n'est pas d'origine fossile. En permettant de capter le méthane pour produire de l'énergie, la méthanisation permet de contrôler les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

L'utilisation de biométhane à la place du gaz naturel permet d'économiser du gaz naturel et remplace des émissions « artificielles » de CO<sub>2</sub> par des émissions « naturelles ».

#### ➤ Production d'énergie renouvelable à l'échelle locale (production d'électricité ou réseau de chaleur) :

L'énergie produite à partir du biogaz est une énergie renouvelable car le méthane n'est pas d'origine fossile comme dans le gaz naturel par exemple, mais produit à partir de déchets organiques. Plus important encore, il s'agit d'une énergie produite localement.

#### ➤ Respect du cycle de vie des matières méthanisées :

Après méthanisation, la matière est retournée au sol qu'elle enrichit, limitant ainsi l'usage d'engrais chimiques. Voir Figure IV.3. [16]

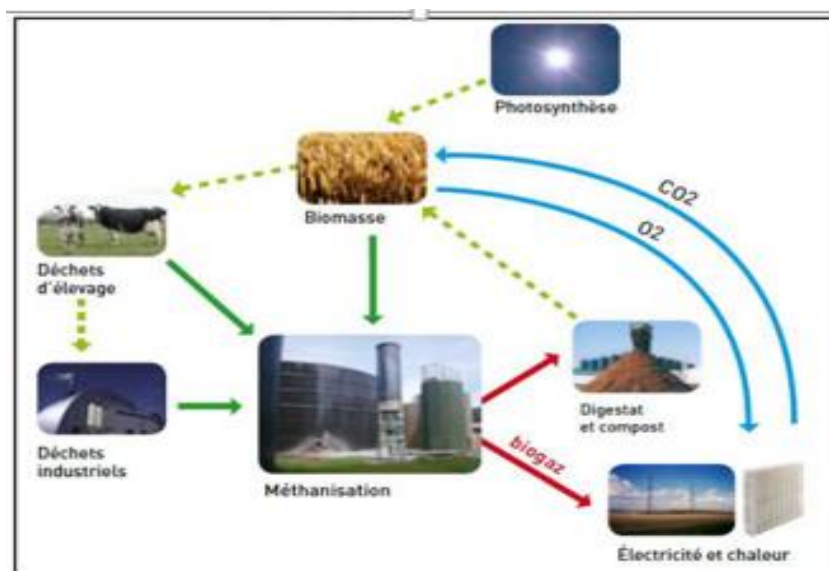


Figure IV.3 : Cycle de vie des matières méthanisées  
Source : Ferti NRJ

- **Gestion durable des déchets organiques :** La méthanisation s'inscrit parfaitement dans ce schéma tout en ayant l'avantage de produire de l'énergie renouvelable.
- **Création d'emplois locaux non délocalisables :** Par exemple lors de la conception et construction de sites, puis pour le transport, fonctionnement et maintenance (1 emploi direct permanent par tranche de 300 kW).
- **Autonomie énergétique et maîtrise du coût de l'énergie :** Le biogaz constitue une énergie facilement stockable (gazomètre du digesteur, bouteilles de gaz, réseau de gaz), flexible, qui permet une production stable et prédictible sur court ou long terme. De plus, l'énergie produite grâce au biogaz est la seule énergie renouvelable valorisée sous forme multiple en remplacement du pétrole, du gaz naturel, du fioul, du nucléaire.

L'autonomie énergétique peut être améliorée grâce au développement des réseaux de chaleur collectifs à prix très compétitifs et ce, grâce aux déchets.

La méthanisation permet aussi l'optimisation des process des industries agroalimentaires locales par l'utilisation de la chaleur pour la vaporisation d'eau, l'hygiénisation, la pasteurisation, le séchage, etc. Cela permet la diminution des coûts de traitement des déchets en interne et favorise la compétitivité.

Au niveau économique local, on peut référencer les bénéfices suivants :

- Réduction de l'achat des engrais par la valorisation du digestat
- Revenus complémentaires par la production et la vente d'électricité ou de biométhane
- Diversification de revenus pour les exploitations agricoles, et réduction des coûts d'intrants (engrais, phytosanitaires, énergie)
- Création de revenus pour les territoires ruraux : taxes
- Création d'une économie et d'une dynamique de marché autour de la méthanisation
- Création d'une filière de produits et technologies innovantes. [16]

### **IV.6.2. Les avantages agronomiques de la méthanisation :**

Le digestat issu de la méthanisation a une excellente qualité agronomique, meilleure à celle des matières non méthanisées: les éléments fertilisants sont sous forme minérale plus facilement assimilables par les plantes, ce qui améliore le rendement dans la plupart des cas. Le digestat intéresse donc fortement les agriculteurs parce qu'il évite des engrais azotés chimiques et a aussi une valeur amendante. Il présente aussi l'avantage d'être jusqu'à 98% moins odorant que la matière brute méthanisée. Les germes pathogènes sont réduits ainsi que les graines de mauvaises herbes.

### **IV.6.3. Les atouts de la méthanisation dans le bouquet énergétique :**

Par rapport aux autres énergies renouvelables, l'énergie produite grâce à la méthanisation présente les avantages suivants :

- Elle est potentiellement productible et valorisable sur tout territoire.

- Elle est flexible, permet une production stable et prédictible sur court ou long terme.
- Le biogaz produit constitue une énergie facilement stockable (gazomètre du digesteur, bouteilles de gaz, réseau de gaz). Cette énergie se prête donc à une production en période de pointe.

L'énergie produite par méthanisation est la seule énergie renouvelable valorisée sous forme multiple en remplacement du pétrole, du gaz naturel, du fioul, du nucléaire. [16]

### **IV.6.4. Pourquoi le biogaz n'est-il toujours pas mis en place aujourd'hui ?**

Le coût de l'investissement est l'obstacle principal à la mise en place de la production de biogaz.

### **IV.7. Conclusion :**

Le biogaz est une nouvelle source d'énergie renouvelable, qui se développe de plus en plus au niveau européen et mondial. Grâce à ce procédé, des déchets sont valorisés en biogaz qui après traitement peut être utilisé comme carburant. On peut en conclure que le biogaz est une alternative aux énergies fossiles, notamment le pétrole, car elle est renouvelable et surtout moins polluante. C'est donc un premier pas dans la recherche d'alternatives au pétrole, dont les réserves seront épuisées d'ici quelques dizaines d'années.

## Chapitre V: Biocarburants à partir d'huiles usagées

### **V.1. Introduction :**

Comment limiter, voire remplacer le recours systématique au pétrole, en particulier dans le secteur des transports où sa suprématie est encore quasi totale, tout en réduisant les émissions de polluants et les gaz à effet de serre ? Pour faire face à cette problématique mondiale, il s'agit à la fois d'anticiper, à terme, la pénurie inéluctable de pétrole et de contribuer à un environnement durable.

Le développement durable consiste à réconcilier le développement économique et social, la protection de l'environnement et la conservation des ressources naturelles. Dans ce cadre, la valorisation de la biomasse (forêts, déchets céréaliers, déchets huileux,...) apparaît comme une alternative séduisante aux hydrocarbures, tant pour produire de l'énergie que des biocarburants.

La biomasse, constituée par la matière vivante, terrestre ou marine, peut constituer une source d'énergie considérable. Sa forme la plus traditionnelle est le bois utilisé pour le chauffage ou la cuisson des aliments. Toutefois, la biomasse sert aussi à produire des biocarburants, à partir de plantes oléagineuses (colza, tournesol, soja) ou de plantes sucrières (betterave, canne à sucre) et de céréales (blé, maïs). Ces biocarburants représentent un intérêt majeur, car ils permettent de limiter les rejets dans l'atmosphère du CO<sub>2</sub> (principal gaz à effet de serre), car les quantités de CO<sub>2</sub> rejetées tout au long de la chaîne de production (engrais, opérations de découpe et de raffinage, émissions des moteurs automobiles) sont absorbées par la biomasse pour sa propre croissance par photosynthèse. Ainsi la valorisation des huiles végétales rentre dans le cadre de recherches de ressources renouvelables et respectueuses de l'environnement.

Les biocarburants permettent de se substituer au gasoil ou à l'essence. Face à la forte consommation de gasoil en Algérie, au point où l'Algérie importe du gasoil, les biocarburants doivent se substituer au gasoil.

