

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CHIMIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme  
D'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique**

**Thème**

**Evaluation de la consommation des carburants dans le  
secteur des transports en Algérie à l'horizon 2030**

**Proposé par :**  
Pr.CE.CHITOUR

**Etudié par :**  
M<sup>lle</sup> Amina KAHLI  
M<sup>lle</sup> Nesrine ZAIT

Soutenu le 30 Juin 2010 devant le jury composé de :

Pr E.H BENYOUSSEF	Professeur à ENP	Président
Pr C.E. CHITOUR	Professeur ENP	Rapporteur
Dr A.MEFTI	Docteur à ENP	Examinatrice
Dr N.SKANDER	Docteur en génie chimique	Examinatrice

**Promotion : juin 2010**

## Remerciements

*Nous remercions en premier lieu « Dieu » LE Tous Puissant, de nous avoir donné le courage d'aller jusqu'au bout de ce travail.*

*Ce mémoire est le résultat d'un effort qui n'aurait pu aboutir sans la contribution d'un nombre de personnes. Ainsi se présente l'occasion de les remercier.*

*Tout d'abord,*

*Nous exprimons notre reconnaissance à notre promoteur le professeur **CHEMS EDDINE CHITOUR**, qui nous a suivi, et nous a orienté tout au long de ce travail.*

*Nous remercions le professeur **El-Hadi .BENYOUSSEF** pour l'honneur qu'il nous fait en présidant notre jury et les membres du jury les docteurs **Afia.MEFTI** et **Nachida.SKANDER** pour avoir bien voulu accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions également Messieurs **SAID AKTRECHE** PDG de l'entreprise **NAFTAL** et **RABAH ALOUANI** Directeur à l'ARH de bien vouloir assister à notre soutenance.*

*Nos remerciements les plus sincères sont adressés à nos enseignants, qui ont contribué durant nos études à l'Ecole Nationale Polytechnique, et spécialement les enseignants du département génie chimique.*

*Nos sincères remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.*



## Dédicace

*Je dédie ce mémorable travail :*

*Aux personnes les plus chères à mon cœur, mes parents, que dieu me  
les garde.*

*A ma sœur **Houda** qui m'a toujours soutenue et encouragée, à ma  
petite sœur Sana, et mes deux frères : Fouzi et Omar, je leurs  
souhaite que du bonheur dans cette vie, ainsi qu'à toute ma famille.*

*A mes cousines : Yasmine et Sihem que j'aime beaucoup.*

*A mes amies qui ont été toujours là pour moi en particulier :*

*Wahiba, Sara et Soumia.*

*Asma, Malika, Kafra, Soumia et Samah.*

*A mon Binôme et Amie Amina.*

*A toute ma promotion d'ingénieurs en Génie chimique.*

*2009 / 2010*

*A tous ceux qui m'aiment*

*Nesrine*



# *Dédicace*

*Je dédie ce mémorable travail :*

*Aux personnes les plus chères à mon cœur, mes parents, que dieu  
me les garde.*

*A mes frères et sœurs.*

*A toute ma famille.*

*A mes amies.*

*A mon Binôme et Amie Nesrine.*

*A toute ma promotion d'ingénieurs en Génie chimique  
2009/2010*

*Amina*



## ملخص تقييم استهلاك الوقود بقطاع النقل في الجزائر عام 2030

الطلب المتزايد على المنتجات النفطية التي تستخدم في المقام الأول في مجال النقل بالجزائر ، وتأثيره المتزايد على البيئة يؤدي بنا إلى التساؤل كيف سيكون مستقبل الطاقة في عام 2030 . الهدف من هذه الدراسة هو اقتراح عدة نماذج للتنبؤ بالاستهلاك الوطني للوقود في مجال النقل البري.

في النهاية سوف نقترح عدة حلول تهدف إلى استهلاك أقل و أحسن ولا سيما من خلال المساهمة في اقتصاد الموارد الطاقوية ، وحماية البيئة من خلال استخدام مصادر بديلة للطاقة م ثل غاز البترول المميع الذي ينتج كمية قليلة من غاز الكربون . و أخيرا تشجيع النقل الجماعي.

**الكلمات المفتاحية :** الطاقة ، النقل البري ، الوقود ، المحركات ، الوقود الحيوي ، النموذج ، التنبؤ ، الحلول البديلة ، غاز البترول المميع. غاز الكربون.

### **Résumé Evaluation de la consommation des carburants dans le secteur des transports en Algérie à l'horizon 2030**

La demande de plus en plus importante en produits pétroliers utilisés essentiellement dans le secteur transport en Algérie, et son impact grandissant sur l'environnement nous amènent à se demander comment sera l'avenir énergétique en 2030.

L'objet de cette étude est de proposer des modèles prédictifs de la consommation nationale de carburants dans les transports routiers. La finalité étant de proposer des solutions visant à consommer moins en consommant mieux notamment en contribuant à donner un sursis à nos réserves, à protéger l'environnement par l'utilisation d'autres vecteurs énergétiques à faibles émissions de CO<sub>2</sub> comme le GPLc et enfin par l'appel à l'organisation des modes de transport collectifs.

**Mots clefs :** Energie, transport routier, carburants, moteurs, biocarburants, modélisation, prévision, solutions alternatives, GPLc.CO<sub>2</sub>

### **Abstract Evaluation of the consumption of fuels in the transport sector in Algeria in 2030**

The demand more and more important in the petroleum products used primarily in the transport sector in Algeria, and its growing impact on the environment lead us to ask how will be the future of our energy in 2030.

The purpose of this study is to propose models that predict domestic consumption of fuels in road transport. Then we will propose solutions to consume less and consume more particularly by helping to provide relief to our reserves, protect the environment through the use of alternative energy sources with low CO<sub>2</sub> emissions as LPG and finally call for the organization of collective modes.

**Keywords:** Energy, road transport, fuels, engines, biofuels, modeling, forecasting, alternatives, LPG , CO<sub>2</sub> .

## Listes des figures

**Figure 1:** Répartition de l'offre mondiale en énergie primaire en 1971-2007

**Figure 2:** Répartition de la consommation d'énergie finale dans le secteur transport selon la source d'énergie

**Figure 3 :** Evolution de la consommation d'énergie finale du secteur transport dans le monde.

**Figure 4 :** Evolution de la consommation d'énergie finale du transport routier dans le monde.

**Figure 5 :** Répartition de la consommation énergétique mondiale selon le mode de transport 2005.

**Figure 6 :** Répartition de la consommation mondiale d'énergie dans le secteur transport routier selon le type de carburant utilisé en 2007.

**Figure 7 :** Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> par secteur dans le monde en 2007.

**Figure 8 :** Evolution du parc automobile mondial.

**Figure 9:** Répartition de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité en 2007

**Figure 10 :** Evolution du parc automobile national.

**Figure 11:** Répartition du parc automobile national par genre de véhicule en 2008.

**Figure 12 :** Répartition du parc automobile national selon les tranches d'âges des véhicules.

**Figure 13 :** Evolution du parc automobile national par marque.

**Figure 14 :** Répartition du parc automobile et la population par wilaya en 2008.

**Figure 15:** Evolution de la consommation nationale d'essence, Gazole et GPL<sub>c</sub> dans le transport routier.

**Figure 16:** Prévision de l'évolution de la population à l'horizon 2030 selon le scénario fil de l'eau.

**Figure 17:** Prévision de l'évolution du parc automobile en Algérie à l'horizon 2030 selon le scénario fil de l'eau.

**Figure 18:** Prévision de l'évolution de la consommation des carburants routiers à l'horizon 2030 selon le scénario fil de l'eau.

**Figure 19 :** Prévision de l'évolution du parc automobile diesel à l'horizon 2030.

**Figure 20 :** Prévion de l'évolution du rapport des prix « essence/diesel » à l'horizon 2030.

**Figure 21 :** Prévion de l'évolution de la consommation du gazole à l'horizon 2030.

**Figure 22 :** Prévion de l'évolution du taux de croissance du parc à l'horizon 2030.

**Figure 23 :** Prévion de l'évolution de la population à l'horizon 2030.

**Figure 24 :** Prévion de l'évolution du prix de l'essence à l'horizon 2030.

**Figure 25 :** Prévion de l'évolution de la consommation du GPLc à l'horizon 2030.

**Figure 26:** Filières de production des biocarburants (source : IFP).

**Figure 27:** Interface interactive pour la comparaison entre les différents modes de transport.

**Figure 28 :** Prévion de la consommation du gazole selon le scénario 22%GPLc sur une période de 22 ans [2009-2030]

## **Liste des tableaux**

**Tableau 1 :** 1<sup>ère</sup> étape de régression pas à pas pour le gazole.

**Tableau 2 :** 2<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas pour le gazole.

**Tableau 3 :** 3<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas pour gazole.

**Tableau 4 :** 1<sup>ère</sup> étape de régression pas à pas pour le GPLc.

**Tableau 5 :** 2<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas pour le GPLc.

**Tableau 5 :** 3<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas pour le GPLc.

**Tableau 6 :** 4<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas pour le GPLc.

## **Abréviations**

MTEp : millions de tonnes équivalent pétrole.

TEP: tonne équivalente pétrole.

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques.

AIE : Agence internationale de l'énergie.

GPL : Gaz de pétrole liquéfié.

GPL<sub>c</sub> : Gaz de pétrole liquéfié carburant.

GNV : Gaz naturel pour véhicule.

FCC: Fluid catalytic cracking.

PCI : Pouvoir calorifique inférieur.

PCS : Pouvoir calorifique supérieur.

CSE : Consommation spécifique.

PMH : Point mort haut.

PMB : Point mort bas.

EMVH : Ester méthylique d'huile végétale.

GES : Gaz à effet de serre.

PAC : Pile à combustible.

PEM : proton exchange proton.

## Sommaire

### Introduction générale

### CHAPITRE I : Bilan énergétique.

<b>I) BILAN ENERGETIQUE MONDIAL.....</b>	<b>1</b>
I.1) INTRODUCTION .....	1
I.2) LES DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE.....	2
I.2.1) Energies non renouvelables .....	2
I.2.2) Energies renouvelables .....	3
I.2.3) Comparaison entre la densité énergétique de quelques sources d'énergie.....	3
I.3) OFFRE ENERGETIQUE DANS LE MONDE.....	4
I.4) L'ENERGIE DANS LE SECTEUR TRANSPORT .....	4
I.5) EMISSIONS DE CO <sub>2</sub> DANS LE MONDE PAR SECTEUR.....	7
I.6) PARC AUTOMOBILE MONDIAL.....	8
I.7) CONCLUSION.....	9
<b>II) BILAN ENERGETIQUE EN ALGERIE .....</b>	<b>10</b>
II.1) LES DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE.....	10
II.1.1) Les énergies fossiles.....	10
II.1.2) Les énergies renouvelables .....	10
II.2) L'ENERGIE DANS LE SECTEUR DE TRANSPORT .....	11
II.2.1) Parc automobile .....	12
II.2.2) La consommation nationale des carburants dans le transport .....	14
II.3) CONCLUSION .....	16

### CHAPITRE II : Les carburants et les moteurs.

<b>I) CARBURANTS CONVENTIONNELS.....</b>	<b>17</b>
I.1) QU'EST CE QU'UN CARBURANT ?.....	17
I.2) PRODUCTION DES CARBURANTS CONVENTIONNELS PAR RAFFINAGE DU PETROLE .....	17
I.3) COMBUSTION DES CARBURANTS .....	17
I.4) COMPARAISON ENTRE LES PROPRIETES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DES CARBURANTS ROUTIERS (ESSENCE ; GAZOLE ; GPLC).....	22
<b>II) MOTEURS CONVENTIONNELS .....</b>	<b>22</b>
II.1) FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR A ESSENCE (ALLUMAGE COMMANDE) .....	22

II.2) FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR DIESEL.....	23
II.3) LES QUATRE TEMPS D'UN MOTEUR A COMBUSTION .....	24
II.4) RENDEMENT EFFECTIF D'UN MOTEUR .....	24
<b>III) CONCLUSION.....</b>	<b>26</b>

### **CHAPITRE III : Modélisation et prévision de la consommation des carburants routiers en Algérie à l'horizon 2030**

<b>I) INTRODUCTION.....</b>	<b>27</b>
<b>II) SCENARIO FIL DE L'EAU .....</b>	<b>27</b>
<b>III) MODELISATION PAR LA METHODE DES REGRESSIONS MULTIPLES .....</b>	<b>29</b>
III.1) PRESENTATION DU MODELE.....	29
III.2) MODELISATION DE LA CONSOMMATION DU GAZOLE.....	30
III.3) MODELISATION DE LA CONSOMMATION DU GPLC A L'HORIZON 2030 .....	37
<b>IV) PREVISION.....</b>	<b>40</b>
IV.1 ) CHOIX D'UNE METHODE DE PREVISION .....	41
IV.2 ) CALCULS DES PREVISIONS .....	41
IV.2.1 ) Prévision de la consommation du gazole à l'horizon 2030 .....	42
IV.2.2) Prévision de la consommation du GPLc à l'horizon 2030.....	46
<b>V) CONCLUSION.....</b>	<b>49</b>

### **CHAPITRE IV : Solutions Alternatives pour le secteur des transports routiers**

<b>I) PROBLEMATIQUE .....</b>	<b>51</b>
<b>II) SOLUTION.....</b>	<b>51</b>
II.1) LES BIOCARBURANTS .....	51
II.1.1) Filières de production des biocarburants .....	52
II.1.2) Avantages et inconvénients.....	53
II.2) L'HYDROGENE.....	54
II.2.1) Combustion de l'hydrogène .....	54
II.2.2) Filières de production de l'hydrogène .....	54
II.2.3) Problèmes liés à l'utilisation de l'hydrogène .....	56
II.3) LA VOITURE HYBRIDE .....	56
II.4) VEHICULE ELECTRIQUE .....	58
II.5) VEHICULE A HYDROGENE .....	59

II.5.1) La pile à combustible .....	59
II.6) VOITURE GPL <sub>c</sub> .....	61
II.7) COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS MODES DE TRANSPORT ROUTIERS EN ALGERIE .....	61
<b>III) QUEL EST LA MEILLEURE SOLUTION POUR L'ALGERIE ? .....</b>	<b>65</b>
<b>IV) CONCLUSION.....</b>	<b>68</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>69</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>78</b>

## Introduction générale

Depuis toujours ; l'énergie est au cœur de notre monde, elle constitue un enjeu vital pour les individus et les sociétés humaines. Les comportements humains sont fortement induits par sa disponibilité, son abondance ou sa pénurie.

Néanmoins, la consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter depuis la révolution industrielle, notamment dans le secteur transport, qui représente environ un tiers de la consommation énergétique finale, avec un taux de dépendance de 97 % vis à vis des produits pétroliers .Cela devient inquiétant, et sa nuisance grandissante à l'environnement rend nécessaire de reconsidérer nos ressources en faisant appel à des technologies propres et moins énergivores en carburants pétroliers. L'objectif étant de combiner la diminution de la dépendance au pétrole et la réduction de l'impact environnemental entre autre en termes de rejets de gaz à effet de serre.

Quel monde de l'énergie aurons-nous en 2030 ? Quels types d'énergie allons-nous consommer ? Dans quelle mesure devons-nous modifier notre consommation d'énergie dans le secteur transport? Et si nous ne faisons rien quel sera le coût et l'impact sur notre climat ? Ces questions sont sujettes.

Au terme de ce travail, nous allons faire un état des lieux sur la consommation des carburants en Algérie, nous avons ainsi développé une application interactive sous l'environnement de travail « MATLAB » , dans le but d'établir une comparaison entre les différents modes de transport en terme de consommation de carburant ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> .Nous allons également définir les facteurs influents sur ladite consommation , dans le but de la modéliser ,et enfin faire un pronostic pour agir avant qu'il soit trop tard.

Notre mémoire sera structurée de la manière suivante :

Le premier chapitre vise à énumérer les différentes sources d'énergies, leurs consommations et productions ainsi que leurs avantages et inconvénients, ensuite faire le point sur la consommation énergétique en Algérie en mettant l'accent celle du secteur transport et en mettant en clair, les impacts de son utilisation sur l'environnement.

Par ailleurs, les moteurs et les carburants utilisés actuellement jouent un rôle marquant sur l'évolution de cette consommation du fait de leurs rendements relativement bas d'où une surconsommation de carburants, et leurs effets sur l'environnement Pour cela nous allons mettre l'accent sur ce point dans le chapitre II.

Le chapitre III est consacré à la prévision de demande en carburants routiers en Algérie qui est basée sur un modèle mathématique tenant en compte des facteurs jugés susceptibles de mieux expliquer l'évolution de cette dernière.

Le dernier chapitre présente les différentes solutions alternatives pour réduire la consommation en carburants dans les transports routiers et proposer celle qui peut être plausible en Algérie.

# CHAPITRE I : BILAN ENERGETIQUE.

## I) Bilan énergétique mondial

### I.1) Introduction

L'énergie est au cœur de toute activité humaine au niveau mondial. Inégalement répartie et inégalement consommée, avec des réserves naturelles qui ne sont pas inépuisables, on peut s'interroger sur l'avenir de la demande énergétique au niveau mondial.

Comment a évolué la consommation mondiale et quelle est la part de transport dans cette consommation ? Quels facteurs expliquent ses changements ?

La consommation mondiale d'énergie primaire ne cesse d'augmenter depuis la révolution industrielle ; elle devrait, selon les projections, augmenter de 54% entre 2005 et 2030 ; soit un taux annuel moyen de 1.8%. [1]

Les énergies renouvelables et le nucléaire sont appelés à se développer, du fait que l'utilisation des énergies fossiles toujours croissante met en péril la stabilité des écosystèmes ; le climat mondial ; ainsi que la santé des générations d'aujourd'hui et de demain.

- **Principes de la thermodynamique**

Tout d'abord ; il faut définir qu'est ce que l'énergie : c'est la capacité de fournir un travail ; d'imprimer un mouvement, d'élever la température. On l'obtient par l'utilisation des forces naturelles ; de la combustion de carburants (essence ; gasoil ; fioul) ou de combustibles (pétrole ; gaz naturel, charbon) ; ou de l'électricité.

Les différentes formes d'énergie passent d'une forme à l'autre en permanence : énergie chimique en énergie mécanique ; énergie nucléaire en chaleur...etc. Mais ces transformations sont soumises aux deux principes de la thermodynamique :

- 1- Le principe de conservation de l'énergie : la quantité d'énergie soumise à un processus de transformation se retrouve intégralement sous d'autres formes lorsque ce processus a pris fin. Or le terme "conserver" ne correspond pas à un maintien en "bon état" ou non altéré de l'énergie.
- 2- Le principe de dégradation (ou dissipation) de l'énergie : la quantité d'énergie utilisable dans un système fermé diminue obligatoirement. Ainsi le moteur électrique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique le fait en dégageant de la chaleur (le moteur s'échauffe). la chaleur est une forme dégradée de l'énergie.[2]

Il est facile de produire de la chaleur à partir d'une quantité équivalente d'énergie noble, par exemple dans des fours et chaudières, électriques ou à combustion, ou des capteurs

solaires pour chauffe-eau. Mais les transformations inverses sont impossibles. Si l'on dispose d'une certaine quantité de chaleur, on ne peut pas la convertir intégralement en énergie mécanique, électrique ou chimique à l'aide d'un appareil qui fonctionnerait en cycle fermé, en revenant périodiquement à son état initial.

« La nature ne nous autorise à convertir en une autre forme d'énergie qu'une fraction de la chaleur disponible, et elle impose à cette fraction de ne pas dépasser une certaine valeur maximale ». C'est ce qui limite le rendement des turbines à vapeur dans les centrales électriques, des moteurs de voiture et d'avion, et de tous les engins délivrant de l'énergie mécanique à partir de l'énergie calorifique d'un gaz chaud.

## I.2) Les différentes sources d'énergie

### I.2.1) Energies non renouvelables

Les énergies non renouvelables englobent les énergies fossiles et fissiles. Leurs réserves qui se trouvent dans le sous-sol sont limitées et ne se renouvellent qu'après des millions d'années.

#### Les énergies fossiles [3]

Ce sont des énergies qui résultent de l'exploitation du pétrole, du gaz naturel et du charbon. Il s'agit des énergies les plus exploitées dans le monde présentement.

- **Le pétrole :** Le pétrole provient de dépôts organiques formés au fond des mers sous l'action de températures et de pressions intenses. Le pétrole est un liquide sombre et visqueux constitué d'un mélange d'hydrocarbures : il faut le raffiner pour éliminer les impuretés et séparer ses différents constituants. Le pétrole est, depuis sa découverte en Pennsylvanie en 1850, la principale source d'énergie dans le monde, plus précisément dans les pays industrialisés.
- **Le gaz naturel :** Est pour sa part un combustible fossile gazeux constitué de plusieurs gaz emprisonnés dans les roches poreuses, des gaz provenant de la sédimentation de résidus de la biomasse.
- **Le charbon :** Est aussi un combustible fossile, mais il est sous forme solide. Cet hydrocarbure contient beaucoup de carbone contrairement au pétrole et au gaz naturel qui contiennent pour leur part une bonne quantité d'hydrogène.

Enfin, les hydrocarbures ont plusieurs avantages face aux autres sources d'énergie :

- Grandes performances sur le plan énergétique.
- Ils ne coûtent pas très cher et ils sont faciles à utiliser.

- Ils sont aisés à transporter, (facilité d'emmagasinage pour le pétrole et le charbon).
- Source d'énergie pratique dans le domaine des transports et de l'industrie.

Cependant ; ces hydrocarbures présentent aussi des inconvénients dont on peut citer :

- Source d'énergie la plus polluante, et donc, la plus destructive pour l'environnement.
- Elle se trouve en quantité limitée, faisant en sorte qu'elle finira par s'épuiser.

#### **Energie fissile (nucléaire) [4]**

L'utilisation de l'énergie nucléaire consiste à tirer profit de l'énergie de liaison élevée des noyaux à travers de réactions exothermiques. Les deux principaux types de réactions sont la fission et la fusion.

#### **I.2.2) Energies renouvelables [5]**

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Elles sont issues principalement de phénomènes naturels réguliers principalement le soleil et le vent.

Le développement des énergies renouvelables ne répond pas seulement à un enjeu environnemental vu qu'elles n'engendrent presque aucune pollution atmosphérique, mais aussi correspond à un besoin de diversification de nos sources d'énergies. Cependant, elles nécessitent un capital de départ, de la main d'œuvre, et surtout de faire face à la concurrence des énergies fossiles souvent moins chères.

Mais le problème qui se pose : Peut-on compter sur les énergies renouvelables pour couvrir tous nos besoins énergétiques ? Si leurs atouts écologiques sont indéniables, leur puissance énergétique ne permettra pas de les substituer complètement aux énergies fossiles.

<b>Energie</b>	<b>Production de 1000MWE pendant 1an</b>
<b>Hydraulique</b>	12 barrages de type Serre-Ponçon (plus grand barrage d'Europe)
<b>Solaire</b>	surface de 70 à 100 km <sup>2</sup> suivant le site (Europe)
<b>Eolien</b>	5600 éoliennes de 600 kW (disponibilité de 30%) soit environ 560 km d'éolienne

[6]

#### **I.2.3) Comparaison entre la densité énergétique de quelques sources d'énergie**

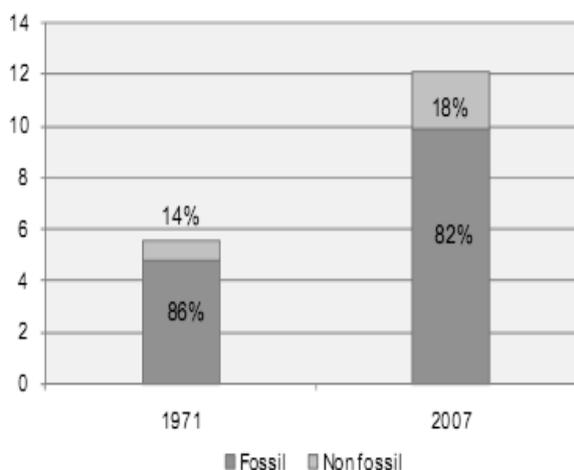
La TEP : tonne équivalente pétrole, est une unité d'énergie d'un point de vue économique et industriel. Elle vaut, par définition, 41,868 GJ (10 Gcal), ce qui correspond au pouvoir

calorifique d'une tonne de pétrole. Les équivalences sont calculées en fonction du contenu énergétique ; ce sont des moyennes choisies par convention. Le pétrole étant le combustible le plus utilisé, les économistes choisissent cette unité de référence pour comparer entre elles les différentes sources d'énergie. En général, à l'international on utilise la Mtep (mégatonne équivalent pétrole) au niveau régional la ktep (kilotonne équivalent pétrole, soit 1 000 tep), et au niveau local simplement la TEP. [7]

Combustible	Valeur énergétique	Equivalence en tep
1 tonne de pétrole	42 GJ	1 TEP
1 tonne de charbon	29.3 GJ	0.69 TEP
1000 m <sup>3</sup> de gaz	38 GJ	0.88 TEP
1 tonne d'uranium naturel	420 000 GJ	10000 TEP
1tonne de GPL	46Gj	1.1 TEP

### I.3) Offre énergétique dans le monde

Gt of oil equivalent



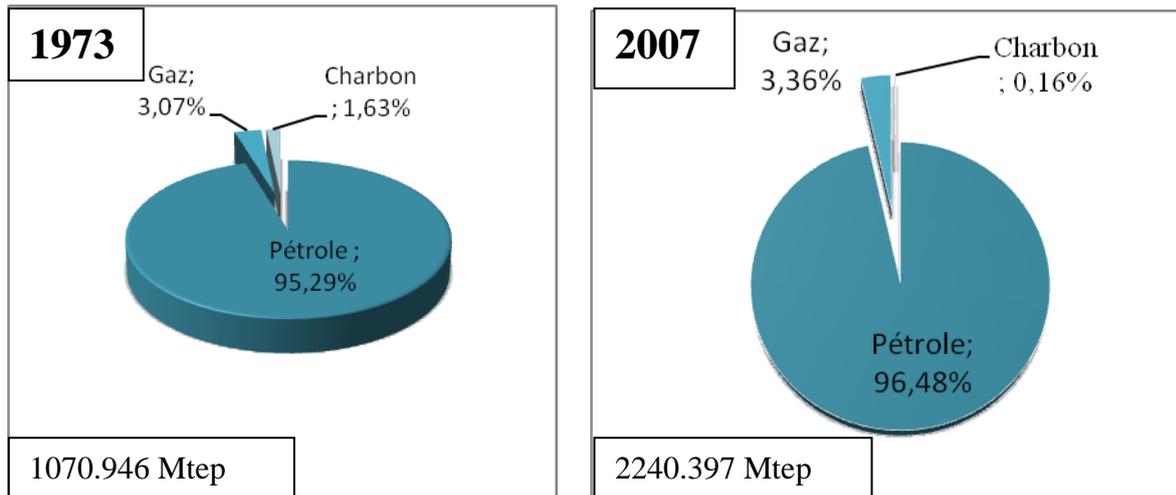
\* World primary energy supply includes international bunkers.

**Figure 1 :** Répartition de l'offre mondiale en énergie primaire en 1971-2007

(Source: CO2 emissions from fuel combustion : IEA statistics ; Edition : 2009)

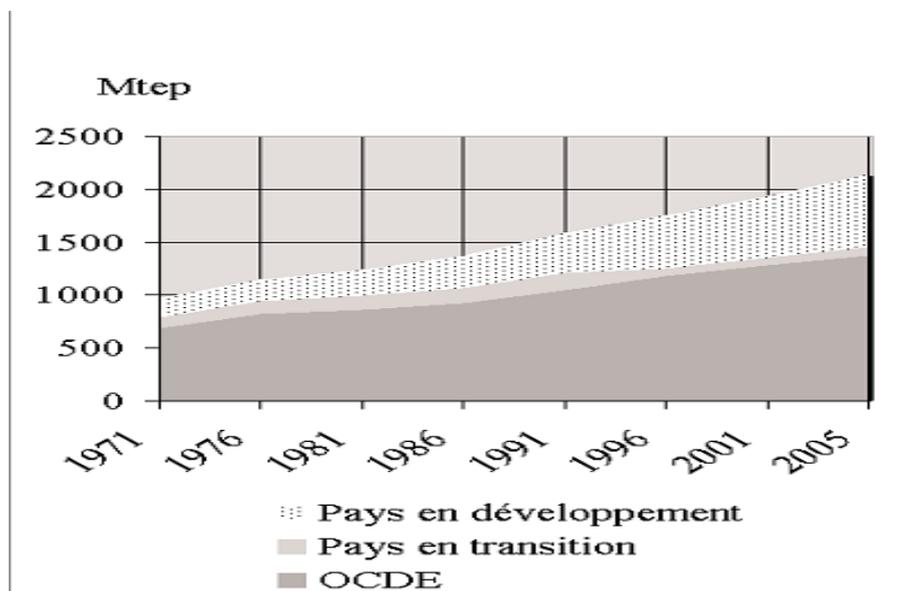
### I.4) L'énergie dans le secteur transport

Que ce soit en voiture, bus, métro, avion ou train ... Les besoins de mobilité augmentent. L'homme multiplie ses modes de transport et ses déplacements. Cette mobilité est assurée actuellement en immense majorité par les carburants pétroliers. Par voie de conséquence ; la consommation du pétrole suit de près la croissance des activités liées au secteur transport. En 2005, 28% de l'énergie finale était consommée par ce secteur ; et selon les prévisions cette part de la consommation devrait se multiplier d'ici 2030.



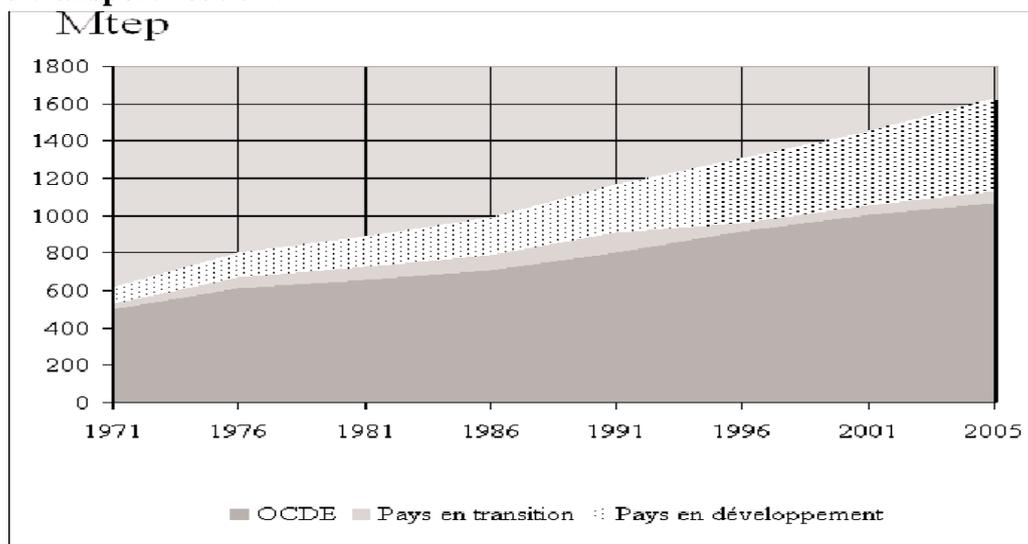
**Figure 2 :** Répartition de la consommation d'énergie finale dans le secteur transport selon la source d'énergie (Source: key world energy statistics ; édition : IEA 2009).

Nous constatons que la consommation finale d'énergie de ce secteur a doublé en passant de 1070.946 Mtep à 2240.394 Mtep sur une période de 34ans. Selon ce rythme ; il faut s'attendre à une croissance très rapide de la consommation dans les années à venir.



**Figure 3 :** Evolution de la consommation d'énergie finale du secteur transport dans le monde (Source :enerdata).

En 34 ans, la consommation d'énergie finale des transports mondiaux s'est multipliée par un facteur 2,2. Nous remarquons une croissance soutenue et assez continue dans les pays de l'OCDE (2 % par an) qui représentaient 64 % de la consommation mondiale de transport en 2005 (contre 71 % en 1971). En ce qui concerne les pays en développement, le taux de croissance annuelle a atteint 4 % par an sur cette période et sa part a participé avec 32 % au bilan final en 2005 contre 19 % en 1971.

**Part du transport routier :**

**Figure 4 :** Evolution de la consommation d'énergie finale du transport routier dans le monde (Source : enerdata).

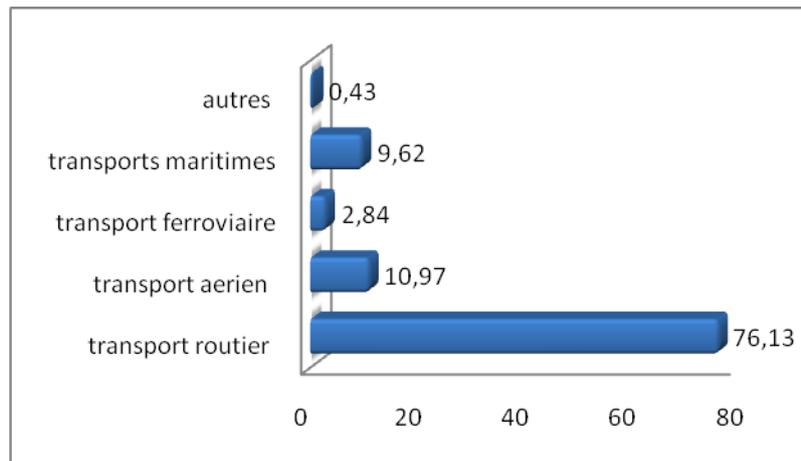
Le principal poste de consommation est le transport routier (marchandises et passagers) avec 1 630 Mtep en 2005. Ce secteur quasiment dépendant des carburants pétroliers (97 %), il renforce sa prééminence de 12 points par rapport aux autres modes de transport, avec 76% du total en 2005 contre 64 % en 1971.

**Part du transport aérien :** Le second poste de consommation mondiale, également totalement dépendant des produits pétroliers, est celui des transports aériens, qui se situe loin derrière le transport routier, avec 235 Mtep (11% du bilan final) contre 113 Mtep en 1971. [8]

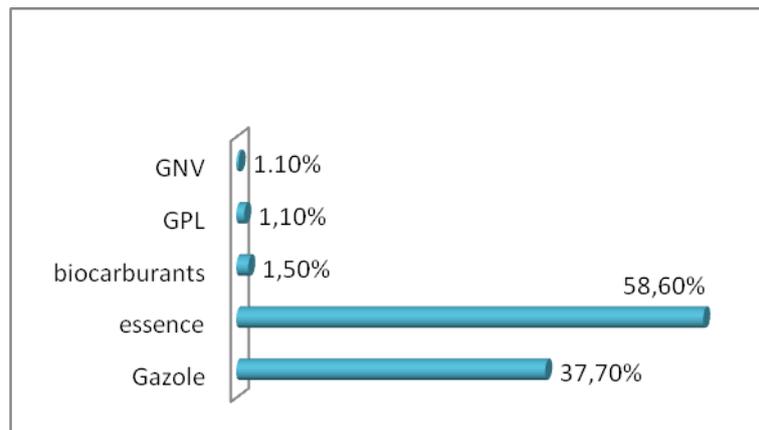
**Part des transports maritimes :** L'ensemble des transports par bateaux, complètement dépendant du pétrole, a atteint en 2005 une consommation finale de 206 Mtep, qui vient après le transport aérien. [8]

**Part du transport ferroviaire :** Le transport ferroviaire mondial est le seul mode de transport dont la consommation diminuait très sensiblement sur la même période, non seulement en valeur relative (de 8 % en 1971 à moins de 3 % en 2005), mais aussi en valeur absolue (de 77 Mtep en 1971 à 61 Mtep en 2005). [8]

Au total, les trois modes de transport (routier, aérien, maritime) atteignent une consommation de 2 071 Mtep soit 96.73 % du total de l'énergie finale consommée par ce secteur. Nous pouvons représenter la répartition de la consommation selon le mode de transport comme suit :



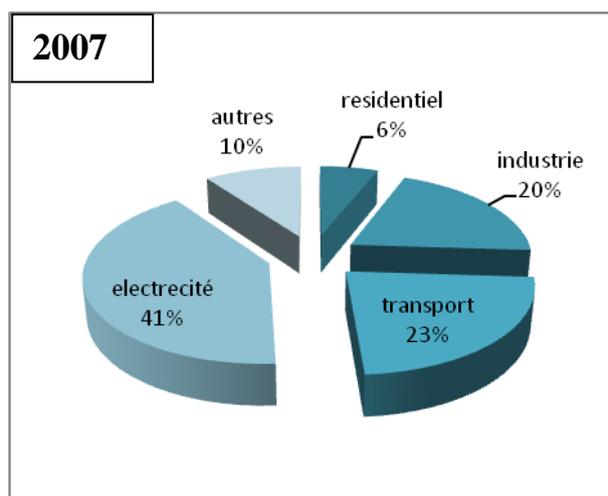
**Figure 5 :** Répartition de la consommation énergétique mondiale selon le mode de transport 2005



**Figure 6 :** Répartition de la consommation mondiale d'énergie dans le secteur transport routier selon le type de carburant utilisé en 2007 (Source : statistique de l'OCDE en 2007).