Actuellement, pour biodiesel, la seule filière industrielle sont les EMHV (Esters Méthyliques d'Huiles Végétales) plus connus sous le nom de Diester (contraction de Diesel et Ester). Les EMHV sont produits par transesterification d'huiles végétales, (de colza en France, de soja aux Etats-Unis), en utilisant du méthanol d'origine pétrochimique. Les EMHV sont de façon banalisée, additionnés au gazole jusqu'à hauteur de 2 % (en volume) en 2005. La directive européenne du 8 mai 2003 incite à une utilisation croissante des biocarburants, purs ou en mélanges, avec des objectifs ambitieux pour 2010 (part des EMHV portée à 5,75 % en volume). [17]

Le Diester est un carburant liquide d'origine végétale, et donc renouvelable, utilisé à grande échelle pour les moteurs Diesel et acheté par les sociétés pétrolières qui l'incorporent elles-mêmes au gazole.

Mélangés au gazole, les EMHV améliorent en outre le pouvoir lubrifiant du carburant nécessaire au bon fonctionnement des systèmes d'injection, et diminuent les émissions de fumées noires.

Le biodiesel peut être utilisé soit pur soit en mélange en toute proportion avec les gasoils et le fioul domestique pour alimenter les moteurs diesel et les installations de chauffage. Produit à partir de ressources renouvelables, c'est un carburant moins toxique ne contenant pas de soufre. Il permet ainsi de réduire les émissions polluantes de 10 à 50 % en fonction de la proportion d'EMHV introduite dans le carburant d'origine fossile. Enfin, le biodiesel est biodégradable à 95 % en 28 jours.

La consommation d'une tonne de Diester permet d'économiser l'équivalent de 2,5 tonnes de CO<sub>2</sub>.

Cependant, la consommation alimentaire d'huiles est de matières grasses est en progression constante en Algérie. L'utilisation de ces ressources pour produire des bioénergies en grandes quantités irait alors en contradiction avec le développement durable en détournant ses huiles de leurs utilisations principales : l'alimentation. La concurrence avec le secteur alimentaire et la limite de la production impliquent le développement d'autres solutions.

C'est pourquoi une idée très intéressante a été développée dans le cadre du développement durable : la valorisation des huiles alimentaires usagées.

Le biodiesel est obtenu par réaction de transestérification des triglycérides par le méthanol en catalyse homogène ou hétérogène avec différents types de catalyseurs acides ou basiques. Plusieurs paramètres ont une influence sur cette réaction, parmi eux : l'eau, les acides libres, la nature de l'alcool, le rapport molaire alcool/huile, ainsi que la température et le temps de réaction.

### **V.2. Les huiles alimentaires usagées :**

Notre société, grande consommatrice d'huiles alimentaires est aussi une grande productrice d'huiles alimentaires usagées que sont les huiles de friture.

La friture est l'un des plus anciens procédés d'élaboration des aliments. Elle peut être réalisée à la poêle en présence de peu de matières grasses (friture plate) ou dans un grand volume d'huile ou de matière grasse (friture profonde). Aujourd'hui, le procédé de friture absorbe la majorité des huiles alimentaires produites dans le monde et des produits frits sont consommés sur tous les continents. Ces dernières décennies, l'évolution de nos modes de vie (éloignement du lieu de travail, restauration hors du foyer, alimentation déstructurée...) a contribué à la diversification des produits frits tant dans la restauration collective ou rapide que dans l'industrie agroalimentaire. [17]

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 leur déversement dans le réseau d'assainissement et par conséquent la protection des installations de traitement des eaux et l'environnement.



### **V.2.1. Utilisation des huiles alimentaires comme huiles de friture :**

La plupart des huiles végétales contiennent, des concentrations importantes en acides gras monoinsaturés et polyinsaturés et sont habituellement liquides à température ambiante.

Lorsque les huiles sont chauffées, celles-ci subissent des dégradations plus ou moins importantes. Les huiles riches en acides gras monoinsaturés, comme l'huile d'olive et l'huile d'arachide, sont plus stables et peuvent être réutilisées plusieurs fois après avoir été chauffées, à l'inverse des huiles riches en acides gras polyinsaturés telles que l'huile de maïs et l'huile de soja. Pour les fritures, il est important de ne pas surchauffer l'huile (ne pas dépasser 180°C) et de la remplacer fréquemment (toutes les 10 utilisations environ) (Graille, 1998).

Sous l'effet de l'eau contenue dans les aliments, de l'air et des aliments eux-mêmes, l'huile chaude subit des transformations chimiques conduisant à la formation de composés polaires, la diminution de certains composés d'intérêt nutritionnel, l'apparition de composés volatils responsables d'odeurs désagréables et l'apparition de composés non volatils qui s'avèrent toxiques à fortes doses. Les huiles alimentaires usagées contiennent encore, malgré tout, une partie non dégradée importante. [17]

### **V.3. Valorisation des huiles alimentaires usagées :**

Les huiles usagées sont collectées dans de nombreux pays par des organismes indépendants afin de protéger l'environnement. Après collecte, les huiles usagées issues de diverses sources sont mélangées entre elles et présentent suivant les approvisionnements, une composition chimique ainsi que des qualités nutritionnelles et sanitaires extrêmement variables. Elles comprennent souvent des fractions solides et liquides aux températures d'entreposage courantes, elles contiennent fréquemment de l'eau et sont parfois contaminées par d'autres produits. Après collecte, ces matières grasses sont débarrassées de l'eau et des éléments solides. Le produit ainsi obtenu est appelé Matière Première Secondaire (MPS). Elles peuvent ensuite être fractionnées selon leur point de fusion et éventuellement désodorisées. Lorsque la législation le permet, les matières grasses sont incorporées dans l'alimentation animale. Dans le cas contraire, cette Matière Première Secondaire sert de combustible, par exemple en cimenterie, voire de biocarburant pour les moteurs diesel (après transestérification). [17]

Le gisement d'huiles alimentaires usagées est estimé en Algérie à environ 440 000 tonnes par an. Ce gisement proviendrait des industries agro-alimentaires, restaurations commerciales et collectives.

Pourtant, le secteur de valorisation des huiles alimentaires usagées n'est pas valorisé en Algérie car il n'y a pas de cadre réglementaire pour la production et la vente de biodiesel mais surtout parce que le biodiesel ne peut absolument pas concurrencer le diesel traditionnel subventionné, sauf si le biodiesel est aussi subventionné.

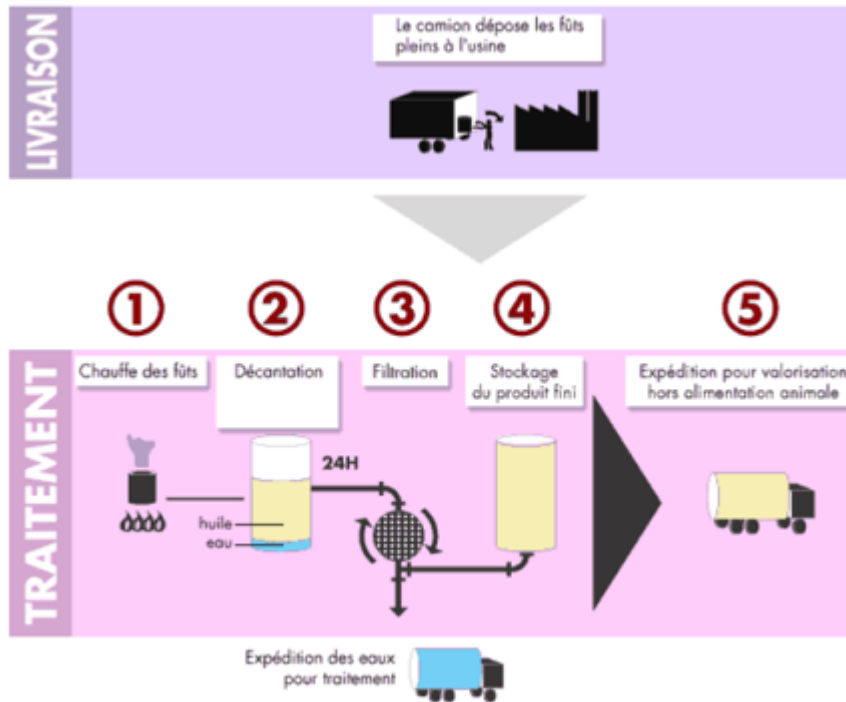


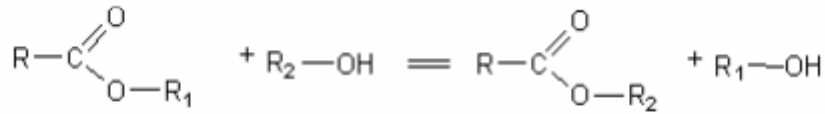
Figure V.1 : Procédé de récupération et de traitement des huiles usagées  
Source : Rapport de communication SudRecup, 2004