L'essence et le gazole couvraient 96,3 % de l'énergie utilisée dans le transport routier à l'échelle mondiale, quant aux carburants alternatifs ; la consommation n'a pas dépassé 4%.

### I.5) Emissions de CO<sub>2</sub> dans le monde par secteur



**Figure 7 :** Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> par secteur dans le monde en 2007

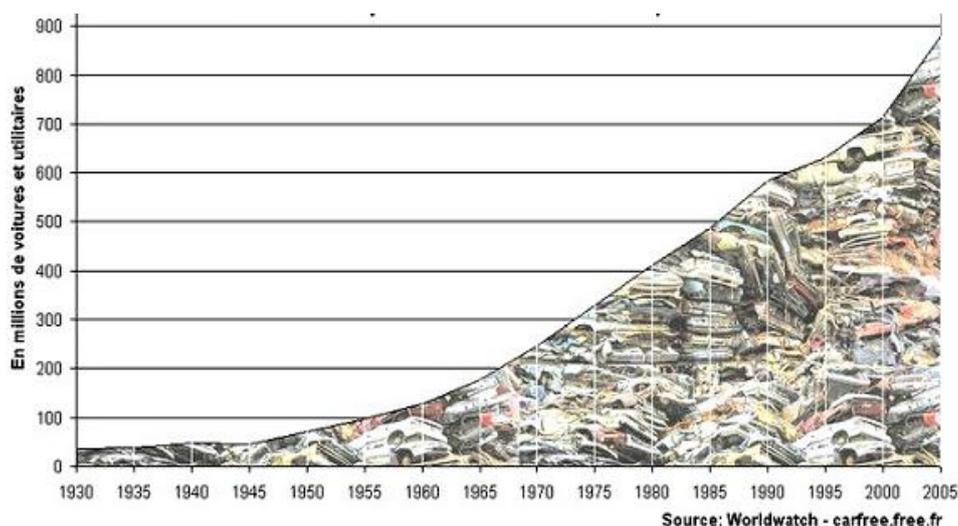
(Source: CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion : IEA statistics ; édition : 2009 ).

En 2007, deux secteurs, « l'électricité, génération de chaleur » et le transport, produisaient près des deux tiers des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, les émissions de ces mêmes secteurs ont également augmenté à un rythme plus rapide que les émissions mondiales.

La production d'électricité et de chaleur était responsable en 2007 de 41% du total mondial des émissions de CO<sub>2</sub>. Le secteur transport vient juste après avec une part de 23% du total mondial des émissions de CO<sub>2</sub>

**NB :** dans cette figure, autres comprend les secteurs : commercial ; services publics ; l'agriculture ; la pêche, les industries énergétiques autre que l'électricité et la génération de chaleur, et les émissions non spécifiées ailleurs.

## I.6) Parc automobile mondial



**Figure 8 :** Evolution du parc automobile mondial depuis 1930

A partir de ce graphique ; nous remarquons une évolution très rapide du parc automobile mondial justifiée par l'augmentation de la population et par conséquent les besoins en mobilité, plus particulièrement celle qui concernent le transport routier.

Le premier milliard de voitures a été dépassé durant l'année 2007. Le parc automobile mondial a été en effet estimé officiellement en 2007 à 1.031.284.909 véhicules [9]

A ce rythme, dans moins de 15 ans, deux milliards de véhicules devraient parcourir et meurtrir notre planète...

## **I.7) Conclusion**

Dans ce chapitre ; nous avons présenté les différentes sources d'énergie ; leur part dans l'offre mondiale ; ensuite nous nous sommes focalisées sur le secteur transport. Nous avons montré l'évolution de la consommation de ce secteur au fil des années ; plus particulièrement celle du transport routier en Algérie.

Selon les prévisions de l'AIE ; la demande mondiale en énergie devrait croître de 52 % à l'horizon 2030, voire de 71 % selon les estimations du Département américain de l'énergie sous le double effet de la croissance économique et de la hausse de la population mondiale.

La tendance de la consommation en carburants du secteur transport et plus particulièrement celle du transport routier, est plutôt croissante puisque c'est un secteur où le pétrole reste difficilement substituable. Il est ainsi estimé que la part des transports dans la demande finale de produits pétroliers devrait progresser de 50 % en 2000 à 60 % en 2030 soit un taux annuel moyen de 2%. Une évolution qui fait peur de l'avenir énergétique de notre monde....

## II) Bilan énergétique en Algérie

L'Algérie est un pays dépendant des produits pétroliers ; 11<sup>ème</sup> producteur mondial de pétrole avec 1,4 millions de barils/jour et 3<sup>ème</sup> exportateur de gaz naturel avec 65 milliards de m<sup>3</sup>. Au niveau de la consommation d'énergie ; en 2008 l'Algérie est classée en 4<sup>ème</sup> position avec une consommation de 860 000 Tep.j<sup>-1</sup> [10]

### II.1) les différentes sources d'énergie

#### II.1.1) Les énergies fossiles [11]

- **Le pétrole** : depuis la découverte de pétrole en 1956 ; l'Algérie a pompé 15.8 milliards de barils ; le pétrole algérien est l'un des plus chers au monde en raison de sa qualité. Il est léger et sa teneur en soufre est très réduite. Il représente 1.5% des réserves mondiales avec une capacité de production de 1,4 million de barils/jour en 2007.
- **Le gaz naturel** : la consommation de gaz en Algérie est passée de 20 milliards m<sup>3</sup> en 2000 à 25 milliards m<sup>3</sup> en 2008, en progression moyenne de 3,1 % par an. En 2008, l'Algérie a exporté 62 milliards de m<sup>3</sup>.

#### II.1.2) Les énergies renouvelables [12]

Les questions de la disponibilité et du coût des énergies fossiles devenant problématiques, l'Algérie envisage leur changement progressif par des sources d'énergie inépuisables. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays.

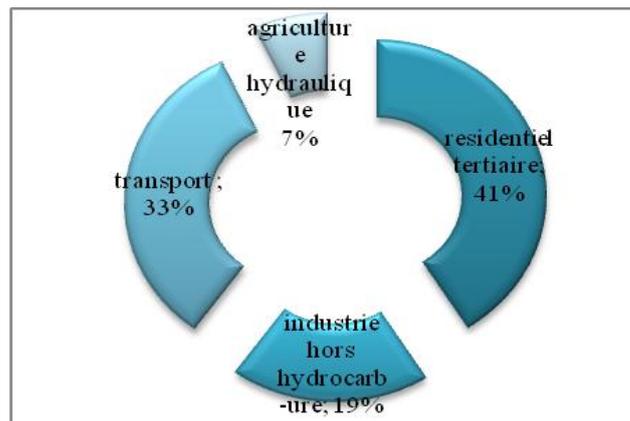
- **L'hydraulique** : Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m<sup>3</sup>, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m<sup>3</sup>, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation. Et la capacité d'hydraulique installée : 249 MW.

La part de l'énergie hydraulique dans la production nationale d'électricité est encore faible (1,7% de la production installée), due au nombre insuffisant de sites et la faible exploitation des sites existants.

- **Le solaire** : L'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. L'énergie reçue sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de  $1700\text{ KWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  au Nord et  $2263\text{ KWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  au Sud du pays. Le total d'énergie reçue est estimé à  $169\,400\text{ TWh.an}^{-1}$ , soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays.
- **L'éolien** : Au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée ( $1\text{ à }4\text{ m.s}^{-1}$ ) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux.
- **La géothermie** : Plus de 200 sources d'eau chaude ont été répertoriées dans le nord est et le nord ouest de l'Algérie. L'ensemble du débit d'exploitation des sources représente une puissance estimée à  $700\text{MW.an}^{-1}$
- **La biomasse** : Le potentiel de biomasse se répartit entre les déchets issus des activités humaines, déchets urbains et agricoles non recyclés, estimés à  $1,33\text{ MTEP.an}^{-1}$  (Tonne d'équivalent pétrole) et l'énergie issue du bois des forêts. Cette dernière représente  $37\text{ MTEP.an}^{-1}$  et le potentiel récupérable de  $3,7\text{ MTEP.an}^{-1}$

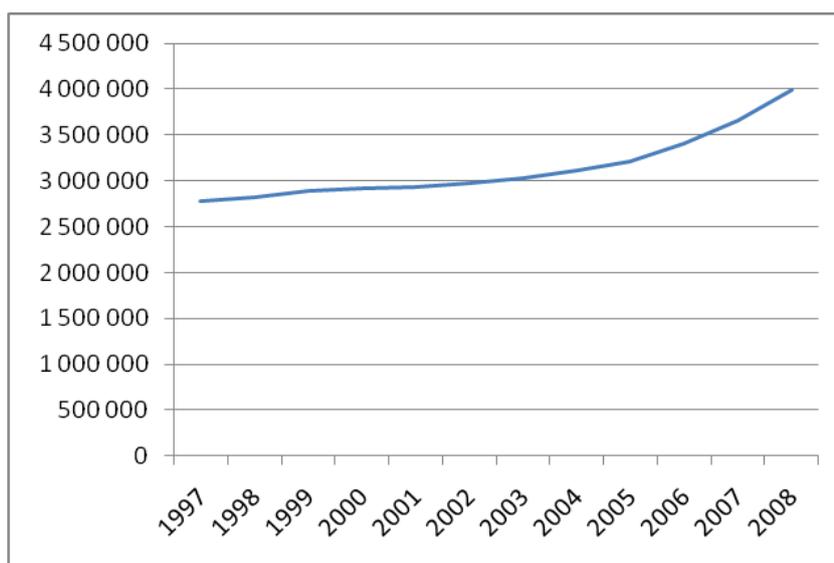
## II.2) L'énergie dans le secteur de transport



**Figure 9:** Répartition de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité en 2007 (Source : Ministère de l'énergie et des mines)

Le transport est le 2<sup>ème</sup> consommateur d'énergie en Algérie après le résidentiel cette consommation a atteint 6.5 millions de TEP en 2007.

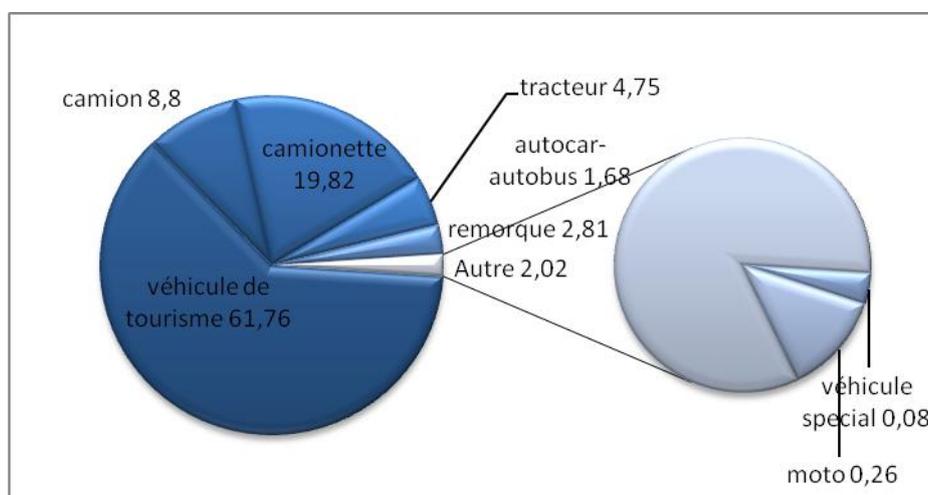
### II.2.1) Parc automobile



**Figure 10:** Evolution du parc automobile depuis 1997  
(Source :ONS )

Le parc national automobile a connu une forte augmentation depuis les années 2000 ; ceci est dû à l'entrée de plus d'un million de véhicules sur une période de 8 ans allant de 2000 à 2008 passant de 2.9 millions de véhicule en 2000 jusqu'à 3.9 millions en 2008. En 2008, un Algérien sur 9 possède un véhicule (tous véhicules confondus), ce taux de motorisation place le pays du point de vue de la mobilité en pole position en Afrique.

- **Parc automobile par genre de véhicule**

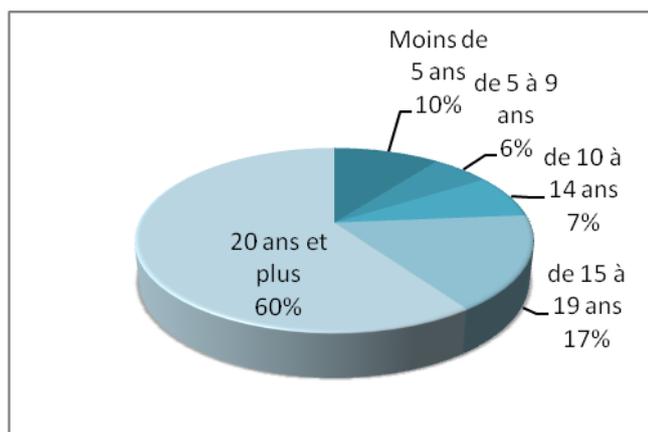


**Figure11 :** Répartition du parc national automobile par genre de véhicule en 2008  
(Source : ONS)

Le parc des véhicules de tourisme a modifié la structure du parc national automobile avec son pourcentage de 61.76% soit plus de 2,4 millions en 2008. D'autre part, le parc des camions et des camionnettes a franchi la barre d'un million d'unités en 2008.

L'accroissement de l'usage des véhicules individuels (voitures particulières, taxis) en ville est justifié par l'état des transports collectifs qui sont souvent surchargés et inconfortables, les temps d'attente longs et les horaires aléatoires. De ce fait, le développement des transports collectifs reste toujours marginal.

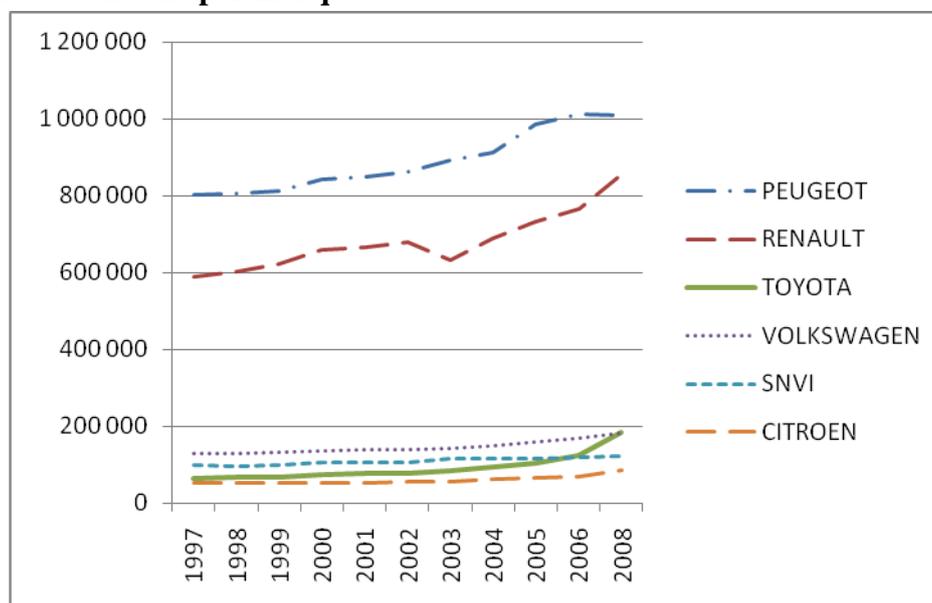
- **Age moyen du parc automobile**



**Figure 12 :** Répartition du parc national automobile selon les tranches d'âges des véhicules en 2006 (Source : ONS)

L'âge moyen du parc reste cependant élevé : 60 % des véhicules ont plus de 20 ans d'âge et seulement 10 % ont moins de 5 ans d'âge.

- **Parc automobile par marque**

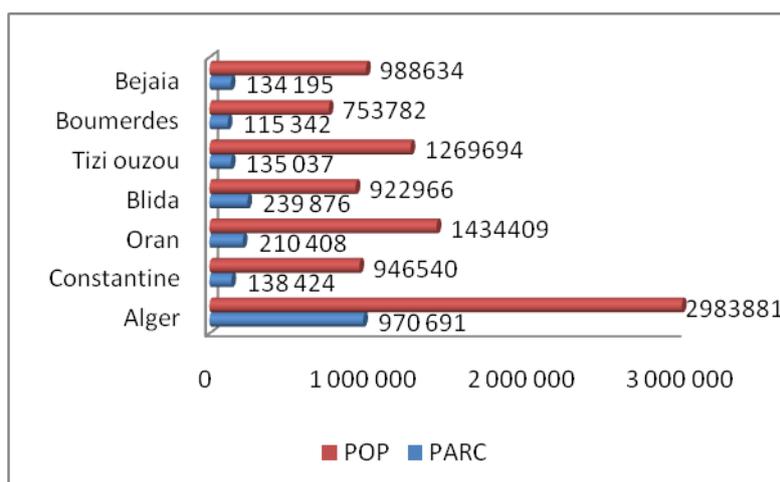


**Figure 13:** Evolution du parc national automobile par marque (Source : ONS)

Selon les statistiques ; en 2008 et s'agissant des modèles présents, les industriels français sont majoritaires ; Peugeot et Renault représentant la moitié des véhicules roulants. L'ensemble des autres constructeurs se situe en dessous de la barre des 200 000 véhicules présents sur le sol algérien.

Ces dernières années, le marché de l'automobile a cependant vu apparaître un nombre croissant de nouvelles marques (plus de 37 marques), notamment d'origine asiatique qui constitue autant de nouveaux concurrents.

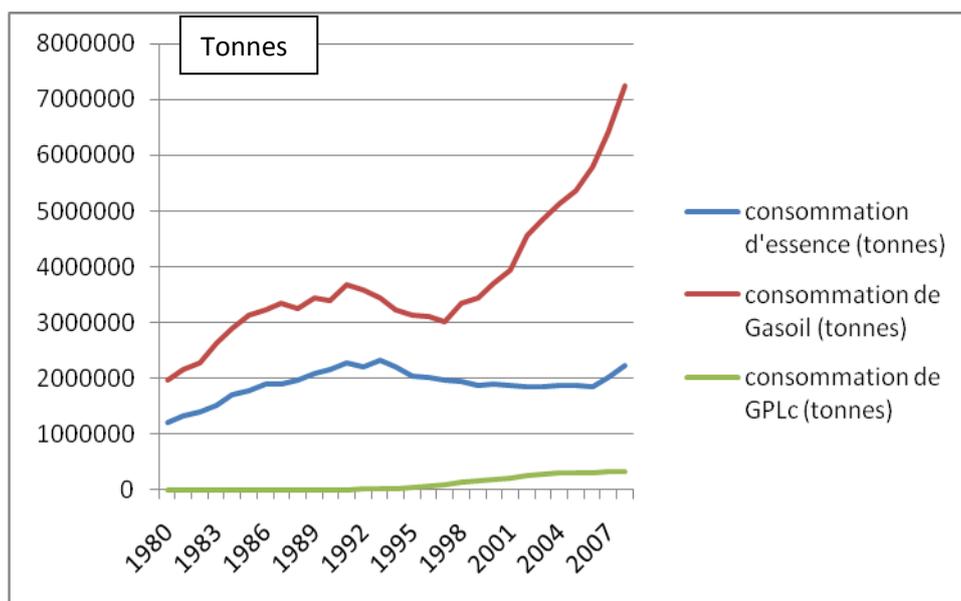
- **Densité du parc automobile par Wilaya**



**Figure 14 :** Répartition du parc automobile et la population par wilaya en 2008  
(Source : ONS)

En ce qui concerne la répartition spatiale, nous observons une très forte concentration au niveau de la capitale et des wilayas environnantes. La wilaya d'Alger se place en première position par sa densité automobile qui correspond à un véhicule pour trois personnes.

## II.2.2) La consommation nationale des carburants dans le transport



**Figure 15:** Evolution de la consommation nationale d'essence, Gazole et GPL<sub>c</sub> dans le transport routier (Source : ONS)

Nous remarquons que la consommation du gazole a connu ces dernières années une forte augmentation, en enregistrant des taux très élevés à l'échelle nationale puisqu'elle est passée de 3,6 millions de tonnes en 2000 à 7.24 millions de tonnes en 2008.

Ce graphe illustre une diminution de la consommation de l'essence sur la période [1993-2002] dû à l'augmentation du prix de l'essence par rapport à celui du gazole, tandis que la consommation du GPL<sub>c</sub> qui a commencé sa croissance depuis les années 90 reste très faible et ne couvre que 10.34 % des besoins de notre parc automobile, en fait ceci s'explique par le nombre de véhicules roulant en GPL<sub>c</sub> qui n'a pas dépassé les 200 000 en 2008.

- **Emissions de CO<sub>2</sub> liées au secteur transport**

En Algérie, l'une des principales causes de la pollution atmosphérique est le transport ; plus particulièrement la densité du réseau routier qui supporte le trafic d'un parc automobile en croissance constante utilisant le plus souvent des carburants conventionnels (gazole, essence).

La part du secteur transport dans le bilan global des émissions de CO<sub>2</sub> occupe la première place avec un pourcentage de 25% du total (79MT de CO<sub>2</sub>) en 2007, et risque de s'accroître davantage si nous continuons à ce rythme là ; et elle causera des problèmes néfastes sur l'environnement et la santé de l'être humain ...

### **II.3) Conclusion**

Le parc automobile algérien dépendant principalement des produits pétroliers est en croissance continue. Le gazole et l'essence couvre la quasi-totalité des besoins du secteur transport, tandis que la consommation du GPLc reste encore faible malgré que l'Algérie soit l'un des premiers producteurs du GPL dans le bassin Méditerranéen Il est nécessaire donc d'encourager son utilisation pour minimiser les émissions des gaz à effet de serre tout en tenant compte du caractère épuisable des ressources en hydrocarbures et de l'évolution de la demande nationale d'énergie sur le long terme.

CHAPITRE II :  
Les carburants et les  
moteurs.

---

## I) Carburants conventionnels

### I.1) Qu'est ce qu'un carburant ?

Les carburants sont des produits dont la combustion en présence de l'air permet le fonctionnement des moteurs thermiques à pistons (de type essence ou diesel) ou à flux continu (réacteurs d'avion, turbines à gaz). On ne doit pas confondre les termes carburant et combustible, ce dernier étant, quant à lui, réservé aux produits utilisés pour la fourniture d'énergie thermique dans les chaudières, les fours, les centrales... [13]

Chimiquement un carburant est en fait un mélange de nombreuses espèces chimiques : plusieurs dizaines d'hydrocarbures « réservoirs d'énergie » et des additifs en faibles proportions introduits pour donner des propriétés particulières au mélange. L'énergie chimique contenue dans le carburant est donc destinée à être convertie en énergie mécanique. [14]

### I.2) Production des carburants conventionnels par raffinage du pétrole

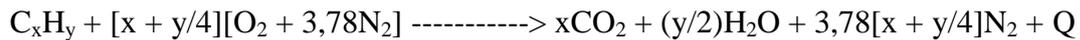
Le but du raffinage du pétrole est de transformer ; par des opérations physiques et chimiques un produit brut , de composition très variable suivant l'origine , en produits de base pour la pétrochimie et surtout en carburants ,combustibles ,lubrifiants et bitumes .

Le pétrole brut est séparé en différentes fractions par une distillation à pression atmosphérique et une distillation sous vide. Associés aux opérations de séparation ; plusieurs procédés de conversion permettent d'améliorer la qualité des produits tout en ajustant les quantités obtenues aux besoins du marché :

- Le reformage catalytique débouche sur la production d'essence à haut indice d'octane et d'hydrogène à partir d'une charge essentiellement constituée d'essence à bas indice d'octane.
- Le craquage catalytique (FCC : Fluid Catalytic Cracking) fournit, à partir d'un distillat sous vide, les essences FCC et des oléfines légères ; converties par une méthode d'alkylation en des coupes d'indices d'octane élevé, ou utilisées en pétrochimie.
- Des traitements d'hydrocraquage sous pression élevée d'hydrogène complètent la production du gazole, de kérosène ou d'essence. [15]

### I.3) Combustion des carburants

La combustion est un processus d'oxydation qui se produit par réaction chimique entre deux corps : un combustible (carburant) et un comburant (généralement de l'air) en dégagement de la chaleur ; pour donner naissance aux produits de combustion. Dans le cas d'un mélange stœchiométrique (quantité d'air juste nécessaire et suffisante pour brûler complètement le combustible) composé d'air sec et d'hydrocarbure  $C_xH_y$ , l'équation de combustion s'écrit :



Q : quantité de chaleur dégagée.

Mais en réalité ; la combustion n'est jamais complète à cause de l'insuffisance de la quantité d'oxygène dans le mélange air-carburant. On aura donc comme produit de combustion :  $CO_2$  ;  $H_2O$  ;  $N_2$  ;  $CO$  ; et les hydrocarbures imbrulés.

### Pouvoir calorifique d'un carburant

Massique ou volumique, il représente la quantité d'énergie dégagée par unité de masse ou de volume du carburant, lors de la réaction chimique de combustion complète conduisant à la formation de  $CO_2$  et  $H_2O$ . Le carburant est pris, sauf mention contraire, à l'état liquide et à une température de référence, généralement  $25^\circ C$ . L'air et les produits de combustion sont considérés à cette même température.

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

Pour les produits organiques purs, il est possible également de calculer le **PCI**, à partir de leurs chaleurs de formation extraite des tables de données thermodynamiques. Le PCI s'obtient alors en utilisant la relation générale de thermochimie appliquée à des conditions standards de pression et de température ( $10^5$  Pa et  $25^\circ C$ ) [13]

$$\Delta H_{\text{comb}} = \sum(\Delta H_f)_{\text{prod}} - \sum((\Delta H_f)_{\text{reactifs}} \quad \text{Et} \quad \text{PCI} = \Delta H_{\text{comb}}/M$$

Où M est la masse molaire de la substance considérée.

#### 1. Essence :



En se basant sur les caractéristiques proches de l'essence et de l'octane, nous pouvons assimiler son comportement à celui de l'octane ( $C_8H_{18}$ ), et en faisant l'hypothèse que la combustion de l'essence est complète ; la réaction de combustion s'écrit :

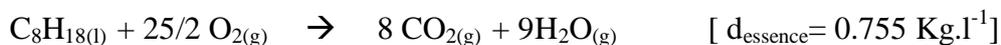


Composés	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Enthalpies standards de formation (Kj.mol <sup>-1</sup> )	-393.5	-241.6	0	-208.7	-372.2	-291,010	-103,850	-126,150

Composés	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
Enthalpies de vaporisation (Kj.mol <sup>-1</sup> )	34.88	81.38	61.51

- **Bilan énergétique**

L'essence est à l'état liquide à la température ambiante donc nous devons tenir compte de son enthalpie de vaporisation



$$\Delta_r H^\circ = \Delta H_{\text{vap(essence)}} + 8*(-393.509) + 9*(-241.60) - (-208.750) = -5078.82 \text{ Kj.mol}^{-1} .$$

$$\text{Et } M = 114\text{g.mol}^{-1}$$

Cette énergie est libérée principalement au cours du réarrangement des liaisons chimiques. Les liaisons C-C, C-H et O=O sont brisées pour former des liaisons C=O et O-H.

$$\text{PCI}_{\text{essence}} = 44.55 * 10^3 \text{ kJ.kg}^{-1} \approx 33.63 * 10^3 \text{ Kj.l}^{-1}$$

- **Bilan CO<sub>2</sub> :**

1 mole de C<sub>8</sub>H<sub>18</sub> (114g) → 8 moles de CO<sub>2</sub> (352g)

Donc 1Kg d'essence va donner  $1*352/114 = 3.08$  kg de CO<sub>2</sub>

0.75 Kg → 1litre ↔ 1Kg → 1.33 litre

D'où un facteur d'émission de 3.08 Kg de CO<sub>2</sub> / Kg d'essence = 2.31 Kg de CO<sub>2</sub> par litre d'essence.

**I. Gazole (Diesel) :**

Le gazole est un produit pétrolier utilisé comme carburant et combustible. Il est utilisé dans les moteurs diesel. La masse volumique du gazole est d'environ  $0.850 \text{ Kg.l}^{-1}$ . En se basant sur les caractéristiques proches du gazole et de l'hexadécane, nous pouvons assimiler son comportement à celui du cétane (hexadécane).

**Bilan énergétique**

$$\Delta_r H^\circ = \Delta H_{\text{vap}}(\text{essence}) + 16 * (-393.509) + 17 * (-241.60) - (-372.2) = -9949.76 \text{ Kj.mol}^{-1}$$

$$\text{PCI} = - \Delta_r H^\circ / M \rightarrow \text{PCI} = 44.02 * 10^3 \text{ Kj.Kg}^{-1} = 37.42 * 10^3 \text{ kj.l}^{-1}$$

**Bilan CO<sub>2</sub>**

$$1 \text{ mole de } \text{C}_{16}\text{H}_{34} (226\text{g}) \rightarrow 16 \text{ mole de } \text{CO}_2 (704 \text{ g})$$

$$\text{Donc : } 1 \text{ Kg de diesel} \rightarrow 1 * 704 / 226 = 3.11 \text{ kg de } \text{CO}_2$$

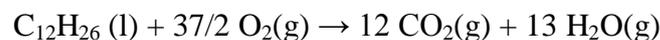
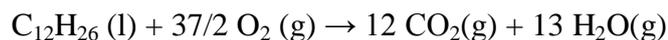
Sachant que la masse volumique du diesel est de  $0.85 \text{ Kg.l}^{-1}$  (à  $15^\circ\text{C}$ )

$$0.85 \text{ Kg} \rightarrow 1 \text{ litre} \longleftrightarrow 1 \text{ Kg} \rightarrow 1.18 \text{ litre}$$

$$\text{D'où une émission de } 3.11 \text{ Kg de } \text{CO}_2 / \text{Kg de diesel} = 2.65 \text{ Kg de } \text{CO}_2 / \text{litre de diesel.}$$

**Kérosène**

C'est la fraction pétrolière qui vient après l'essence, sa température d'ébullition varie entre  $130$  et  $280^\circ\text{C}$  ( $\text{C}_{10}$ -  $\text{C}_{14}$ ). La densité du kérosène est  $0.8 \text{ kg.l}^{-1}$  ; en supposant que le comportement du kérosène est proche de celui du dodécane ; l'équation de combustion s'écrira comme suit :

**Bilan énergie**

$$\Delta_r H^\circ = \Delta H_{\text{vap}} (\text{kerosene}) + 12 * (-393.509) + 13 * (-241.60) - (-291,010) = -7510.388 \text{ Kj.mol}^{-1}$$

$$\text{PCI} = - \Delta_r H^\circ / M = 44.17 \text{ 103 Kj.Kg}^{-1} = 35.34 \text{ 103 Kj.l}^{-1}$$

**Bilan CO<sub>2</sub>**

$$1 \text{ mole de } \text{C}_{12}\text{H}_{26} (170\text{g}) \rightarrow 12 \text{ mole de } \text{CO}_2 (12 * 44 = 528\text{g})$$

$$1 \text{ kg de kérosène} \rightarrow 3.10 \text{ kg de } \text{CO}_2 \quad \text{avec } d = 0.8 \text{ kg.l}^{-1}$$

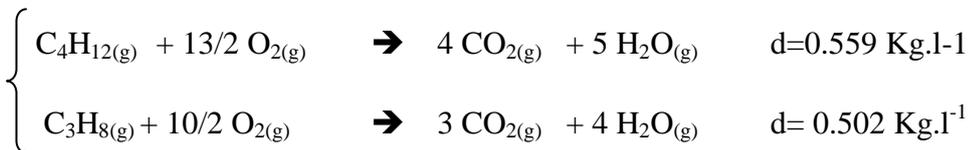
D'où ; un facteur d'émission de 2.48 Kg de CO<sub>2</sub> /litre de kérosène.

## II. GPLc :

Le GPLc : gaz de pétrole liquéfié carburant, est un mélange de butane et de propane soit C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> et C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. Suivant le pétrolier la proportion varie de 20 à 80 d'un ou l'autre des composants. Le GPL est issu du traitement de gaz naturel et du pétrole brut au niveau des champs et du raffinage du pétrole brut. Le gaz naturel peut contenir jusqu'à 10% de propane et butane. L'arrêté ministériel du 11 mars 2006 en fixe la composition du GPLc . [16]

NORD	Eté( mai et aout)	80% propane max 20% butane
	Hiver( septembre à avril)	100% propane
SUD	Eté (mai à aout)	60% propane max 40% butane
	Hiver (septembre à avril)	80% propane 20% butane

**composition du GPL<sub>c</sub> par saison (été et hiver) et par région (nord et sud)**



- **Bilan énergie**

### Le butane :

$$\Delta_r H^\circ = 4*(-393.5) + 5*(-241.6) - (-126,150) = -2262,35 \text{ Kj.mol}^{-1} \rightarrow \text{PCI} = 44.26*10^3 \text{ Kj.Kg}^{-1}$$

$$\Rightarrow \text{PCI}_{\text{butane}} = 24,74 \cdot 10^3 \text{ Kj.l}^{-1}$$

### Le propane :

$$\Delta_r H^\circ = 3*(-393.5) + 4*(-241.6) - (-103,850) = -2043,05 \text{ Kj.mol}^{-1} \rightarrow \text{PCI} = 46,43 \cdot 10^3 \text{ Kj.Kg}^{-1}$$

$$\Rightarrow \text{PCI}_{\text{propane}} = 23,30 \cdot 10^3 \text{ Kj.l}^{-1}$$

$$\text{D'où : } \text{PCI}_{\text{GPLc}} = 0.8* 23,30 \cdot 10^3 + 0.2*24.74*10^3 \rightarrow \text{PCI}_{\text{GPLc}} = 23.588 \cdot 10^3 \text{ Kj.l}^{-1}$$

Si nous supposons une composition du GPLc suivant les proportions suivantes : (80% propane et 20% butane) : le pouvoir calorifique du GPLc est :

$$\text{PCI} = 0.8*22.938 + 0.2*17.403 = 21,831 \text{ Kj.l}^{-1}$$

- **Bilan CO<sub>2</sub>**

En faisant les mêmes calculs que précédemment ; nous trouverons que :

1litre de C<sub>4</sub>H<sub>12</sub> donne 1.71 kg de CO<sub>2</sub> ; de même 1litre de C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> donne 1.545 Kg de CO<sub>2</sub> .Si nous supposons une composition du GPLc suivant les proportions suivantes : (80% propane et 20% butane) : **1 litre de GPL donne 1.578 Kg de CO<sub>2</sub>**

---

#### **I.4) Comparaison entre les propriétés énergétiques et environnementales des carburants routiers (essence ; gazole ; GPLc)**

Il est bien évident que l'influence du carburant est prépondérante sur les performances énergétiques du moteur. Selon nos calculs ; le GPLc a un pouvoir calorifique inférieur (PCI) massique supérieur à ceux de l'essence et du gazole, son PCI volumique gazeux demeure en revanche inférieur dans la mesure où sa masse volumique est nettement plus faible.

Donc il délivre 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 termes de couple et de puissance. Cet inconvénient est atténué dans le cas le plus novateur d'une injection mono ou multipoint de GPLc liquide qui entraîne une augmentation de la masse de carburant admise au sein des cylindres.

Au plan des émissions, la teneur en CO<sub>2</sub> « principal gaz à effet de serre » est beaucoup plus faible, dans le cas du GPLc (1.58 Kg.l<sup>-1</sup>), contre 2.31 Kg.l<sup>-1</sup> pour l'essence qui vient juste après le gazole qui demeure le carburant le plus pollueur avec une quantité de 2.65 Kg.l<sup>-1</sup>.