Les collecteurs s'engagent à :

- Assurer un service fiable et régulier,
- Déposer des conteneurs consignés, propres, prêts à recevoir les huiles et graisses de cuisine,
- Enlever ces conteneurs et les acheminer vers un centre de traitement où les produits seront soit incinérés, soit transformés en Matière Première Secondaire (MPS) pour suivre ensuite des filières de valorisation hors alimentation animale. [17]

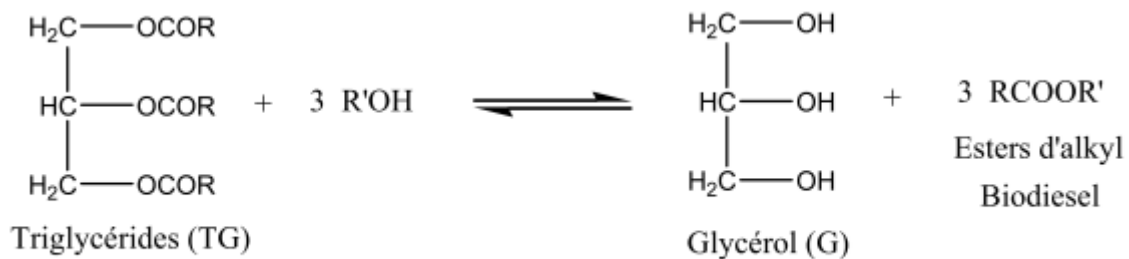
### V.3.1. La transestérification :

Nommée aussi alcoololyse, c'est la réaction entre un ester et un alcool conduisant à un ester différent.



Réaction générale de la transestérification

Dans notre cas, il s'agit de la réaction entre le triglycéride contenu dans une huile végétale avec un alcool pour former le glycérol et un mélange de monoesters utilisés comme biocarburant.



Réaction de transestérification des triglycérides avec l'alcool

Elle est catalysée aussi bien par les acides que par les bases. Elle est favorisée par une augmentation de température, un excès d'alcool ou lorsque les conditions opératoires permettent la décantation du glycérol. [18]

### V.3.2. Réaction de transestérification des huiles :

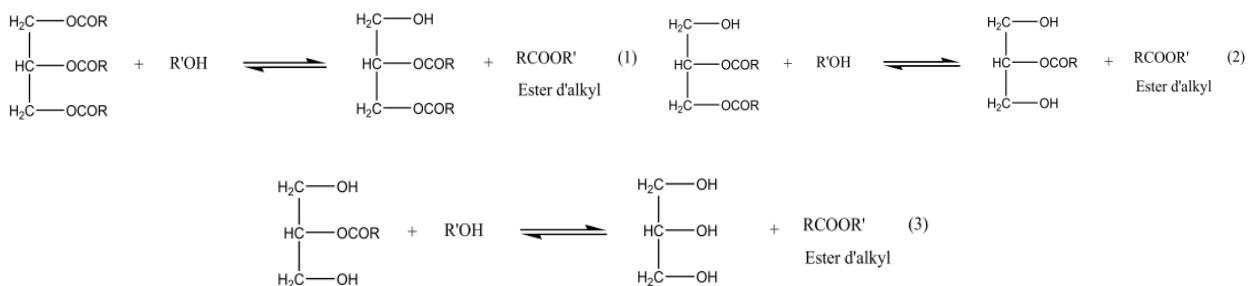
#### V.3.2.1. Historique:

La transestérification des triglycérides n'est pas un processus nouveau. Elle date dès 1853 lorsque Patrick et Duffy ont mené cette réaction beaucoup d'années avant que le premier moteur Diesel soit fonctionnel.

Cette réaction a été l'objet de recherches intensives grâce aux utilisations diverses de ces produits comprenant la synthèse des polyesters ou PET dans l'industrie des polymères, la synthèse des intermédiaires pour l'industrie pharmaceutique, le durcissement des résines dans l'industrie de peinture et dans la production du biodiesel en tant que alternatif du diesel.[18]

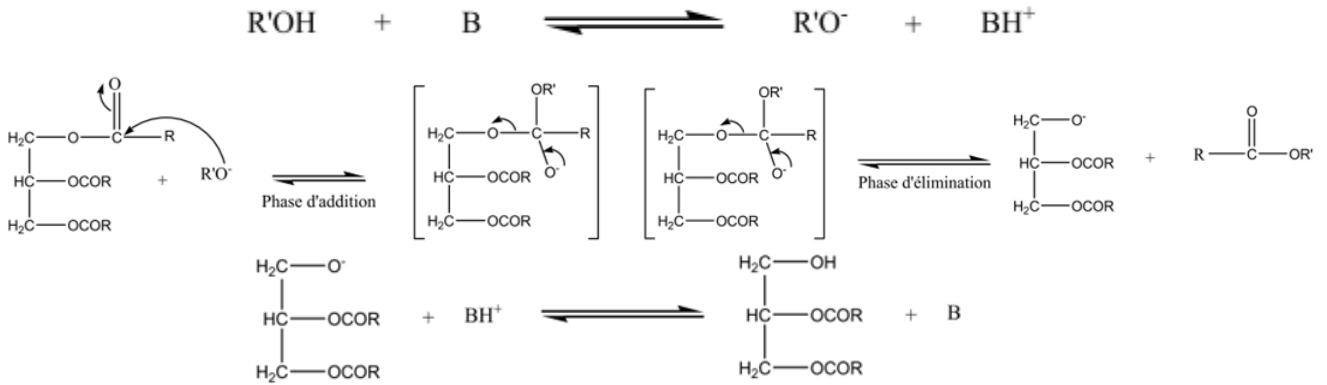
#### V.3.2.2. Mécanisme de la réaction :

La réaction de transestérification se fait en trois étapes successives :



La réaction de transestérification est chimiquement équilibrée. Les étapes (1) et (2) sont rapides car les fonctions esters primaires sont transestérifiées en premier, l'étape (3) est plus lente.

En catalyse basique, le mécanisme est le suivant :



Il consiste d'abord en une attaque nucléophile du carbonyle (du triglycéride) par l'anion alcoolate pour former un carbanion intermédiaire (phase d'addition). Puis, départ nucléofuge lors du rabattement du doublet de l'oxygène (phase d'élimination). L'alcoolate est régénéré dès l'apparition d'une fonction alcoolate du glycérol. Avec le NaOH, le KOH, le K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ou d'autres catalyseurs similaires, l'alcoxyde formé est souvent identifié comme l'espèce catalytique.

La troisième réaction (mono donne l'ester) semble être l'étape déterminante de la réaction car les monoglycérides sont des intermédiaires plus stables que les diglycérides. [18]

### V.3.2.3. Paramètres importants de la réaction de transestérification des huiles :

Cette réaction est influencée fortement par la nature du catalyseur (acide ou basique), la nature de l'alcool et de l'huile, le rapport molaire alcool/triglycérides, la température, la présence des acides libres et d'eau, la vitesse de l'agitation et le temps de la réaction. Cependant, beaucoup de recherches s'orientent actuellement vers la catalyse en milieu hétérogène. [18]

#### Les types de catalyseurs :

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. Cependant, dans le cas de la catalyse acide, une température élevée, permet d'accélérer la vitesse de réaction. [18]

### V.3.2.4. Procédés industriels de transestérification :

#### V.3.2.4.1. Procédés industriels homogènes :

Plusieurs procédés sont utilisés pour produire des esters d'acides gras. Ils diffèrent par le choix du catalyseur, des rapports molaires (alcool/huiles), des conditions expérimentales (Température et pression) ainsi que les différentes phases du procédé. En France, la première unité de production d'esters carburant, utilisant un procédé du premier type a été construite en 1992 sur le site de Compiègne sous licence IFP et est opérationnelle depuis 1993 [84]. Le procédé fonctionne en semi continu. Il s'agit d'une méthanolyse. Cette réaction, le traitement des eaux glycérolineuses et les étapes de lavage sont opérés en "Batch" tandis que toutes les étapes d'évaporations sont opérées en continu. La figure ci-dessous montre le schéma global pour ce procédé.