## **II) Moteurs conventionnels**

Dans un moteur d'automobile, l'énergie mécanique transmise par les pistons, provient de la combustion du carburant, avec l'oxygène de l'air. Ces moteurs sont dits à combustion interne car la combustion du carburant et la détente des gaz produits ont lieu dans chaque cylindre à l'intérieur du moteur. [17]

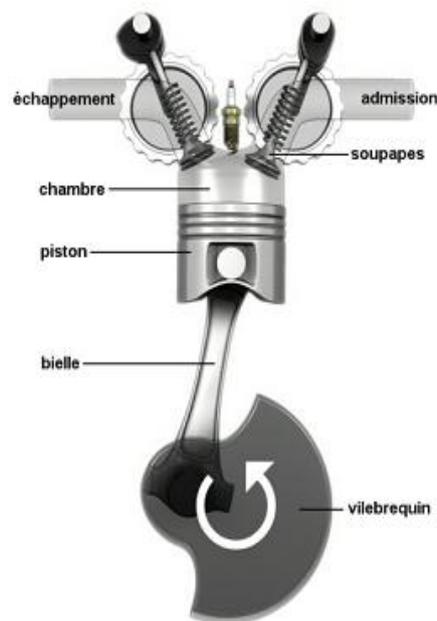
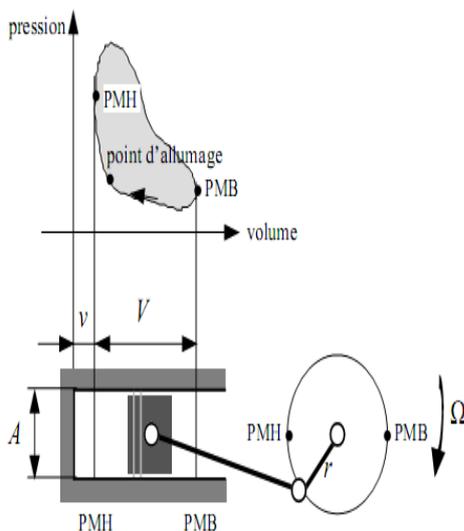
### **II.1) Fonctionnement d'un moteur à essence (allumage commandé)**

Un mélange comprimé d'air et de carburant est enflammé au moyen d'une étincelle, à l'intérieur d'un cylindre dans lequel se déplace un piston relié à un vilebrequin par une bielle. Le mouvement du piston s'effectue entre deux positions extrêmes appelées point mort haut (PMH) et point mort bas (PMB) correspondant respectivement au volume minimal et maximal du milieu réactionnel. La cylindrée unitaire **V** est le volume balayé par le piston entre le PMH et le PMB. L'énergie dégagée par la combustion engendre un mouvement rectiligne du

piston, transformée en mouvement rotatif en sortie de vilebrequin, par l'intermédiaire du système bielle-manivelle.[13]

## II.2) Fonctionnement d'un moteur Diesel

Le moteur diesel est à allumage par compression contrairement au moteur à essence qui est à allumage commandé. Dans ce type de moteur, la succession des phases [admission, compression, combustion, échappement] n'est pas modifiée. Le moteur DIESEL aspire de l'air et le comprime fortement provoquant ainsi son échauffement. Peu avant le PMH, le carburant dosé par la pompe d'injection, est pulvérisé sous haute pression dans la chambre de combustion ; là il est vaporisé et mélangé à l'air comprimé. La combustion du mélange se déclenche par auto-inflammation et s'en trouve améliorée. [18]



$v$  : volume de compression [ $m^3$ ]

$r$  : rayon vilebrequin [m]

$V = C \cdot \pi \cdot A^2 / 4$  : Cylindrée unitaire

$C = 2 \cdot r$  : course

$A$  : alésage [m]

Taux de compression :  $\epsilon = (V+v)/v$

Les moteurs modernes à allumage commandé ont un taux de compression souvent voisin de 10 et pouvant monter jusqu'à 13, et les moteurs Diesel ont un taux de compression allant en moyenne de 16 à 20 pour ceux à injection directe et 19 à 23 pour ceux à injection indirecte. Cette valeur est déterminée lors de la conception du moteur et reste invariable sur les moteurs conventionnels.

Le rendement d'un moteur augmentant avec son taux de compression. Toutefois, sur les moteurs à allumage commandé, un taux de compression élevé favorise l'apparition du cliquetis, la compression plus élevée du mélange carburé pouvant provoquer un auto-allumage incontrôlé, nuisible au bon fonctionnement du moteur.

Un moteur Diesel, en revanche, fonctionne par auto-allumage du carburant et pour ce faire a besoin de fortes valeurs de compression, afin que l'air introduit dans le cylindre soit porté à une température élevée. [6]

### II.3) Les quatre temps d'un moteur à combustion

La presque totalité des moteurs d'automobiles fonctionne selon le principe du cycle à quatre temps décrit pour la première fois par Alphonse Beau de Rochas le 16 janvier 1862 et comprenant les phases suivantes :

- a. **Admission :** la soupape d'admission s'ouvre et le piston qui se déplace entre le PMH et le PMB aspire le mélange air-carburant qui occupe progressivement le volume disponible. Au PMB, la soupape d'admission se ferme.
- b. **Compression-allumage :** Le piston évolue du PMB vers le PMH et comprime la charge jusqu'à une pression d'environ 10bar. L'étincelle électrique fournie par la bougie d'allumage, déclenche la combustion.
- c. **Combustion détente :** L'énergie dégagée provoque une élévation de pression jusqu'à 50-60bars ; le piston est repoussé vers le PMB, tandis que les soupapes restent fermées.
- d. **Echappement :** La soupape d'échappement s'ouvre quand le piston atteint le PMB ; les produits de combustion –appelés souvent gaz brûlés –sont évacués à l'extérieur par le piston qui revient au PMH, A ce moment la soupape d'échappement se ferme et le cycle recommence....

### II.4) Rendement effectif d'un moteur

Le fonctionnement du moteur réel n'est pas « parfait » contrairement au cycle théorique. Il y a donc des pertes diverses. Le rendement effectif ou global du moteur est égal au rapport de l'énergie recueillie sur l'arbre et de l'énergie susceptible d'être dégagée par combustion complète du carburant.

$$\eta_e = \text{travail effectif} / \text{énergie chimique du carburant}$$



$$\eta_e = 3.6 * 10^6 / \text{CSE} * \text{PCI}$$

$\eta_e$  s'obtient directement à partir de la mesure de la consommation spécifique effective (CSE) et du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du carburant. (CSE en  $\text{g.kWh}^{-1}$ , PCI en  $\text{j.g}^{-1}$ ).

$\eta_e$  traduit l'efficacité globale –plus précisément l'intérêt pour l'utilisateur – du procédé de conversion de l'énergie chimique du carburant en travail mécanique .Cependant  $\eta_e$  ne renseigne pas sur l'origine et la part relative des différentes pertes : limitations thermodynamiques, frottements, entraînements d'organes divers... [13]

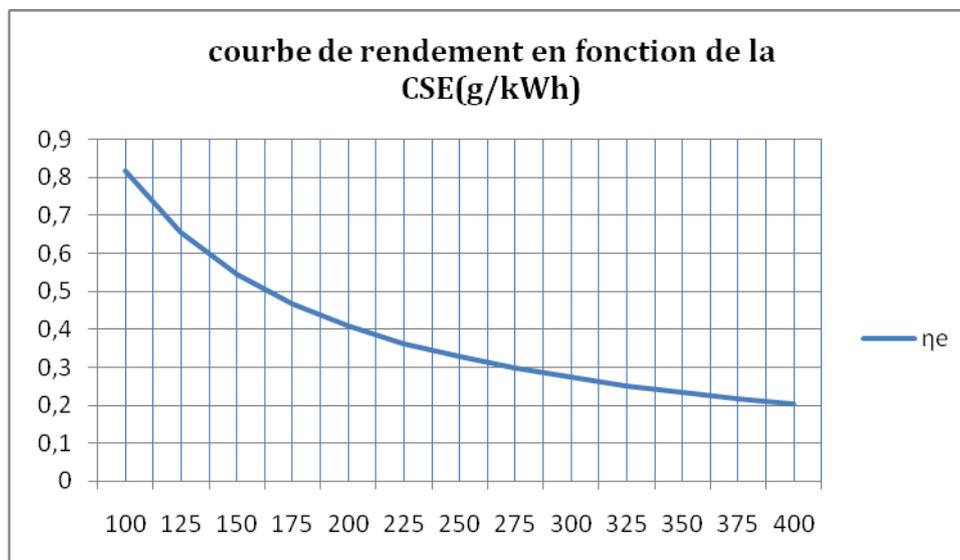
- **Moteur à essence :**

Le carburant utilisé dans ce type de moteur est l'essence. Nous avons calculé précédemment le pouvoir calorifique inférieur de l'essence  $PCI = 44.55 * 10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Le rendement effectif d'un moteur exprimé par la relation suivante :  $\eta_e = 3.6 * 10^6 / CSE * PCI$

$$\eta_e = 80.80 / PCI.$$

Nous pouvons ainsi tracer la courbe de rendement en fonction de la consommation spécifique du carburant :



- **Moteur DIESEL :**

$$\eta_e = 3.6 * 10^6 / CSE * PCI \Rightarrow \eta_e = 81.78 / CSE$$

Le rendement effectif d'un moteur Diesel est plus élevé car le taux de compression est plus élevé. Une plus grande proportion de chaleur est convertie en travail.

- Le rendement pour un moteur DIESEL peut atteindre les 40%.
- Par contre le rendement d'un moteur essence varie entre 25 et 30%.

**Remarque :** Le moteur Diesel présente un meilleur rendement grâce à l'augmentation du rapport volumétrique, donc la combustion est plus complète et la consommation spécifique est réduite (en moyenne de 200 g/kW/h contre 330 g/kW/h pour le moteur à essence).

### III) Conclusion

L'amélioration des carburants, des techniques de combustion, la généralisation des pots catalytiques et l'amélioration des rendements des moteurs ces dernières années ont fait que la voiture d'aujourd'hui pollue jusqu'à cent fois moins que celle d'il y a 20 ans. Et cette tendance devrait continuer à s'affirmer puisque les normes de rejets de polluants à la sortie de l'échappement des véhicules connaissent une sévèrisation très importante.

Par contre, l'évolution des rejets de gaz à effet de serre et de la consommation d'énergie des transports routiers est très loin de suivre la même tendance. Cette tendance devrait continuer à s'affirmer à l'avenir puisque l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) prévoit une croissance des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 90 % à l'horizon 2030, attribuable au secteur des transports et en très grande majorité aux transports routiers. Nous allons détailler le cas de l'Algérie dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE III :

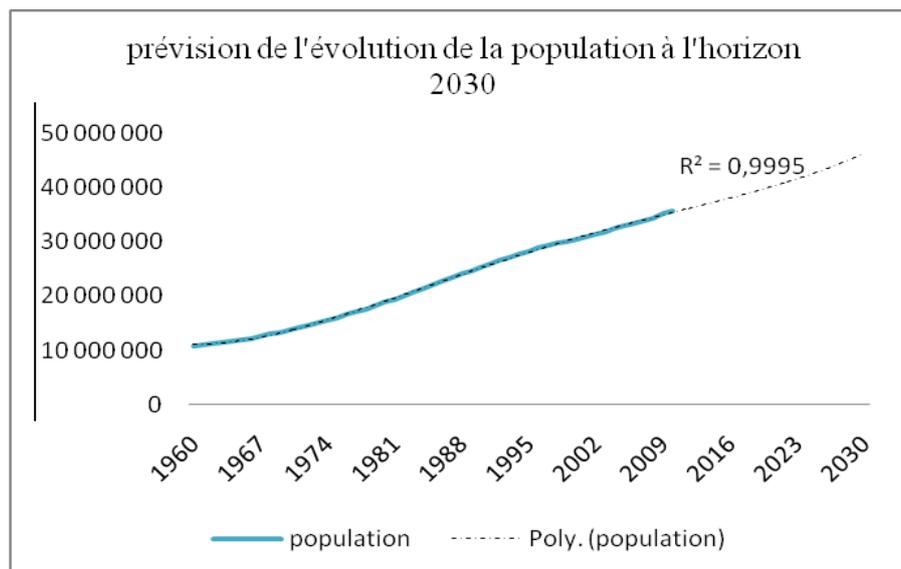
Modélisation et prévision de la  
consommation des carburants  
routiers en Algérie à l'horizon 2030.

## I) Introduction

Les capacités nationales de raffinage risquent de ne plus être suffisantes pour satisfaire la demande nationale en carburants. Pour cela; nous allons prévoir l'évolution de la consommation des carburants routiers en élaborant un modèle expliquant le mieux sa progression. Tout d'abord, nous allons présenter le scénario le plus simple « fil de l'eau »

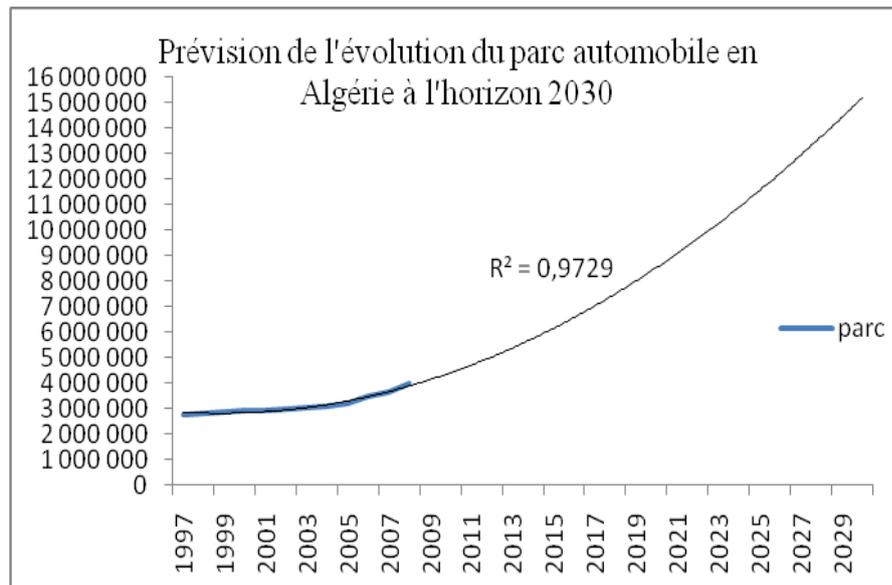
## II) Scénario fil de l'eau

Sur la base des données de la Banque Mondiale jusqu'en 2009, nous avons appliqué le scénario fil de l'eau pour la population. Cela veut dire une prolongation de la tendance actuelle. Toute chose égale par ailleurs (Pas de perturbation majeure).

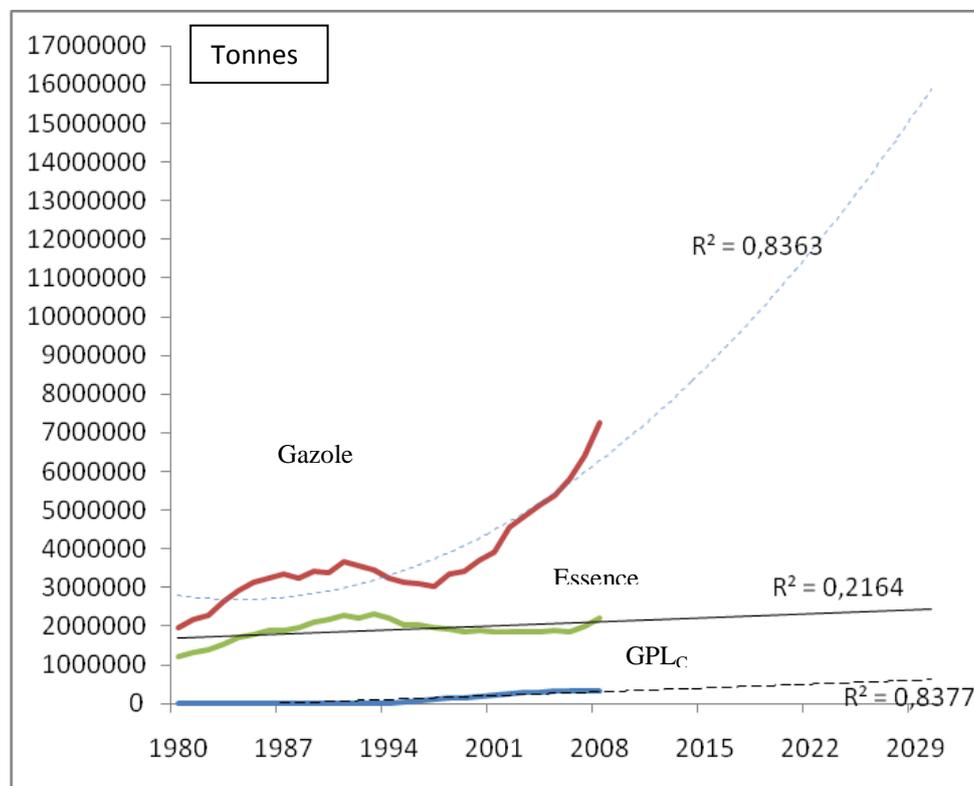


**Figure 16:** Prévision de l'évolution de la population à l'horizon 2030 selon le scénario fil de l'eau

A partir des données de l'Office National des Statistiques, le parc algérien a atteint 4 millions de véhicules en 2008 soit un véhicule pour 8 habitants. A titre de comparaison aux Etats-Unis il y a quatre véhicules pour cinq personnes. En Chine il ya un véhicule pour 50 personnes.



**Figure 17:** Prévision de l'évolution du parc automobile en Algérie à l'horizon 2030 selon le scénario fil de l'eau



**Figure 18:** Prévision de l'évolution de la consommation des carburants routiers à l'horizon 2030 selon le scénario fil de l'eau

Selon le scénario « fil de l'eau ». La population algérienne est supposée atteindre 47 millions de personnes en 2030. D'autre part ; le parc automobile devrait franchir la barre des 16 millions de véhicules. Ce qui amènerait un véhicule pour trois habitants. Par ailleurs, la consommation des carburants connaîtra une forte augmentation notamment pour le gazole qui reste prééminent par rapport aux autres carburants routiers si on ne fait rien pour inverser la tendance. Dans ce cas l'Algérie aura à importer beaucoup de gazole. En aura-t-elle les moyens ?

Ce scénario appelé aussi « laisser faire » n'est pas basé sur un modèle mathématique contenant des facteurs significatifs qui peuvent influer l'évolution de la consommation des carburants. De ce fait, nous allons utiliser la méthode dite « régression multiple » afin d'élaborer un modèle représentant le mieux la réalité tout en introduisant des variables jugées susceptibles de l'expliquer.

### III) Modélisation par la méthode des régressions multiples [19]

La modélisation est une représentation virtuelle de phénomènes réels à partir d'algorithmes et de modèles mathématiques. La modélisation permet de refaire « virtuellement », et à volonté, une expérience en modifiant toutes les données opératoires et géométriques.

#### III.1) Présentation du modèle

Un modèle de régression multiple s'écrit de la manière suivante

$$y_i = b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + b_3 x_{3i} + \dots + b_K x_{Ki} + \varepsilon_i \quad \text{avec:}$$

$i = 1 \dots n$ ,  $n$  étant le nombre d'observation.

$y_i$  : la variable expliquée (variable endogène)

$x_{ki}$  : les variables explicatives (variables exogènes)  $k = 1, \dots, K$

$b_1, b_2, b_3, \dots, b_K$  : Les paramètres du modèle

$\varepsilon_i$  = erreur de spécification (différence entre le modèle vrai et le modèle spécifié)

Sous forme matricielle lorsque le modèle s'écrit:

$$\begin{matrix} \mathbf{Y} & = & \mathbf{X} & \mathbf{B} & + & \boldsymbol{\varepsilon} \\ \text{(N,1)} & & \text{(N,K)} & \text{(K,1)} & & \text{(N,1)} \end{matrix} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{21} & \cdot & \cdot & x_{K1} \\ 1 & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{K2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{2N} & \cdot & \cdot & x_{KN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_N \end{pmatrix}$$

Le terme  $\varepsilon$  mesure la différence entre les valeurs réellement observées  $Y_t$  et les valeurs qui auraient été observées si la relation spécifiée avait été rigoureusement exacte.