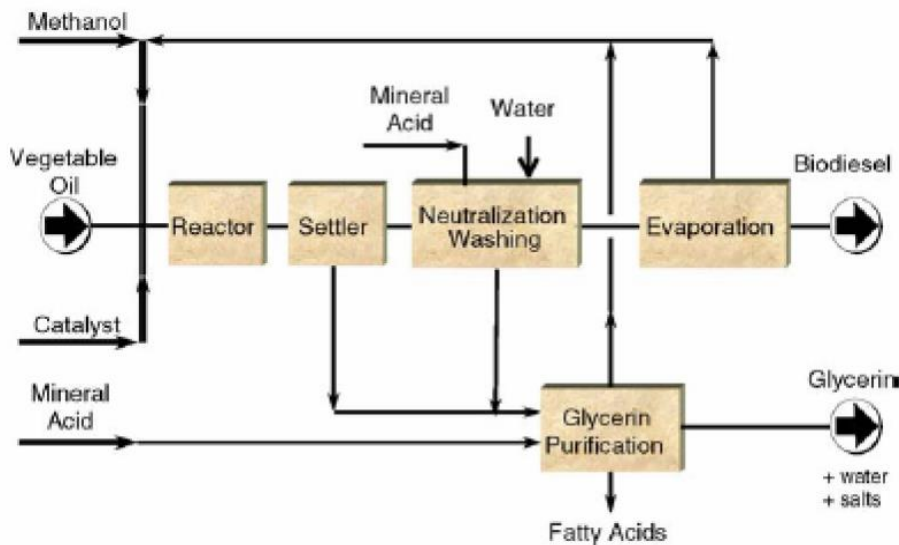


Figure V.2 : Schéma global pour une catalyse homogène continue  
Source : [18]

La phase ester est ensuite purifiée par des étapes de lavage s'effectuant à contre-courant. Il est possible d'y associer une étape d'élimination poussée des traces de sodium par un traitement sur résines échangeuses d'ions. L'ultime étape du procédé étant le séchage du biodiesel obtenu.

Les principaux poisons de cette réaction sont les acides libres contenus dans l'huile et la teneur en eau des charges (huile et méthanol). Ils ont comme impact direct une surconsommation de catalyseur. Les acides gras neutralisent immédiatement l'alcoolate. L'eau provoque dans un premier temps une hydrolyse de l'huile et libération de l'acide gras qui à son tour neutralise le catalyseur. Cette consommation de catalyseur se traduit par une formation de savons de sodium qui représentent la principale perte de rendement. Ces savons se retrouvent dans la glycérine et les eaux de lavage, puis après neutralisation de ces effluents par un acide minéral fort, ils sont transformés en acides gras.

Deux solutions s'offrent à nous pour les retransformer en esters, soit une estérification par le méthanol par catalyse acide, soit en réalisant une glycérolyse en utilisant une partie de la glycérine basique issue du procédé. Cette réaction qui n'utilise que des produits circulant dans le procédé a lieu à une température  $> 180^{\circ}\text{C}$ . En mélangeant dans des proportions adéquates les acides gras récupérés avec de la glycérine basique (les savons de sodium qu'elle contient jouant le rôle de catalyseur) et après élimination en continu de l'eau formée, on obtient un mélange de

mono, di et triglycérides qui peut être réintroduit dans le procédé pour y être de nouveau transestérifié et transformé en esters. Inclure ces traitements dans le procédé de méthanolyse est une solution pour obtenir des rendements approchant les 100%. [18]

#### V.3.2.4.1. Les avantages de ces procédés commerciaux en homogènes :

Ce procédé possède plusieurs avantages, telle que la vitesse de réaction très élevée (0.5-1% en poids de catalyseur donne un rendement de 94%-99% en ester pendant 1h), les conditions douces de température et de pression (70°C à pression atmosphérique) ainsi que le faible coût de catalyseur.

#### V.3.2.4.2. Les inconvénients de ces procédés commerciaux en homogène ::

Dans le cas de la catalyse basique, les principaux inconvénients résident dans l'émulsion et la formation de savon ce qui rend difficile la séparation des produits obtenus. Ce phénomène est d'autant plus prononcé que quand le taux d'acidité libre de l'huile utilisée est élevé. Cela nécessite des étapes de neutralisations et de lavages pour séparer les produits de la réaction.

Les hydroxydes ont par rapport aux alkoxydes l'inconvénient de donner une molécule d'eau, donc possibilité d'hydrolyser l'ester formé.

Dans le cas de la catalyse acide, une corrosion pourra avoir lieu. A noter la lenteur de cette catalyse par rapport à la catalyse basique. Notons que l'activité du catalyseur diminue avec l'augmentation de la longueur de la chaîne d'alcool en catalyse basique. D'autre part, le catalyseur n'est pas recyclable. [18]

#### V.3.2.4.2. Procédés industriels hétérogènes :

Le nouveau procédé hétérogène, mis au point par l'IFP, a démarré à Sète en mars 2006, puis à Perstorp en Suède en octobre 2007. Depuis, 6 autres unités ont été commandées de par le monde. Le catalyseur proposé par l'IFP est de l'Aluminate de zinc.

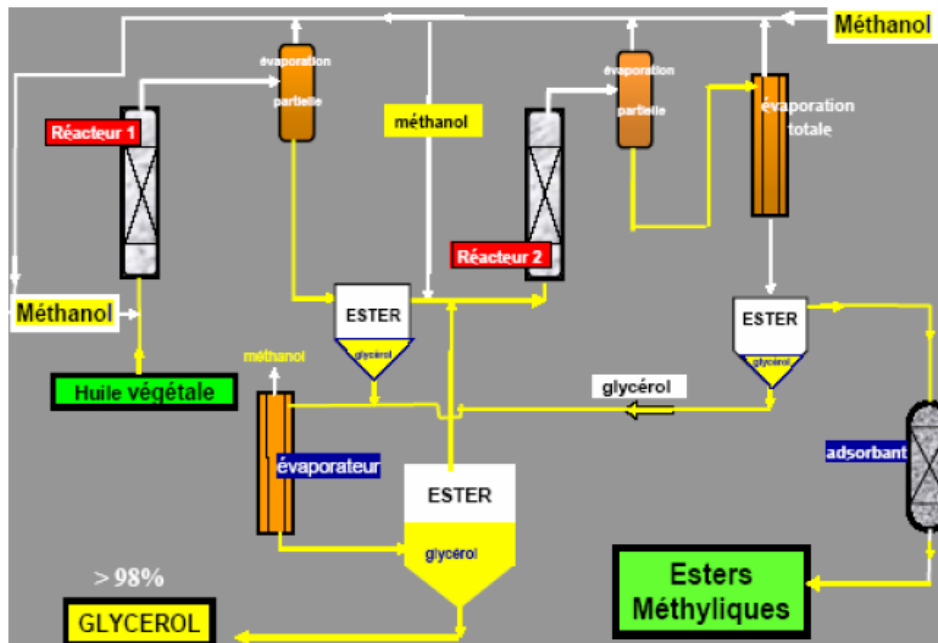


Figure V.3 : Schéma du procédé Esterfip Hétérogène

Source : [18]

## V.4. Évaluations économiques :

La production de biodiesel à partir d'huiles végétales a été largement étudiée ces dernières années. De nombreux chercheurs ont rapporté la production de biodiesel à partir de différentes matières premières (Demirbas, 2002, Freedman, 1986, Chisti et Yan, 2011, Montefrio et al., (2010)).

Tous ces auteurs ont conclu que le coût des matières premières joue un rôle important dans la détermination de la viabilité économique de la production de biodiesel. Demirbas et al. (2008) montrent que le coût des matières premières peut atteindre 80% du coût total de production de biodiesel. De même, Nelson et al. (1994) ont fait remarquer que les facteurs importants qui affectent le coût du biodiesel étaient le prix des matières premières, la taille de l'installation et la valeur du glycérol comme sous-produit. Le prix de l'huile de cuisson usagée (ou huiles de friture usagées) est de 2,5 à 3,0 fois moins cher que celui des huiles végétales vierges, ce qui réduit considérablement le coût total de production du biodiesel. Le coût de production du biodiesel à partir des huiles usées est non seulement inférieur à celui obtenu à partir des huiles vierges mais également inférieur à celui du diesel (au prix québécois). En effet, Kemp, (2006) illustre dans le Tableau ci-dessous le coût de production du biodiesel à partir d'huile alimentaire usée par rapport à celui des huiles vierges et du diesel. [17]

### V.4.1. Coût d'investissement :

Les coûts d'investissement vont varier typiquement de 0,19 à 1,04 \$ / litre de capacité de production annuelle. Ces coûts tendent à diminuer avec une augmentation de la capacité de production annuelle d'une usine.

### V.4.2. Coût opérationnel :

Le coût de production varie énormément en fonction du type de matière première (coût et qualité) utilisée et du prix de vente des sous-produits (tourteaux, glycérine). Une augmentation de 0.11\$/kg du prix du glycérol permettrait de réduire le prix du biodiesel de 0,01 \$ / kg.

*Coûts de production du biodiesel selon le type de matière première*

Matière première	Coût matière première (\$/litre)		Coût transformation (\$/litre)*		Coût production (\$/litre)**	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Huile alimentaire usée	0,150	0,726	0,05	0,29	0,20	1,02
Graisse animale	0,264	0,616	0,05	0,29	0,31	0,91
Huile de canola	0,597	1,246	0,05	0,29	0,65	1,54
Huile de soya	0,260	1,029	0,05	0,29	0,31	1,32
Combustible typique	Variation du prix de détail à Québec de 2004 à 2008 (\$/litre)				Min	Max
	Diesel***				0,81	1,39
Mazout léger***				0,61	1,26	

Tableau V.1 : Coût de production du biodiesel selon le type de matière première

Source : [17][19]

\* et \*\* Les coûts de production et de transformation excluent les coûts de distribution, les taxes, la marge de profit, les subventions à la production et à l'achat de B100. \*\*\* Guide statistique de l'énergie, 2008, Statistique Canada.

En plus des données du tableau précédent, toutes les études montrent que l'utilisation des huiles de cuisson (friture) usées est plus rentable que celle des huiles vierges. Néanmoins, il a été noté que la cuisson des huiles végétales, source des huiles usées, peut 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 et une augmentation des teneurs en acides gras libres. 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. [17]

### **V.5. Estimation de la production possible en Algérie :**

Si on prend comme référence une consommation moyenne de 12 litres d'huile par habitant par an, pour une population de 40 millions d'habitants, la consommation serait de 442 000 tonnes par an. En supposant que le tiers de cette quantité n'est pas consommé lors de la cuisson et que la moitié est récupérable, le potentiel d'huile végétale usagée est de 73 000 tonnes par an.

En supposant un rendement de 80%, la production de biodiesel par cette filière peut être de 58 400 tonnes de biodiesel.

### **V.6. Collecte des huiles usagées :**

L'une des étapes clés de la régénération d'huiles usagées est la collecte. Pour assurer une bonne collecte, la réglementation doit fixer de manière claire le rôle de chaque intervenant dans le processus de collecte et prévoir des sanctions sévères pour quiconque ne respecte pas la réglementation.

La réglementation doit stipuler que :

Les détenteurs doivent recueillir les huiles usagées et les stocker dans des conditions de séparation satisfaisantes, évitant notamment les mélanges avec de l'eau ou tout autre déchet non huileux.

Les détenteurs d'huiles usagées ont pour obligation de les remettre à un ramasseur d'huile agréé ou d'assurer eux-mêmes leur transport vers un centre agréé.

Les détenteurs d'huiles usagées doivent disposer d'installations étanches accessibles aux véhicules chargés d'en assurer le ramassage.

Les ramasseurs d'huiles usagées collectent gratuitement toutes quantités supérieures à 600 litres d'huile usagée, dans un délai maximum de 15 jours, et les acheminent vers un centre agréé.

La collecte des huiles usagées est gratuite uniquement pour les huiles qui n'ont pas été mélangées à d'autres déchets liquides (eau, solvants, hydrocarbures, huiles solubles, pyralène et autres produits contenant des PCB...).

La fourniture d'un bon d'enlèvement à chaque collecte à conserver en cas de contrôle.



### **Les collectes d'huiles usagées se font auprès de :**

- Restaurants
- Fast-food
- Hôtels
- Cantines scolaires et restaurants universitaires

### **V.7. Conclusion :**

La régénération des huiles de fritures usagées permet à la fois de diminuer la pollution et de diminuer le recours au gasoil traditionnel. Cependant la production de biodiesel par cette voie sera dans le meilleur des cas marginal, en effet la matière première n'est pas disponible en grande quantité. Cependant dans un monde où l'énergie se fera de plus en plus rare chaque calorie compte.

## Chapitre VI: Valorisation des huiles moteurs et industrielles usagées

### **VI.1. Introduction :**

Les huiles moteurs et industrielles usagées sont des sources de biocarburant qui ne posent pas le problème de concurrence avec la production alimentaire, de plus elles sont dangereuses pour l'environnement, leur récolte et valorisation permet donc d'atteindre un double objectif.

Les huiles usagées sont définies comme des huiles minérales ou synthétiques, inaptes, après usage, à l'emploi auquel elles étaient destinées. On distingue deux types d'huiles usagées :

- Les huiles noires qui comprennent les huiles moteurs (essence et gasoil) et les huiles industrielles (huiles de trempe, de laminage, de tréfilage)
- Les huiles claires provenant des transformateurs, des circuits hydrauliques et des turbines

### **VI.2. Dangerosité des huiles usagées pour l'homme et l'environnement :**

Les huiles usagées ne sont pas biodégradables, elles sont classées dans la catégorie des déchets spéciaux dangereux. Leur rejet dans la nature est strictement interdit. Elles peuvent engendrer une détérioration importante du milieu naturel, qui peut être traduit par une pollution de l'eau, du sol et de l'atmosphère : un litre d'huile usagée peut contaminer 1 million de litres d'eau;

Par ailleurs, bien que son pouvoir calorifique puisse être estimé à environ 90 % du fuel lourd, et fasse donc de l'huile un combustible intéressant, l'impact lié à sa combustion dans de mauvaises conditions peut également être important.

Les huiles de vidange contiennent de nombreux éléments toxiques tels que les métaux lourds (plomb, cadmium...).

La teneur en composés aromatiques peut entraîner, pour des températures de combustion trop faibles, la formation d'hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) dont le pouvoir cancérogène a été démontré.

La présence de chlore peut entraîner la formation de gaz chlorhydrique acide qui sera dégagé en totalité dans l'atmosphère s'il n'y a pas de neutralisation des fumées. Par ailleurs, le chlore est susceptible de former avec les composés aromatiques une multitude de composés parmi lesquels des PCB et des dioxines (surtout en présence de phénols).

La décomposition des phtalates à trop basse température conduit à la formation d'anhydride phtalique et d'HAP (éléments toxiques et mutagènes).

Leur aboutissement dans les stations d'épuration d'eau provoque une corrosion de l'appareillage.

Elles ne doivent pas être confondues avec les huiles solubles usagées et autres fluides aqueux d'usage, les huiles de friture d'origine végétale, les mélanges eaux-hydrocarbures pour lesquels les circuits de collecte et d'élimination sont complètement différents.

Les huiles usagées moteurs analysées à la sortie des carters contiennent un certain nombre de polluants issus de la dégradation des constituants d'origine des lubrifiants mais aussi au contact des huiles avec le carburant et les gaz d'échappement :

- des suies, des résines,
- des métaux lourds,
- des acides organiques provenant de l'oxydation partielle de l'huile,
- du chlore provenant de certains additifs de lubrification,
- des composés aromatiques parmi lesquels des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP),
- des phénols, des phtalates.

Les **huiles industrielles noires** usagées sont elles aussi très dégradées et leur contamination se rapproche de celle des huiles moteurs. Les huiles de trempage par exemple se chargent pendant leur utilisation de goudrons et de résines suite à l'oxydation importante du lubrifiant. Les **huiles industrielles claires** usagées sont peu contaminées. En effet, l'eau et les particules sont en général les responsables de l'usure du lubrifiant.[20]

Récupérer les huiles usagées est une nécessité pour protéger l'environnement et une obligation économique.