### Les composantes d'une série chronologique

Dans un premier temps, l'examen graphique de la série étudiée permet d'extraire, un certain nombre de composantes fondamentales de l'évolution de la grandeur étudiée. Il faut alors analyser ces composantes, en les dissociant les unes des autres, c'est-à-dire en considérant une série comme résultant de la combinaison de différentes composantes.

**La tendance** ou « trend » censée décrire le mouvement de long terme, de fond ou encore structurel du phénomène. Ce mouvement est traditionnellement représenté par des formes analytiques simples : polynomiales, logarithmiques, exponentielles, cycliques, logistiques.

**La composante cyclique** : notée C qui regroupe des variations à période moins précise autour de la tendance. Ces phases durent généralement plusieurs années, mais n'ont pas de durée fixe. Sans informations spécifiques, il est généralement très difficile de dissocier la tendance du cycle. Dans la plupart des travaux sur les séries temporelles la tendance regroupe aussi la composante cyclique.

**La composante saisonnière** : ou variations saisonnières notées S sont des variations se reproduisant périodiquement à des moments bien déterminés.

### Estimation des paramètres du modèle :

#### Hypothèses :

**H<sub>1</sub>** : le modèle est linéaire en  $x_{it}$  (ou n'importe quelle transformation de  $x_{it}$ )

**H<sub>2</sub>** : les valeurs  $x_{it}$  sont observées sans erreurs ( $x_{it}$  non aléatoire) ;

**H<sub>3</sub>** :  $E(\varepsilon_t) = 0$  : l'espérance mathématique de l'erreur est nulle .

**H<sub>4</sub>** :  $E(\varepsilon_t^2) = \sigma^2$  : la variance de l'erreur est constante .

**H<sub>5</sub>** :  $E(\varepsilon_t, \varepsilon_s) = 0$  si  $t \neq s$  : les erreurs sont non corrélées ( ou encore indépendantes) : une erreur à l'instant 't' n'a pas d'influence sur les erreurs suivantes (absence d'autocorrélation).

**H<sub>6</sub>** :  $Cov(X_t, \varepsilon_t) = 0$ : l'erreur est indépendante de la variable explicative.

## III.2) Modélisation de la consommation du gazole

Après avoir posé les hypothèses précédentes ; nous proposons un modèle mettant en relation les variables exogènes suivantes : rapport-prix1 ; rapport-prix2 ; rapport-prix3; parc diesel ; parc essence ; la population avec la variable endogène qui est la consommation du gazole.

En effet ; nous avons estimé que ces variables peuvent avoir une influence très importante sur la consommation du gazole ; particulièrement le prix des carburants qui demeure en première position. Par exemple, si le prix de l'essence augmente, les gens vont se

diriger vers la consommation du gazole ou du GPLc. Il est de même pour le parc automobile et la population qui ont une influence positive sur l'évolution de la consommation du gazole.

- Rapport-prix1 : c'est le rapport entre le prix de l'essence et le prix du gazole.
- Rapport-prix2 : c'est le rapport entre le prix du GPLc et le prix du gazole.
- Rapport-prix3 : c'est le rapport entre le prix du GPLc et le prix de l'essence.
- P<sub>diesel</sub> : parc automobile utilisant le carburant diesel.
- P<sub>essence</sub> : parc automobile utilisant le carburant essence.
- Pop : la population.

### Le modèle linéaire simple

$$C_{\text{gazole}}(t) = \beta_0 + \beta_1 \text{ rapport-prix1} + \beta_2 \text{ rapport-prix2} + \beta_3 \text{ rapport-prix3} + \beta_4 \text{ pdiesel} + \beta_5 \text{ pessence} + \beta_6 \text{ pop} + \varepsilon t$$

$C_{\text{gazole}}(t)$  : La consommation du gazole à l'année  $t$  ;

### Méthode de régression pas à pas

Cette méthode consiste à introduire successivement des variables et choisir le meilleur modèle qui a le meilleur taux de réalité ( $R^2$ ) de telle sorte qu'avant toute introduction d'une variable supplémentaire, la signification des variables explicatives déjà présentes dans l'équation soit testée. Les variables qui n'apportent pas de contribution significatives sont éliminées.

**1<sup>ère</sup> étape de régression pas à pas** : Les étapes de la régression pas à pas sont résumées dans les tableaux suivants :

Modèles	Variables Explicatives	$R^2$	Modèle retenu ( $R^2$ max)	T-test (significativité des variables)	Variables retenues
<b>Modèle 1</b>	Rapport-Prix1	0.121631	<b>Modèle 4 :</b> $C_{\text{gazole}} = \beta_0 + \beta_1 * P_{\text{diesel}}$	<b>Pour le parc diesel :</b> t-static =(13.849) $\geq$ t-tabulée(=2.052)	<b>Parc diesel</b>
<b>Modèle2</b>	Rapport-Prix2	0.202223			
<b>Modele3</b>	Rapport-Prix3	0.283231			
<b>Modèle 4</b>	<b>P<sub>diesel</sub></b>	<b>0.876607</b>			
<b>Modèle 5</b>	P <sub>essence</sub>	0.636266			
<b>Modèle6</b>	Pop	0.694644			

**Tableau 1 : 1<sup>ère</sup> étape de régression pas à pas pour le gazole**

**Choix du modèle :** En comparant le taux de réalité ( $R^2$ ) des différents modèles ; nous remarquons que le modèle 4 qui correspond à la variable explicative parc-diesel a la meilleure valeur de  $R^2$  :

$$C_{\text{gazole}(t)} = \beta_0 + \beta_1 * P_{\text{diesel } t} + \varepsilon_t \text{ avec } R^2 = 0.876607$$

**Le T- Test :** D'après le T-Test, la variable parc diesel est significativement différente de zéro. La 1<sup>ère</sup> variable retenue est donc la variable « parc diesel ».

## 2<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas

Modèles	Variabes Explicatives	$R^2$	Modèle retenu ( $R^2$ max)	T-test (significativité des variables)	Variabes retenues		
<b>Modèle 1</b>	<b>Pdiesel</b> <b>Rapport-Prix1</b>	<b>0.912612</b>	Modèle 1 : $C_{\text{gazole}(t)} = \beta_0 + \beta_1 * P_{\text{diesel}} + \beta_2 * \log \text{prix1}$	<b>Pour le parc diesel :</b> t-statistic =(15.340) $\geq t$ - tabulée = (2.056)	<b>Parc diesel</b>		
<b>Modèle 2</b>	Pdiesel Rapport-Prix2	0.889284				<b>Pour Rapport- prix1 :</b> t- Statistic=(3.273) $\geq t$ - tabulée = (2.056)	<b>Rapport-Prix1</b>
<b>Modèle 3</b>	Pdiesel Rapport-Prix3	0.931971				<b>Pour Rapport -prix3 :</b>  t- statistic=(-4.599) $\leq t$ - tabulée = (2.056)	
<b>Modèle 4</b>	Pdiesel Pessence	0.886332					
<b>Modèle 5</b>	Pdiesel pop	0.887601					

**Tableau 2 : 2ème étape de regression pas à pas pour le gazole**

**Choix du modèle :** Nous remarquons que la meilleure valeur de  $R^2$  est celle qui correspond aux variables explicatives : parc diesel et rapport-prix3. Or la variable rapport-prix3 est non significativement différente de zéro. Donc le modèle qui a le meilleur taux de réalité est bien le modèle 1 ayant comme variable « parc-diesel ; rapport-prix1 » qui sont toutes les deux significativement différentes de zéro (t- statistic  $\geq t$ - tabulée). Donc notre modèle s'écrit comme suit :

$$C_{\text{gazole}(t)} = \beta_0 + \beta_1 * P_{\text{diesel } t} + \beta_2 * \text{Rapport -prix1} + \varepsilon_t \text{ avec } R^2 = \mathbf{0.912612}$$

**Le - Test :** D'après le T-Test, les variables parcs diesel et rapport-prix1 sont significativement différentes de zéro. Dans cette étape, les variables retenues sont donc :  $P_{\text{diesel}}$  et rapport-prix1.

3<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas

Modèles	Variabes Explicatives	R <sup>2</sup>	Modèle retenu (R <sup>2</sup> max)	T-test (significativité des variables)	Variabes retenues
<b>Modèle 1</b>	Pdiesel Rapport -Prix1 Rapport -prix2	0.914270	Modèle 1 : $C_{gazole} = \beta_0 + \beta_1^* Pdiesel + \beta_2^* Rapport-prix1$	<b>Pour rapport-prix2:</b> t- statistic = (-0.695) $\leq t$ - tabulée = (2.060) <b>Pour rapport-prix3 :</b> t- Statistic=(-3.046) $\leq t$ - tabulée =(2.060) <b>pour pessence</b> t- statistic=(-1.681) $\leq t$ - tabulée =(2.060) <b>pour pop :</b> t- statistic=(-2.702) $\leq t$ - tabulée= (2.060)	<b>Parc diesel</b>  <b>Rapport-Prix1</b>
<b>Modèle 2</b>	Pdiesel Rapport -Prix1 Rapport -prix3	0.936266			
<b>Modèle 3</b>	Pdiesel Rapport -Prix1 Pessence	0.921494			
<b>Modèle 4</b>	Pdiesel Rapport -Prix1 pop	0.903807			

Tableau 3 : 3ème étape de régression pas à pas pour le gazole

**Choix du modèle :** Nous remarquons que la nouvelle variable explicative intégrée dans chaque modèle n'est jamais significative. En effet, d'après le t-test les variables rapport-prix2, rapport-prix3, parc essence et pop sont non significativement différentes de zéro (t- Statistic  $\leq$  t- tabulée). La procédure est donc arrêtée.

En conclusion, les variables retenues pour expliquer au mieux la consommation nationale du gazole sont :

- Le parc diesel (pdiesel) ;
- rapport prix essence/prix gasoil (prix1) ;

Le modèle s'écrit comme suit :  $C_{gazole(t)} = \beta_0 + \beta_1^* Pdiesel + \beta_2^* Rapport-prix1 + \varepsilon_t$  avec :  $R^2=0.912612$

## Tests et validation du modèle simple

- Estimation des paramètres du modèle

Sample: 1980 2008  
Included observations: 29

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	286754.7	286596.7	1.004055	0.3246
PDIESEL	4.638668	0.302377	15.34069	0.0000
PRIX1	111794.2	34156.31	3.273017	0.0030
R-squared	0.912612	Mean dependent var		3746613.
Adjusted R-squared	0.905890	S.D. dependent var		1237424.
S.E. of regression	379608.3	Akaike info criterion		28.62936
Sum squared resid	3.75E+12	Schwarz criterion		28.77081
Log likelihood	-412.1258	F-statistic		135.7625
Durbin-Watson stat	0.524836	Prob(F-statistic)		0.000000

- **La significativité globale du modèle**

Après avoir développé notre modèle ; nous devons vérifier la significativité globale du modèle de la régression obtenue, c'est-à-dire vérifier si l'ensemble des variables explicatives a une influence sur la variable à expliquer. Pour ce faire, il faudra comparer la F-statistique, fournie directement par *EViews*, avec la valeur lue dans la table de Fisher  $F(1, n-k-1)$ , où  $k$  représente le nombre de variables explicatives (dans notre cas  $k=2$ ) et  $n$  le nombre d'observations ( $n=29$ ). Autrement dit, il faudrait comparer la F-statistique à  $F(1, 26)$  lue dans la table de Fisher. Nous obtenons :

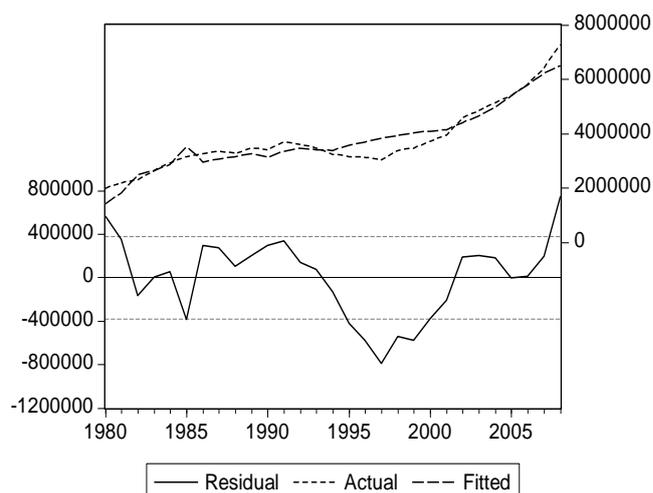
$F \text{ statistique} = 135.7625 \geq F(1, 26) = 4.23$ , ce qui permet de conclure que le modèle est globalement significatif, ceci est confirmé avec la probabilité de nullité ( $= 0.0000$ ) qui est inférieure à  $0.05$

- **La significativité des paramètres**

Les paramètres du modèle estimé ; sauf la constante sont significativement différents de zéro (la régression pas à pas fait que nous ne retenons que les variables significatives et que les variables non significatives sont rejetées).

- **Test sur les résidus**

La représentation graphique de la série résiduelle actuelle et estimée, fournie directement par *EViews* est la suivante :



A partir de cette représentation graphique, Nous constatons que le graphe de la série estimée est semblable à celui de la série réelle à quelques pics près, donc le modèle explique bien à **91.2612%** la variation totale de la variable dépendante.

## Test de Blancher des résidus

### 1. Test de Durbin- Waston

Le test de Durbin- Waston permet de détecter une autocorrélation des résidus. Le test d'hypothèse s'écrit comme suit :

$H_0 : \rho = 0$  (absence de corrélation).

$H_1 : \rho \neq 0$  (présence de corrélation).

La valeur DW de Durbin Waston, fournie par *EVIIEWS* est égale à **0.524836**. Les valeurs critiques, lues dans la table de Durbin- Waston au seuil 0.05, sont:  $d_1 = 1.27$  et  $d_2 = 1.56$ . Nous remarquons que :  $0 < DW < d_1$  Donc :  $H_0$  est rejetée  $\rho \geq 0$ . Il y a une autocorrélation.

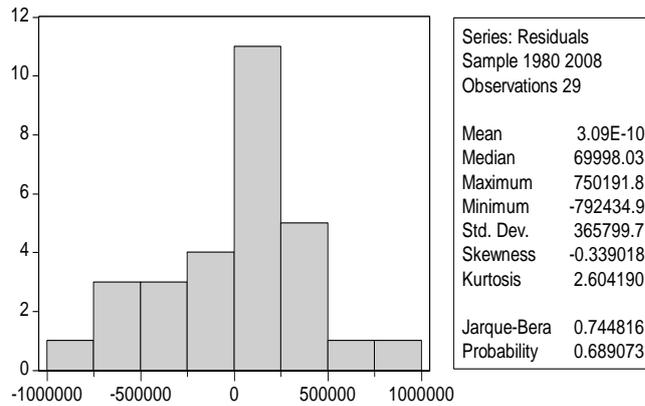
### Corrélogramme des résidus :

Sample: 1980 2008  
Included observations: 29

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
1	0.430	0.232	12.334	0.000	
2	0.387	0.004	17.314	0.000	
3	0.276	0.057	19.954	0.000	
4	0.069	-0.204	20.123	0.000	
5	-0.115	-0.156	20.617	0.001	
6	-0.157	0.002	21.580	0.001	
7	-0.298	-0.225	25.218	0.001	
8	-0.360	-0.065	30.755	0.000	
9	-0.326	-0.049	35.523	0.000	
10	-0.233	0.076	38.094	0.000	
11	-0.202	-0.076	40.130	0.000	
12	-0.098	0.023	40.636	0.000	

L'analyse du corrélogramme des résidus montre que tous les pics sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance, les résidus forment alors un bruit blanc.

- **Test de normalité sur les résidus :**



Le coefficient de Skewness (asymétrie) = -0.339018

Le coefficient de Kurtosis (aplatissement) = 2.604190

Sur cette base, nous construisons les statistiques centrées réduites correspondantes que nous les comparons à 1.96 qui représente la valeur de la loi normale, au seuil 5%, comme suit :

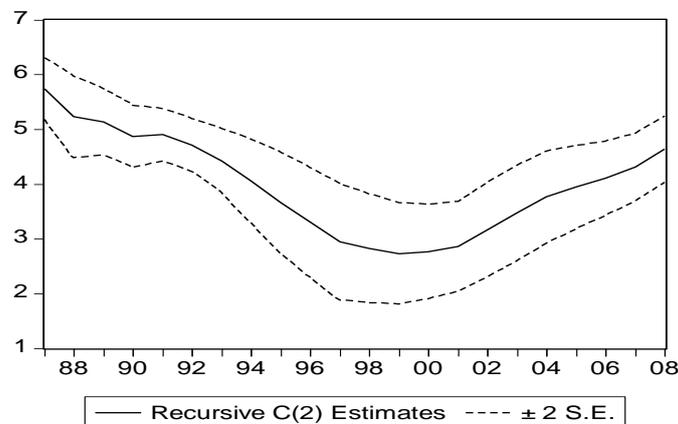
$$V1 = (\sqrt{0.339018} / \sqrt{6/29}) = 1.28 \leq 1.96$$

$$V2 = |(3 - 2.604190) / (\sqrt{24/29})| = 0.43 \leq 1.96$$

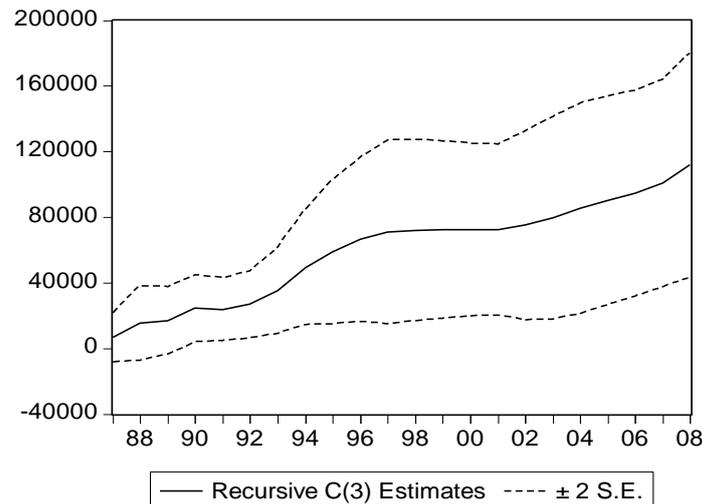
L'hypothèse de normalité est donc acceptée. Nous pouvons conclure alors que les résidus forment bien un bruit blanc gaussien.