### VI.3. Potentiel d'huiles usagées en Algérie :

Au plan national, le marché est de l'ordre de 200.000 tonnes par an, se répartissant comme suit :

- Huiles moteurs 75%,
- Huiles industrielles (ateliers, entreprises industrielles) 19%
- Graisses et paraffines 3%
- Huiles aviation et marine 3%

Plusieurs activités sont susceptibles de produire des huiles usagées. On peut citer notamment :

- Les garages, concessionnaires, stations de vidange, stations-service ;
- Les transports (routiers, fluviaux, aériens, ferroviaires) ;
- Les usines, ateliers, entreprises industrielles ;
- Les entreprises traitant des déchets contenant des huiles usagées (cas de la démolition automobile, du traitement de filtres à huiles, d'emballages souillés par des huiles,...).

### VI.4. Les procédés de régénération :

#### VI.4.1. La collecte :

La collecte constitue la première étape du processus de régénération choisi. La sélection en amont favorise le recyclage. Meilleure sera cette sélection, meilleure sera la qualité du produit recyclé. Une collecte sélective des huiles usagées favorise la régénération parce que deux propriétés fondamentales sont, normalement, sauvegardées ; il s'agit du point de congélation et de l'indice de viscosité. L'avantage qui résulte de cette constatation est que les traitements sont alors applicables de manière quasi universelle.

### **VI.4.2. La régénération :**

La régénération consiste à retraiter les huiles usagées en vue de produire des huiles de base. Les huiles usagées ont généralement des propriétés très proches les unes des autres. Les propriétés de point de congélation et d'indice de viscosité étant alors conservées, il ne faut pas sous-estimer la présence de contaminants solubles chlorés, oxydés, dérivés d'additifs et d'impuretés en suspension comme des produits condensés riches en carbure métallique résultant de l'usure du moteur. Une régénération correcte devra prendre en compte ces différentes familles de produits en mettant en œuvre une cascade d'étapes :

#### **VI.4.2.1. Première étape :**

Cette étape est appliquée en tête de la plupart des chaînes de régénération. Elle consiste à effectuer une distillation douce de l'huile brute de manière à éliminer l'eau (2 à 4%), l'essence (1 à 2%), les solvants, le glycol et certains dérivés d'additifs.

#### **VI.4.2.2. Deuxième étape :**

Cette étape consiste en général à faire une purification de l'huile par précipitation des matières en suspension. Les traitements de purification physique les plus connus sont les suivants :

##### **VI.4.2.2.1. La distillation sous vide :**

Tant que l'acide sulfurique était largement utilisé comme étape majeure de la régénération, la distillation sous vide était pratiquée en fin de chaîne pour séparer l'huile régénérée en huile légère, moyenne, visqueuse en fond de colonne. La distillation sous vide poussé est devenue un moyen d'extraction maximale d'huile purifiée et ce, afin de minimiser la perte en huile visqueuse

##### **VI.4.2.2.2. La clarification au solvant (propane ou butane) :**

Ce procédé développé par L'IFP (Institut Français du Pétrole) implique un taux de solvant de 10 à 15%. Il est relativement coûteux mais performant et est particulièrement adapté aux fractions résiduelles venant de la distillation sous vide pour la récupération de l'huile visqueuse.

##### **VI.4.2.2.3. L'ultrafiltration :**

La technique de filtration tangentielle mise en œuvre en ultrafiltration est efficace mais coûteuse et d'application assez délicate. Coûteuse en énergie parce qu'elle nécessite une circulation élevée du milieu à filtrer (5 à 10 m/s sous 10 bars sur membranes minérales). Un prétraitement spécifique de l'huile est nécessaire pour ne pas colmater rapidement les membranes.

##### **VI.4.2.2.4. L'ultrafiltration :**

Un certain nombre de procédés peu répandus font appel à des agents destabilisants généralement en phase aqueuse et nécessitent souvent plusieurs extractions. Certaines sociétés

revendiquent l'action d'agents alcalins puissants introduits en amont et entraînant la séparation des contaminants par distillation sous vide poussé ou par centrifugation.

### **VI.4.2.3. Troisième étape:**

L'huile purifiée par l'un des traitements précédents doit généralement subir un traitement de raffinage ayant pour but d'éliminer les produits résiduels solubles, oxydés et/ou azotés éventuellement dérivés d'additifs. L'objectif est d'obtenir toutes les propriétés d'une huile de base vierge (couleur, indice d'acide, carbone conradson...). Cette étape peut être obtenue par l'un des traitements suivants :

Lorsqu'une distillation sous vide est installée en amont, les distillats peuvent être traités :

- Soit avec 2 à 3% d'acide et 3% de terre,
- Soit avec la terre seulement (8 à 10%) mais le raffinage est légèrement inférieur au précédent.

Lorsque la distillation sous vide n'est pas appliquée en amont, l'huile globale purifiée par les autres traitements décrits précédemment peut demander :

- Soit 4 à 5% d'acide plus 3% de terre environ.
- Soit une quantité massive de terre, soit une hydrogénation catalytique un peu plus sévère que dans le cas précédent.

L'huile régénérée moteur peut être mélangée à hauteur de 5% à du gasoil sans perturber de façon notable les propriétés du gasoil. [21]

### **VI.5. Estimation de la production possible en Algérie :**

Au plan national, le marché est de l'ordre de 200.000 tonnes.

En Algérie, la quantité moyenne des huiles usagées récupérées par NAFTAL est de 12 000 tonnes par an, ce qui représente 8% de la quantité des huiles usagées générées sur la vente de NAFTAL.

En supposant que le taux de récupération attendrait 80% (comme c'est le cas en France, par exemple) si un programme de collecte était mis en place, la quantité d'huile usagée disponible pour régénération serait de 160 000 tonnes par an. En supposant un taux de régénération de 50% pour incorporation à 5 % dans du gasoil, la quantité annuelle serait de 80 000 tonnes.

### **VI.6. Autres valorisations possibles :**

Les huiles usagées peuvent suivre d'autres filières de valorisation :

La valorisation énergétique consiste à utiliser l'huile usagée, éventuellement prés-traitée comme combustible dans les cimenteries et les chauffours. Le pouvoir calorifique d'une huiles usagée est en effet à peu près équivalent à celui d'un combustible traditionnel ;

Le recyclage est une forme de valorisation en raffinerie qui consiste à injecter une partie d'huiles usagées (prétraitées) dans le résidu atmosphérique afin qu'elles soient soutirées avec les distillats sous vide du brut ; [21]

### **VI.7. Collecte des huiles usagées :**

L'une des étapes clé de la régénération d'huiles usagées est la collecte. Pour assurer une bonne collecte, la réglementation doit fixer de manière claire le rôle de chaque intervenant dans le processus de collecte et prévoir des sanctions sévère pour quiconque ne respecte pas la réglementation.

La réglementation doit stipulée que :

Les détenteurs doivent recueillir les huiles usagées provenant de leurs installations et les stocker dans des conditions de séparation satisfaisantes, évitant notamment les mélanges avec de l'eau ou tout autre déchet non huileux.

Tout détenteur d'huiles usagées a pour obligation de les remettre à un ramasseur d'huile agréé ou d'assurer lui-même leur transport vers un centre agréé.

Les détenteurs d'huiles usagées doivent disposer d'installations étanches accessibles aux véhicules chargés d'en assurer le ramassage.

Les ramasseurs d'huiles usagées collectent gratuitement toutes quantités supérieures à 600 litres d'huile usagées, dans un délai maximum de 15 jours, et les acheminent vers un centre d'élimination agréé.

La collecte des huiles usagées est gratuite uniquement pour les huiles qui n'ont pas été mélangées à d'autres déchets liquides (eau, solvants, hydrocarbures, huiles solubles, huiles de friture, pyralène et autres produits contenant des PCB...).

La fourniture d'un bon d'enlèvement à chaque collecte à conserver en cas de contrôle.

#### **Les collectes d'huiles usagées se font auprès de :**

- Garages, concessionnaires, stations de vidange, stations-services.
- Sociétés de transports routiers, fluviaux, aériens, ferroviaires, de personnes et de marchandises.
- Usines, ateliers, entreprises industrielles.
- Professionnels du secteur agricole et garages spécialisés dans le machinisme agricole.
- Collectivités et services de travaux publics.
- Déchèteries disposant de conteneurs à huiles usagées destinés aux particuliers.
- Services de l'Armée et de la gendarmerie.
- Entreprises traitant des déchets renfermant de l'huile usagée (ex : démolition automobile, traitement de filtres à huiles).

## **VI.8. Conclusion :**

Comme pour les huiles végétales usagées, la régénération des huiles moteurs et industrielles usagées permet d'atteindre un double objectif : réduire la pollution et économiser les réserves de pétrole. Mais là aussi les quantités de gasoil économisées sont limitées, cependant dans un monde où l'énergie se fera de plus en plus rare chaque calorie compte.

## Chapitre VII: Voitures électriques et hybrides

### **VII.1. Définitions:**

Le terme « voiture électrique » recouvre actuellement plusieurs concepts qui ont en commun de recourir à un moteur électrique **pour tout ou partie de leur propulsion**.

### **VII.2. Comparaison des capacités d'un véhicule thermique et d'un véhicule électrique :**

#### **VII.2.1. Problème d'autonomie :**

Dans les véhicules thermiques, les moteurs actuels les plus performants ont des rendements énergétiques qui ne dépassent pas 20 %. Dans un plein de 60 litres d'essence, l'énergie de 12 litres va être transmise aux roues et 48 litres seront dissipés en chaleur.

L'utilisation de la motorisation électrique permet de réduire considérablement les pertes énergétiques.

De première vue de très grandes économies d'énergies peuvent être réalisées en utilisant des moteurs éclectiques cependant même si les véhicules à moteur thermique ont de très faibles rendements, le carburant utilisé essence ou gasoil compense ces faibles rendements par de très grandes autonomies.

En effet, la densité énergétique massique de l'essence ou du diesel est très importante, de l'ordre de 12 kWh/kg, permettant aux voitures actuelles de disposer d'autonomies considérables, proches de 1000 km pour 60 litres (50 kg de diesel) couramment stockés dans leurs réservoirs.

Dans les voitures électriques, la problématique est l'inverse. Le moteur électrique a un rendement énergétique proche de 80 %, presque 4 fois celui d'un moteur thermique. Par contre, les meilleures batteries actuelles stockent difficilement plus de 120 Wh/kg, près de 100 fois moins que les hydrocarbures.

Au global, l'énergie électrique stockable dans 1 250 kg de batteries serait nécessaire pour parcourir la même distance qu'avec 50 kg d'essence (60 litres), soit environ 1 000 km.

#### **VII.2.2. Origine de l'électricité et du rendement global :**

Pris tout seul le moteur électrique affiche un rendement très intéressant de l'ordre de 80 %, mais il ne faut pas tomber dans le piège, car l'électricité utilisée pour l'alimentation de moteur peut provenir de plusieurs sources, et le problème demeure de l'origine de cette électricité, car une électricité d'origine fossile affecte le rendement global de moteur électrique et il peut avoir des valeurs très proches de celle des moteurs thermiques.



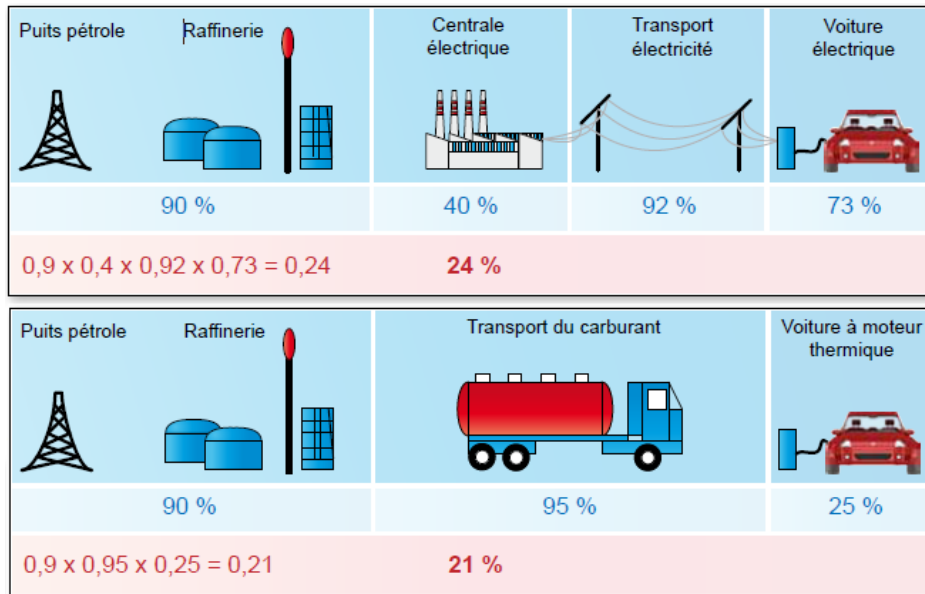


Figure VII.1 : Comparaison de rendement du moteur thermique et électrique  
Source : [22]

L'utilisation de véhicules électriques n'apporte de gains importants que si l'énergie utilisée à la production de l'électricité est faible en CO<sub>2</sub>, ce qui est le cas dans certains pays où l'électricité provient majoritairement d'origine renouvelable comme la Norvège (97 % d'électricité provient des énergies hydrauliques).

Par contre l'utilisation des sources fossile pour la production d'électricité destinée à l'utilisation en voitures électriques affecte gravement le bilan carbone et dans certains cas les voitures électriques deviennent plus polluantes que la voiture classique ; La figure suivante montre la relation entre la quantité réellement émise par une voiture électrique et la source d'électricité utilisée.

Donc, en dehors des pays qui ont choisi une énergie électrique décarbonée, nucléaire ou hydroélectrique, rouler « électrique » ne réduit pas de façon significative les rejets de CO<sub>2</sub>.

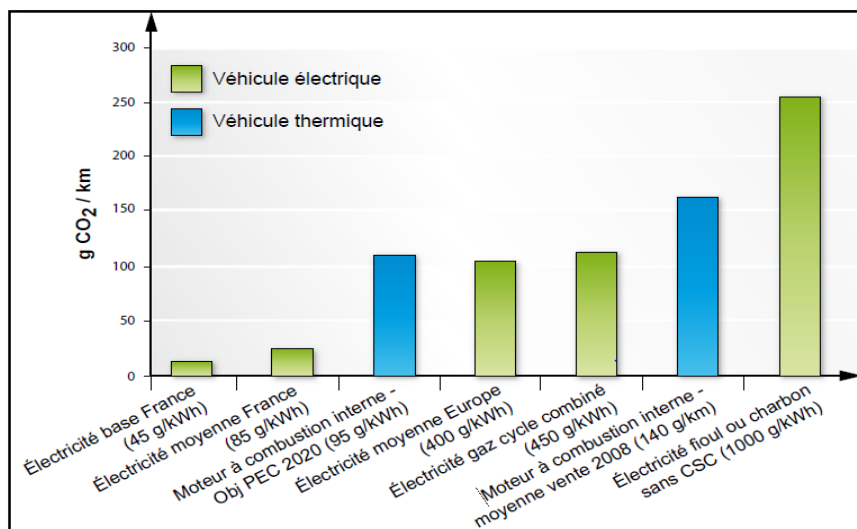


Figure VII.2 : Émissions de CO<sub>2</sub>, du puits à la roue, des véhicules électriques et thermiques  
Source : [22]

### VII.2.3. Le coût d'une voiture électrique :

Le coût trop élevé des batteries performantes est actuellement un frein au développement des véhicules électriques à grande échelle. Le surcoût à l'achat peut être partiellement compensé par les économies à l'usage du véhicule (maintenance ou carburant). La figure suivante montre qu'à l'horizon 2020, grâce aux avancées techniques surtout dans le domaine de production des batteries, va surement influencer les coûts de possession des voitures électriques, on assistera à une diminution des prix des batteries et par conséquent le véhicule électrique deviendra compétitifs d'un point de vue économique.