- **Test de stabilité**

### Stabilité des coefficients



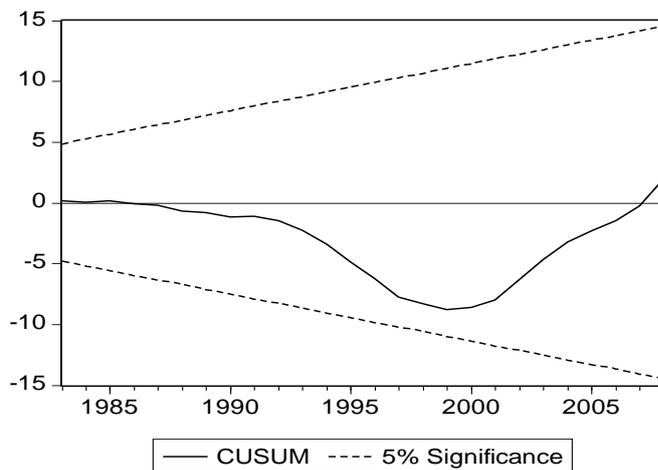
**Evolution du coefficient correspondant au parc diesel**



### Evolution du coefficient correspondant au rapport -prix1

Nous constatons que les 2 coefficients restent toujours à l'intérieur de leur intervalle de confiance, nous rejetons donc l'hypothèse d'un changement structurel.

- **Test sur la stabilité du modèle (Test de *CUSUM*)**



La statistique *CUSUM* reste toujours dans son intervalle de confiance, là encore nous rejetons l'hypothèse d'un changement structurel.

### III.3) Modélisation de la consommation du GPLc à l'horizon 2030

#### Modèle linéaire simple

$$C_{\text{GPLc}(t)} = \beta_0 + \beta_1 \text{prix-GPLc} + \beta_2 \text{prix-essence} + \beta_3 \text{prix-gasoil} + \beta_4 \text{taux} + \beta_5 \text{pop} + \varepsilon_t$$

$C_{\text{GPLc}(t)}$  : consommation du GPLc à l'année t.

Taux : taux de croissance du parc à l'année t .

**1<sup>ère</sup> étape de régression pas à pas :** Les étapes de la régression pas à pas sont résumées dans les tableaux suivants :

Modèles	Variables explicatives	R <sup>2</sup>	Modèle retenu (R <sup>2</sup> max)	T-test (significativité des variables)	Variables retenues
<b>Modèle 1</b>	Prix-GPLc	0.814479	<b>Modèle 2 :</b> $C_{GPL} = \beta_0 + \beta_1 * \text{prix-essence}$	<b>Pour le prix essence</b> t-static =(12.399) ≥ t-tabulée(=2.052)	<b>Prix essence</b>
<b>Modèle2</b>	<b>Prix-essence</b>	<b>0.850613</b>			
<b>Modele3</b>	Prix-Gasoil	0.802715			
<b>Modèle 4</b>	Taux	0.058222			
<b>Modèle 5</b>	Pop	0.734298			

**Tableau 4 : 1<sup>ère</sup> étape de régression pas à pas pour le GPL<sub>c</sub>**

**Choix du modèle :** En comparant le taux de réalité R<sup>2</sup> des différents modèles ; nous remarquons que le modèle 4 qui correspond à la variable explicative prix-essence a la meilleure valeur de R<sup>2</sup>:  $C_{GPLc t} = \beta_0 + \beta_1 * \text{prix-essence}_t + \varepsilon_t$  avec **R<sup>2</sup> = 0.850613**

**Le T- Test :** D'après le T-Test, la variable prix-essence est significativement différente de zéro. La 1<sup>ère</sup> variable retenue est donc la variable « prix essence »

**2<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas :**

Modèles	Variables Explicatives	R <sup>2</sup>	Modèle retenu (R <sup>2</sup> max)	T-test (significativité des variables)	Variables retenues
<b>Modèle 1</b>	Prix-essence Prix-GPLc	0.852481	<b>Modèle 3 :</b> $C_{GPLc} = \beta_0 + \beta_1 * \text{prix-essence} + \beta_2 * \text{taux}$	<b>Pour prix essence :</b> t-statistic =(15.386) ≥ t- tabulée = (2.056)  <b>Pour taux :</b> t- Statistic=(3.959)  ≥ t- tabulée = (2.056)	<b>Prix-essence</b>  <b>Taux</b>
<b>Modèle 2</b>	Prix-essence Prix-gasoil	0.859732			
<b>Modèle 3</b>	<b>Prix-essence</b> <b>Taux</b>	<b>0.906807</b>			
<b>Modèle 4</b>	Prix-essence Pop	0.849100			
<b>Modèle 5</b>	Pdiesel pop	0.887601			

**Tableau 5 : 2<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas pour le GPL<sub>c</sub>**

**Choix du modèle :** Nous remarquons que la meilleure valeur de  $R^2$  est celle qui correspond au modèle 3 « prix essence ; taux ». Donc notre modèle s'écrit comme suit :

$$C_{GPLC_t} = \beta_0 + \beta_1 * \text{prix-essence}_t + \beta_2 * \text{taux} + \varepsilon_t \text{ avec } R^2 = \mathbf{0.906807}$$

**Le T- Test :** D'après le T-Test, les variables prix-essence et taux sont significativement différentes de zéro. Dans cette étape, les variables retenues sont donc : prix-essence, taux.

**3<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas :**

Modèles	Variables Explicatives	$R^2$	Modèle retenu ( $R^2$ max)	T-test (significativité des variables)	Variables retenues
<b>Modèle 1</b>	Prix-essence taux prix-GPLC	0.914474	<b>Modèle 3 :</b> $C_{GPLC} = \beta_0 + \beta_1 * \text{prix-essence} + \beta_2 * \text{taux} + \beta_3 * \text{pop}$	<b>Pour prix essence :</b> t-Statistic=(2.404) $\leq$ t- tabulée =(2.060)	<b>Prix essence</b>  <b>taux</b> <b>pop</b>
<b>Modèle 2</b>	Prix-essence taux prix-gasoil	0.926590		<b>pour taux</b> t- statistic=(4.779) $\leq$ t- tabulée =(2.060)	
<b>Modèle 3</b>	<b>Prix-essence</b> <b>taux</b> <b>pop</b>	<b>0.924288</b>		<b>pour pop :</b> t- statistic=(3.113) $\leq$ t- tabulée= (2.060)	

**Tableau 5 : 3<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas**

**Choix du modèle :** Nous remarquons que la meilleure valeur de  $R^2$  est celle qui correspond au modèle contenant les variables explicatives suivantes : prix essence, taux et pop. Donc notre modèle s'écrit comme suit :

$$C_{GPLC_t} = \beta_0 + \beta_1 * \text{prix-essence}_t + \beta_2 * \text{taux} + \beta_3 * \text{pop} + \varepsilon_t \text{ avec } R^2 = \mathbf{0.924288}$$

**Le T- Test :** D'après le T-Test, les variables prix-essence et taux et pop sont significativement différentes de zéro. Dans cette étape, les variables retenues sont donc : prix-essence, taux et pop.

**4<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas :**

Modèle	Variables Explicatives	R <sup>2</sup>	Modèle retenu (R <sup>2</sup> max)	T-test (significativité des variables)	Variables retenues
<b>Modèle 1</b>	Prix-essence Taux pop prix-GPLc	0.969171	$C_{GPLc} = \beta_0 + \beta_1 * \text{prix-essence} + \beta_2 * \text{taux} + \beta_3 * \text{pop}$	<b>Pour prix gplc :</b> t-Statistic=(-5.659) ≤ t- tabulée =(2.064) <b>pour prix gasoil</b> t- statistic= (-3.804) ≤ t- tabulée =(2.064)	<b>Prix essence</b> <b>taux</b> <b>pop</b>
<b>Modèle 2</b>	Prix-essence Taux pop prix-gasoil	0.954337			

**Tableau 6 : 4<sup>ème</sup> étape de régression pas à pas**

**Choix du modèle :** Nous remarquons que la nouvelle variable explicative intégrée dans chaque modèle n'est jamais significative. En effet, d'après le t-test les variables prix-gasoil, prix-GPLc sont non significativement différentes de zéro (t-Statistic ≤ t- tabulée). La procédure est donc arrêtée. En conclusion, les variables retenues pour expliquer au mieux la consommation nationale du GPLc sont :

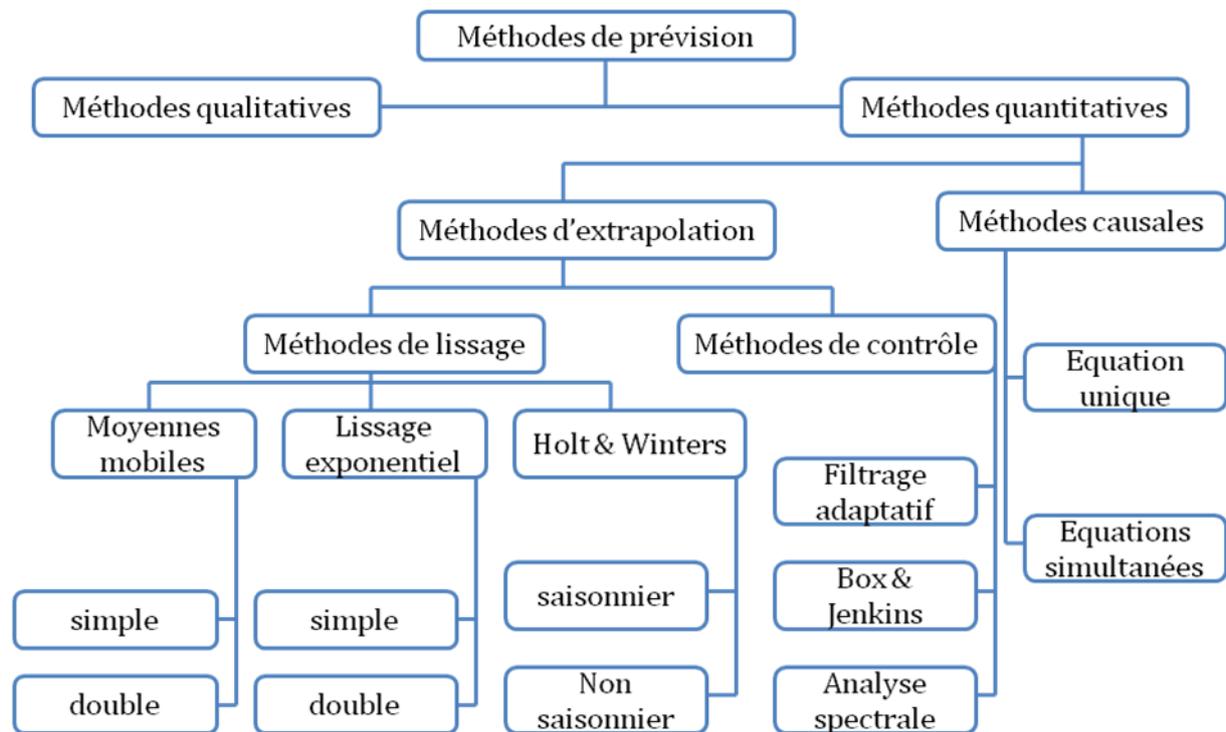
- Prix essence.
- Taux de croissance du parc.
- Population.

Le modèle s'écrit :  $C_{GPLc} = \beta_0 + \beta_1 * \text{prix-essence} + \beta_2 * \text{taux} + \beta_3 * \text{pop} + \varepsilon_t$  avec **R<sup>2</sup> = 0.924288**

**Remarque :** les différents tests Test et validation du modèle simple se font de la même manière que ceux du 1<sup>ier</sup> modèle de la consommation du gazole ; après avoir fait tous les tests, nous avons trouvé que notre modèle est valide.

**IV) Prévision**

La prévision vise à déterminer un événement futur à partir du regroupement systématique de données quantitatives. Elle est la base de certaines décisions, particulièrement dans le secteur des hydrocarbures. Pour cela nous nous sommes intéressées à prévoir l'évolution de la consommation nationale des carburants ; voire : le gazole et le GPLc à l'horizon 2030 afin de faire face à la demande, ou plutôt prendre des décisions pour réduire cette consommation.



#### IV.1 ) Choix d'une méthode de prévision

Lorsqu'il s'agit d'aborder un travail de prévision, la première chose à faire est de se demander quelles sont les méthodes utilisées. Il existe plusieurs types de techniques :

- **Techniques qualitatives** : Elles sont fondées sur le jugement personnel des spécialistes du marché. Citons entre autres les enquêtes DELFI, les études de marchés, le consensus de groupes, les analogies historiques de comparaison avec d'autres aéroports ou d'autres expériences.
- **Projection de tendances** : Il s'agit par exemple des analyses de séries temporelles ou des corrections de différents types de courbes en fonction de l'histoire du trafic. Ces techniques se fondent uniquement et exclusivement sur la variable explicative du temps.
- **Techniques causales (variables explicatives)** : Ce sont des techniques plus sophistiquées qui permettent de rechercher des variables expliquant le comportement du trafic. En effet, les prévisions ne sont plus uniquement fondées sur le temps, mais également sur la tendance d'un certain nombre de variables préalablement analysées et dont l'importance est reconnue dans l'évolution du trafic. Ces techniques englobent différents types d'analyses régressives, ainsi que les modèles économétriques.
- **Modèles de simulation** : Cette technique est de plus en plus utilisée à l'heure actuelle. Dans ces modèles, les variables explicatives ont un certain dynamisme.

#### IV.2 ) Calculs des prévisions

Notre modèle comporte les deux variables suivantes : parc-diesel et rapport-prix1 (rapport prix essence/prix gazole) donc pour prévoir la consommation du gazole nous devons d'abord faire un pronostic de ces variables. Leurs séries chroniques possèdent une tendance ; la théorie propose principalement quatre méthodes pour le traitement de ce genre de problèmes :

- Méthode du filtrage adaptatif.
- Méthode de Box & Jenkins.
- Méthode de Holt-Winters.
- Méthode du réseau de neurones.

Nous avons choisi de traiter notre série par la méthode de Holt-Winters. Ce choix est justifié par la rapidité et la simplicité de cette dernière; en outre l'écart entre les valeurs ajustées et les valeurs réelles n'est pas très important ; d'où la fiabilité de la méthode.

### Principe

La méthode de Holt-Winters fait partie des méthodes de lissage qui regroupe des techniques d'extrapolation qui ont pour caractéristique de donner plus de poids aux données récentes des séries chronologiques. Par exemple, il est plus plausible que la demande en carburants dépende davantage des ventes effectuées au cours des dernières années que des ventes effectuées il y a dix ans , En outre, les techniques de lissage se caractérisent par la simplicité de leurs calculs et par le petit nombre d'informations nécessaires à leur mise en œuvre.

Vu que nos séries ne présente pas de saisonnalité; nous avons utilisé la méthode de Holt-winters non saisonnière. Cette technique consiste en deux lissages exponentiels simultanés et utilise les deux paramètres ou coefficients, notés : a, b

$$a(t) = \alpha y_t + (1 - \alpha)(a(t - 1) + b(t - 1))$$

$$b(t) = \beta(a(t) - a(t - 1)) + 1 - \beta b(t - 1)$$

a est le paramètre de lissage global.

b est le paramètre de lissage de la tendance.

#### IV.2.1 ) Prévision de la consommation du gazole à l'horizon 2030

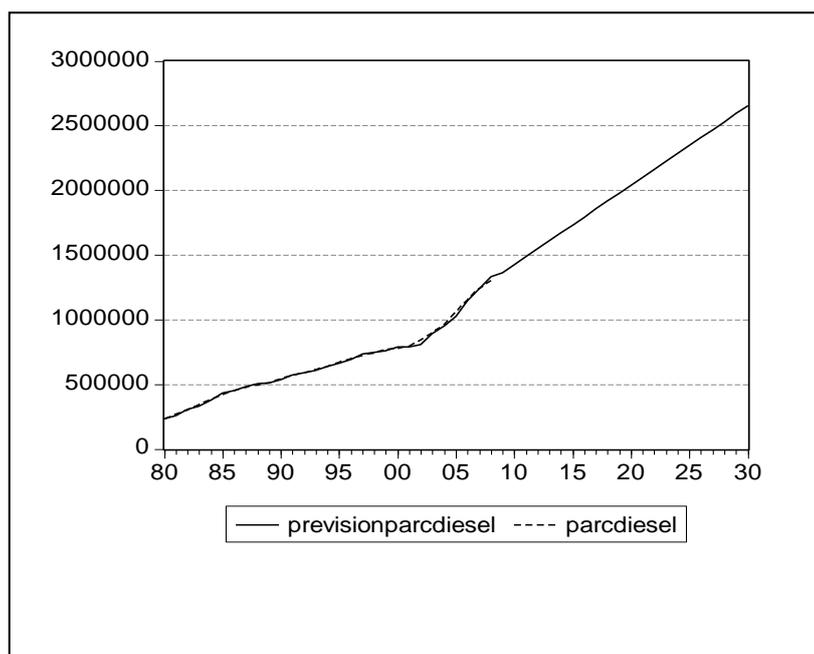
- Série P<sub>diesel</sub>

#### Examen du corrélogramme de la série pdiesel

Date: 06/10/10 Time: 08:40  
 Sample: 1980 2008  
 Included observations: 29

Les fonctions d'autocorrélation simple et partielle tendent lentement vers zéro, nous remarquons aussi de nombreux pics sortant de l'intervalle de confiance, ceci est caractéristique d'une série non stationnaire (présente une tendance). Nous pouvons donc appliquer la méthode de Holt-winters :

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1 0.855	0.855	23.463	0.000
		2 0.712	-0.071	40.333	0.000
		3 0.581	-0.037	52.006	0.000
		4 0.468	-0.018	59.872	0.000
		5 0.377	0.008	65.190	0.000
		6 0.300	-0.014	68.697	0.000
		7 0.234	-0.012	70.933	0.000
		8 0.179	-0.010	72.300	0.000
		9 0.121	-0.050	72.961	0.000
		10 0.062	-0.053	73.142	0.000
		11 0.006	-0.039	73.144	0.000
		12 -0.050	-0.054	73.278	0.000

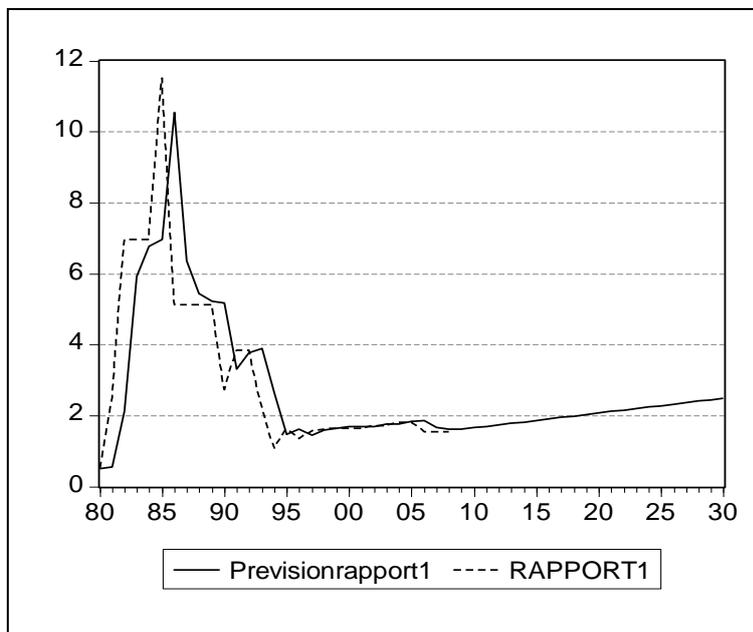


Années	Prévisions
2009	1362644
2010	1424040
2011	1485436
2012	1546832
2013	1608228
2014	1669624
2015	1731020
2016	1792416
2017	1853812
2018	1915208
2019	1976604
2020	2038000
2021	2099396
2022	2160792
2023	2222188
2024	2283584
2025	2344980
2026	2406376
2027	2467772
2028	2529168
2029	2590564
2030	2651960