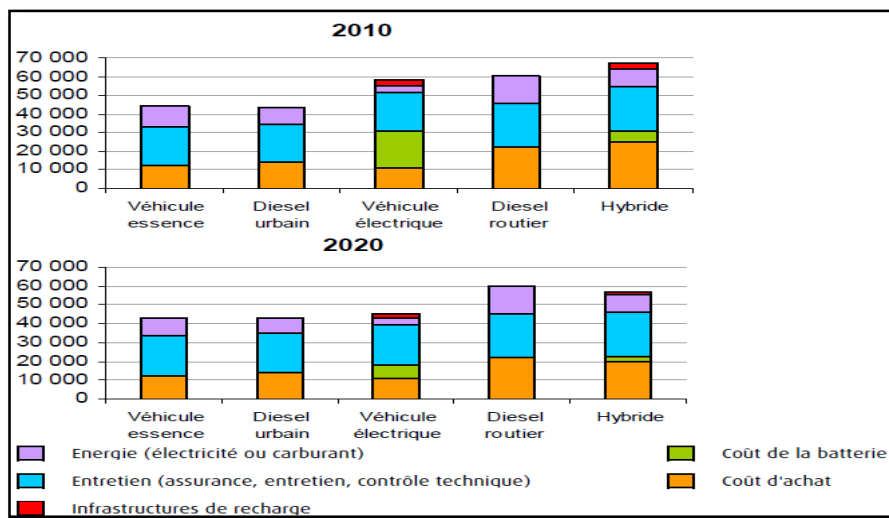


Figure VII.3 : Coût de possession du véhicule intégrant le coût des infrastructures  
Source : [23]

### VII.3. Application en Algérie et conclusion :

Le coût encore élevé de la voiture électrique et sa faible autonomie font qu'elle n'est pas encore attractive. En effet pour introduire ce type de véhicules à grande échelle, de lourdes subventions doivent être mises en place, ce qui dans le cas actuel s'avère difficile. Cependant, le coût de la voiture électrique est amené à diminuer avec les avancées technologiques dans ce domaine.

Parmi les avancées technologiques les plus récentes dans ce domaine, on note la batterie « PowerWall » de Tesla Motors. En effet, cette batterie peut révolutionner le monde des voitures électriques. Bien qu'elle est construite pour des usages domestiques, mais la technologie est là et peut être exploitée. Ajouter à cela, le prix inattendu de cette batterie, avant la présentation du produit les prévisions espéraient une fourchette allant de 6000 à 8000 \$, mais le prix annoncé par le constructeur était surprenant, PowerWall sera vendu à environ 3000 \$. Cette innovation peut contribuer à éliminer l'un des soucis majeurs de la voiture électrique à savoir son coût de la batterie ;

L'Algérie doit suivre de près l'évolution du marché mondial des voitures électriques et envisager son introduction lorsque la technologie sera plus mature.

## Conclusion générale

Cette étude non exhaustive montre les alternatives possibles aux carburants classiques, essence et gasoil, dont la source de production, le pétrole, est sur le déclin.

Parmi les carburants alternatifs étudiés, le GPLc se positionne comme le carburant le plus prometteur et le plus simple à mettre en place. Cependant l'augmentation du prix de l'essence et du gasoil est la condition sine qua non pour généraliser ce carburant, qui est disponible en Algérie et qui est beaucoup moins polluant que le gasoil et l'essence.

Un autre carburant qui peut se substituer, notamment au gasoil, est le GNC. En effet le fait de l'inexistence actuelle de stations de ravitaillements de GNC, rend l'utilisation de ce carburant difficile pour les voitures particulières à court et moyen terme, par contre l'utilisation du GNC pour les flottes captives (d'autobus, d'autocars, de bennes à ordures ...) est toute à fait possible.

Les biocarburants de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> générations, par leur caractère renouvelable et durable, se positionnent clairement pour faire partie des carburants de l'après-pétrole. L'Algérie doit se lancer dans ce secteur pour acquérir l'expérience nécessaire pour maîtriser cette industrie. La production de biodiesel au lieu de bioéthanol doit être privilégiée pour diminuer la consommation importante de gasoil.

Le biogaz issu des déchets et biodiesel issu des huiles usagées permet d'atteindre un double objectif : réduire la pollution et économiser les réserves de pétrole.

Mais il ne faut pas oublier que le premier gisement d'énergie en Algérie est les économies d'énergies.

La situation actuelle n'est pas une fatalité, l'Algérie a de nombreuses potentialités. Mais une politique résolue doit être mise en œuvre pour exploiter et développer les autres sources de carburant.

## Références

- [1] <http://www.cfbp.fr/proprietes-des-gpl/caracteristiques-generales-et-physico-chimiques-n305>
- [2] R. TILAGONE, B. LECOINTE, 10 janv. 2015, Gaz naturel - Carburant pour véhicule BM2592, techniques de l'ingénieur, Paris.
- [3] Bilan énergétique nationale, 2013, ministère de l'énergie et des mines.
- [4] <http://www.naftal.dz/fr/index.php/archives/10866>
- [5] : R.BENBRAHIM, A.RAHMANI, juin 2013, Evaluation du Potentiel de Biomasse en Algérie, projet fin d'étude, ENP.
- [6] <http://www.parlonsbonsai.com/Quercus-suber.html>
- [7] O. Zandouche, 2011, Conservation de la biodiversité dans la subéraie. Rapport INRF.
- [8] A.ALOUACHE, Mars 2012, étude de matières premières locales non alimentaires pour la production de biocarburants, magister en énergies renouvelables, école nationale polytechnique, Alger
- [9] M.Amouri, Mars 2012, Evaluation du potentiel des espèces végétales régionales pour la production du biodiesel, magister en énergies renouvelables, école nationale polytechnique, Alger
- [10] M. L. Price, LE MORINGA, Publié en 1985; Révision 2000, 2002 et 2007 par le personnel d'ECHO, page 15-17.
- [11] R. Rayane. Production de pomme de terre en Algérie, algerie-dz.com D'après la Tribune. [www.latribune.dz](http://www.latribune.dz)
- [12] A. Boulal , B. Benali, M. Moulai et A. Touzi, 25 Septembre 2010, Transformation des déchets de dattes de la région d'Adrar en bioéthanol Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS, Adrar, Algérie
- [13] <http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/>
- [14] État des lieux et potentiel du biométhane carburant, Étude ADEME, Novembre 2008
- [15] E. POITRAT, 2009, Biocarburants be 8550, techniques de l'ingénieur, Paris.
- [16] B. Achimi, Décembre 2011, Les avantages de la méthanisation pour l'économie et les territoires, Association Technique Energie Environnement (ATEE),
- [17] J. GORNAY, 2006, Transformation par voie thermique de triglycérides et d'acides gras. Application à la valorisation chimique des déchets lipidiques, Institut National Polytechnique de Lorraine.

[18] B. Hamad, Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique, Université Claude Bernard Lyon 1.

[19] W. Kemp, 2006, Biodiesel Basics and Beyond et Hewitt, 2008, A Hedging Exercise in Biodiesel, Biodiesel Magazine, septembre 2008.

[20] [http://www.huiles-usagees.fr/visitor\\_page\\_reglementation\\_donnees\\_techniques.html](http://www.huiles-usagees.fr/visitor_page_reglementation_donnees_techniques.html)

[21] F. MOHELLEBI sous la direction du Pr C.E. CHITOUR, 2001, Analyse et régénération des huiles usagées, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique.

[22] M. Wastraete, 2011, Véhicules électriques et hybrides, ANFA.

[23] F. Maurel, Mai 2011 n°41, Les véhicules électriques en perspective Analyse coûts-avantages et demande potentielle Commissariat général au développement durable, Paris.

### **Activités du Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles dirigé par le Professeur Chems Eddine CHITOUR, dans le domaine de l'énergie :**

-Le futur d'un monde sans pétrole : les opportunités pour l'Algérie : acte de la 15e journée de l'énergie sous la direction de Pr C-E. CHITOUR

-Conférence du Pr CHITOUR à la 19e journée : Comment je vois la transition énergétique vers le Développement Durable

-C.E.CHITOUR, 13/06/2011, Quand un plein de voiture peut nourrir un africain pendant un an : L'anomie du monde

<http://commentjevoislemonde.blogs.nouvelobs.com/archive/2011/06/13/quand-un-plein-de-voiture-peut-nourrir-un-africain-pendant-u.html>

-C.E.CHITOUR, 04/02/2013, AUTOMOBILE L'addiction Est-elle irréversible ?

<http://commentjevoislemonde.blogs.nouvelobs.com/archive/2013/02/04/automobile-l-addiction-est-elle-irreversible.html>

-C.E.CHITOUR, 25 janvier 2010, Biocarburants ou nérocarburants ?

<http://meteopolitique.com/Fiches/ecologie/22/a022.htm>

-18e Journée de l'Energie : Une nécessaire transition énergétique pour garantir le développement durable, Avril 2014

-19e Journée de l'Energie : Les ressources pétrolières au service du développement durable de l'Algérie, Avril 2015