**Figure19** : Prévision de l'évolution du parc automobile Diesel à l'horizon 2030

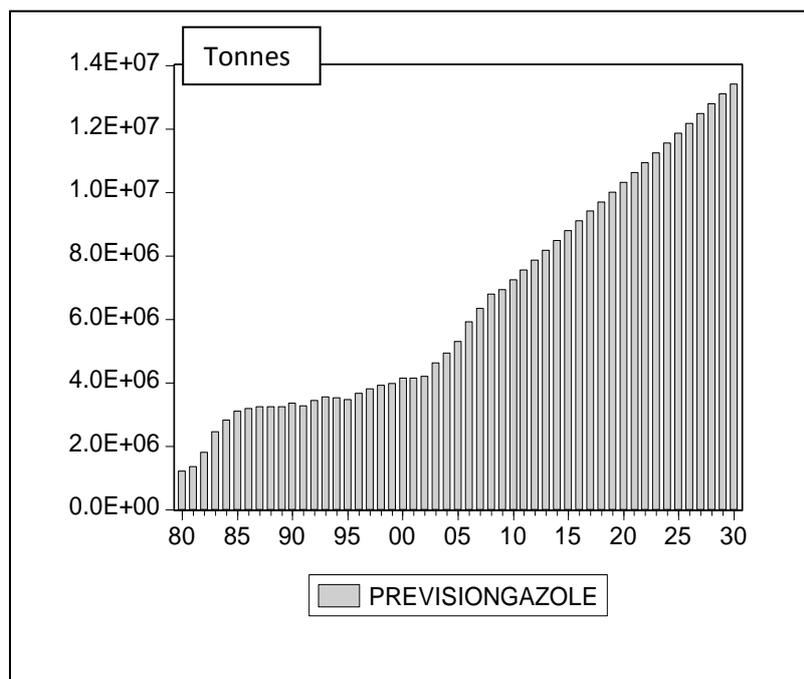
- **Rapport-prix1 :**

En analysant le corrélogramme de la série rapport-prix1 ; nous remarquons que la série présente une tendance d'où la possibilité de l'application de la méthode Holt-winters



**Figure 20 :** Prévision de l'évolution du rapport des prix « essence/diesel » à l'horizon 2030.

Année	Prévision
2009	1.60372575711
2010	1.64553085124
2011	1.68733594537
2012	1.7291410395
2013	1.77094613363
2014	1.81275122776
2015	1.85455632189
2016	1.89636141602
2017	1.93816651015
2018	1.97997160428
2019	2.02177669841
2020	2.06358179254
2021	2.10538688667
2022	2.1471919808
2023	2.18899707493
2024	2.23080216907
2025	2.2726072632
2026	2.31441235733
2027	2.35621745146
2028	2.39802254559
2029	2.43982763972
2030	2.48163273385



**Figure 21 :** Prévision de l'évolution de la consommation du gazole à l'horizon 2030

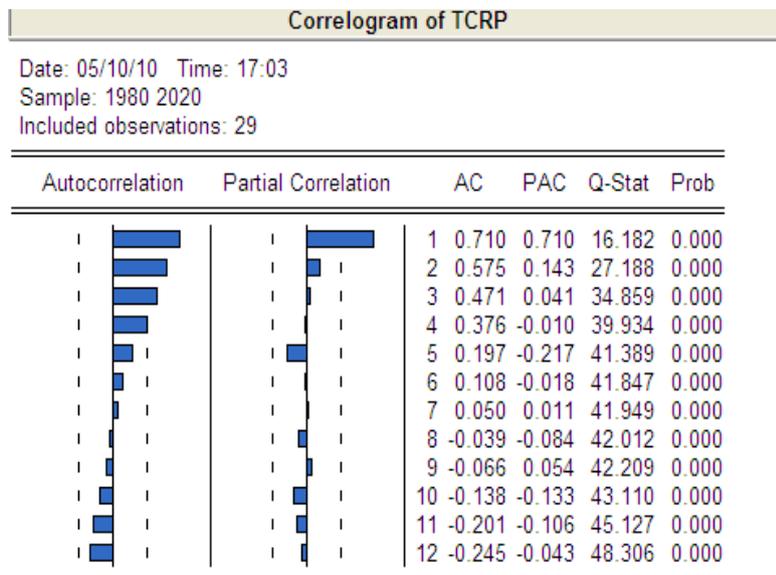
Années	Gazole
2009	6920711,28541
2010	7228331,25276
2011	7535951,2201
2012	7843571,18745
2013	8151191,1548
2014	8458811,12214
2015	8766431,08949
2016	9074051,05684
2017	9381671,02419
2018	9689290,99153
2019	9996910,95888
2020	10304530,9262
2021	10612150,8936
2022	10919770,8609
2023	11227390,8283
2024	11535010,7956
2025	11842630,763
2026	12150250,7303
2027	12457870,6977
2028	12765490,665
2029	13073110,6324
2030	13380730,5997

Le modèle que nous avons trouvé pour prédire l'évolution de la consommation du gazole contient les deux variables explicatives « rapport des prix (essence/gazole) et parc diesel ». Ces variables ont une influence positive sur cette consommation.

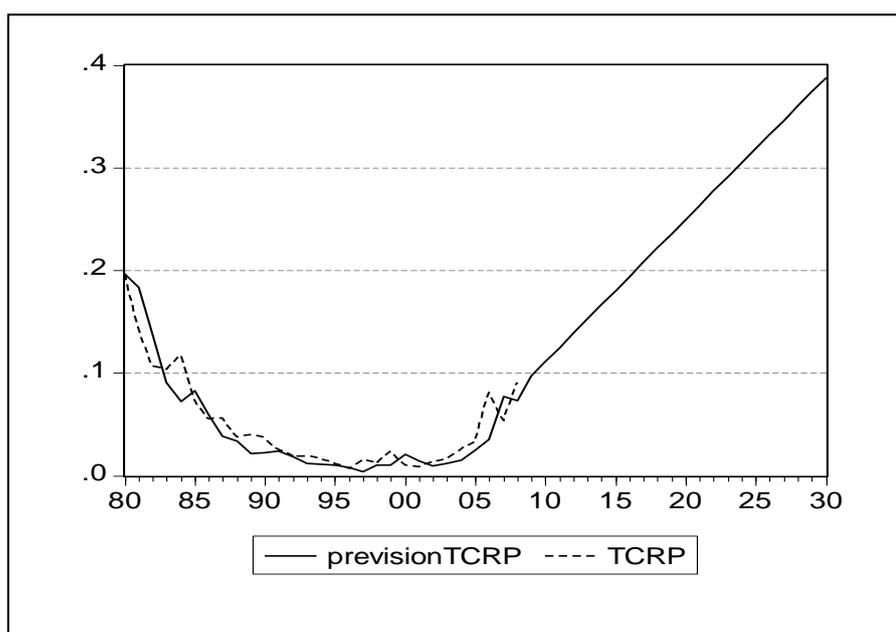
En effet, il est très logique que la consommation du gazole augmente suite à un accroissement du parc diesel, il en est de même pour le rapport des prix, vu que les gens se dirigent toujours vers le carburant le moins cher. De ce fait, en 2030 la consommation du gazole est prévue atteindre 13.38 millions de tonnes.

## IV.2.2) Prévision de la consommation du GPLc à l'horizon 2030

### ○ Prévision taux de croissance du parc

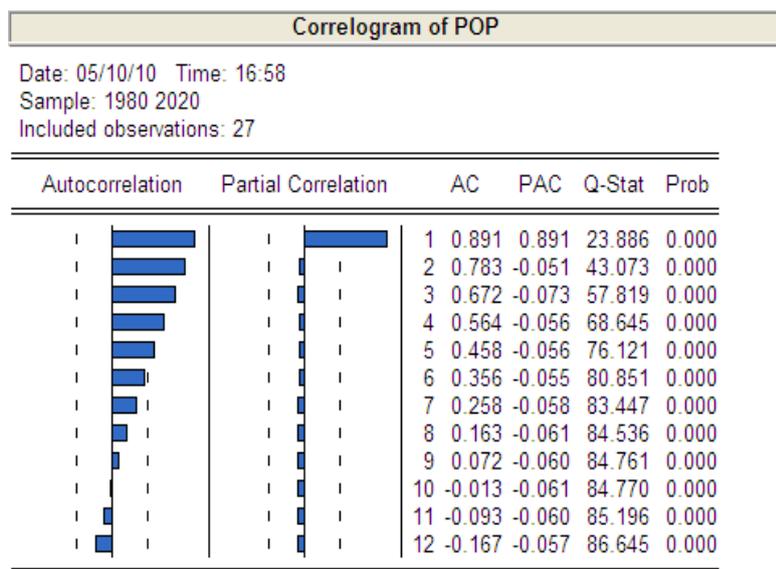


Les fonctions d'autocorrélation simple et partielle de cette série tendent lentement vers zéro, nous remarquons aussi de nombreux pics sortant de l'intervalle de confiance, ceci est caractéristique d'une série non stationnaire (présente une tendance). Puisque la série présente une tendance ; nous pouvons donc appliquer la méthode de Holt-winters :

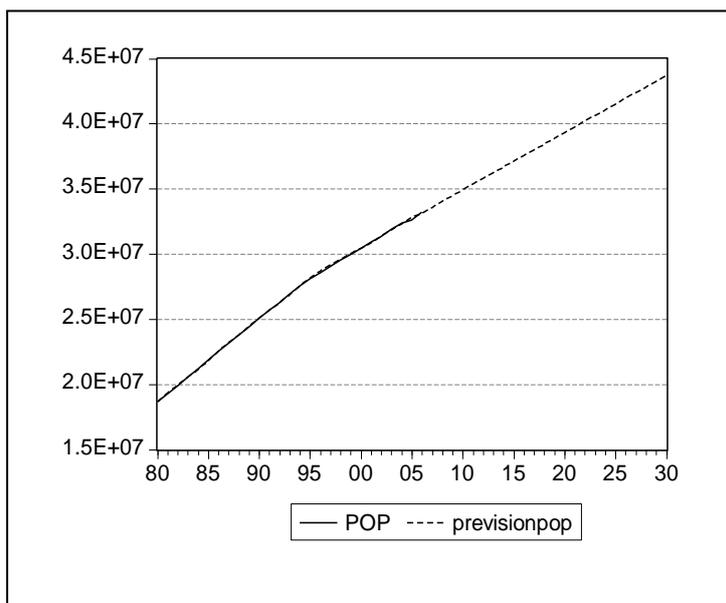


**Figure 22** : Prévision de l'évolution du taux de croissance du parc à l'horizon 2030

○ **Prévision de la population**



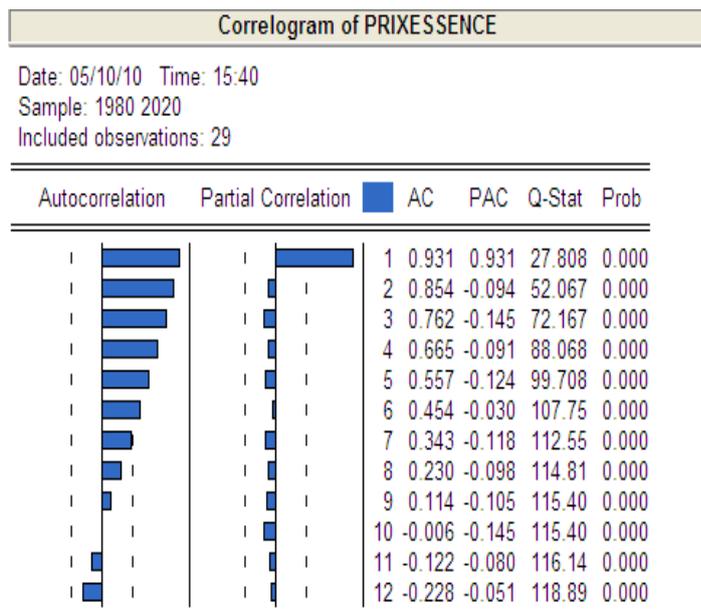
Les fonctions d'autocorrélation simple et partielle de cette série tendent lentement vers zéro, nous remarquons aussi de nombreux pics sortant de l'intervalle de confiance, ceci est caractéristique d'une série non stationnaire (présente une tendance). Puisque la série présente une tendance ; nous pouvons donc appliquer la méthode de Holt-winters :



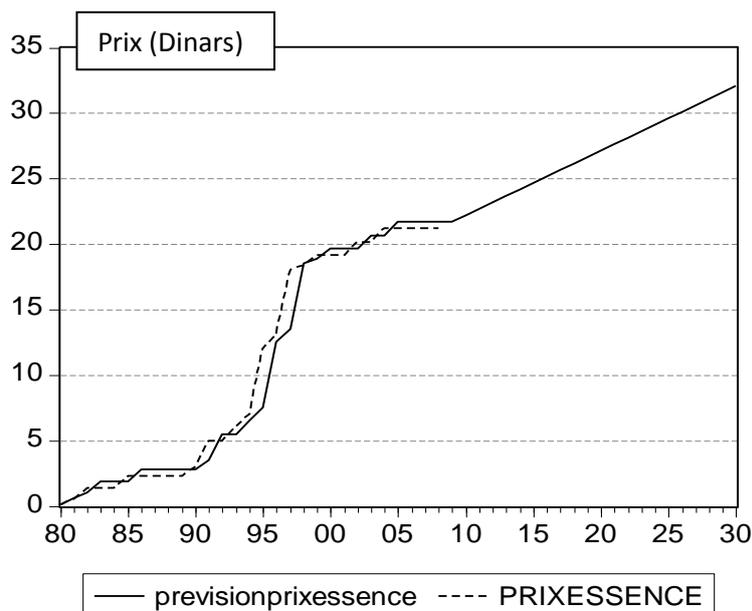
**Figure 23 :** Prévision de l'évolution de la population à l'horizon 2030

Année	Prévision
2009	34468194.7783
2010	34907171.8237
2011	35346148.8692
2012	35785125.9147
2013	36224102.9601
2014	36663080.0056
2015	37102057.0511
2016	37541034.0965
2017	37980011.142
2018	38418988.1875
2019	38857965.2329
2020	39296942.2784
2021	39735919.3239
2022	40174896.3693
2023	40613873.4148
2024	41052850.4603
2025	41491827.5058
2026	41930804.5512
2027	42369781.5967
2028	42808758.6422
2029	43247735.6876
2030	43686712.7331

○ **Prévision prix-essence :**

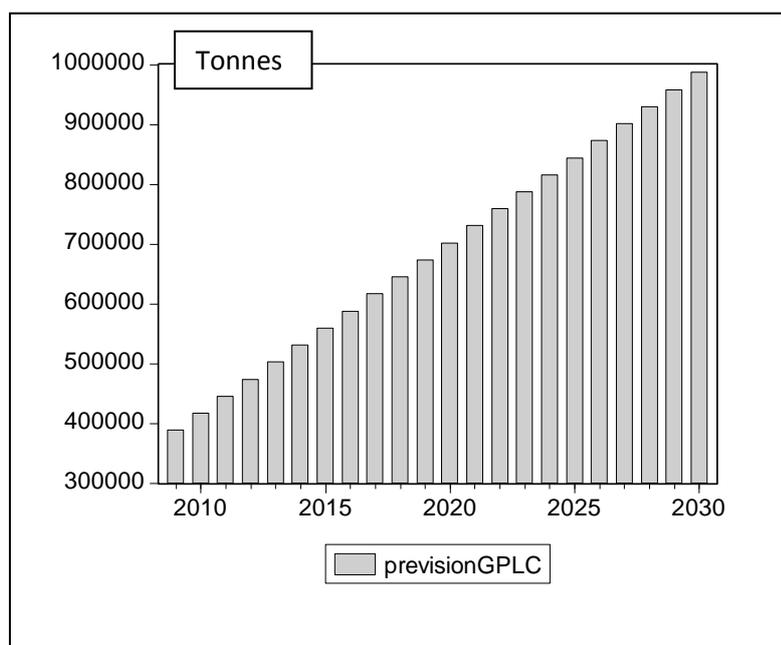


Les fonctions d'autocorrélation simple et partielle tendent lentement vers zéro, nous remarquons aussi de nombreux pics sortant de l'intervalle de confiance, ceci est caractéristique d'une série non stationnaire (présente une tendance). Puisque la série présente une tendance ; nous pouvons donc appliquer la méthode de Holt-winters :



Année	Prévision
2010	22.1857
2011	22.6785
2012	23.1714
2013	23.6642
2014	24.1571
2015	24.6500
2016	25.1428
2017	25.6357
2018	26.1285
2019	26.6214
2020	27.1142
2021	27.6071
2022	28.1000
2023	28.5928
2024	29.0857
2025	29.5785
2026	30.0714
2027	30.5642
2028	31.0571
2029	31.5500
2030	32.0428

**Figure 24 :** Prévision de l'évolution du prix de l'essence à l'horizon 2030



**Figure 25 :** Prévion de l'évolution de la consommation du GPLc à l'horizon 2030.

Année	Prévion Gplc
2009	387461.0766
2010	415971.6879
2011	444482.2993
2012	472992.9107
2013	501503.5220
2014	530014.1334
2015	558524.7448
2016	587035.3561
2017	615545.9675
2018	644056.5788
2019	672567.1902
2020	701077.8016
2021	729588.4129
2022	758099.0243
2023	786609.6357
2024	815120.2470
2025	843630.8584
2026	872141.4697
2027	900652.0811
2028	929162.6925
2029	957673.3038
2030	986183.9152

Le modèle que nous avons trouvé pour prévoir l'évolution de la consommation du GPL<sub>c</sub> contient les trois variables explicatives « population, taux de croissance du parc et prix essence ». Ces variables ont une influence positive sur cette consommation.

En effet, il est très logique que la consommation du GPL<sub>c</sub> augmente suite à un accroissement de la population qui par conséquent conduit à une élévation du parc. En 2030, la consommation du GPLc est prévue atteindre 986183.91tonnes.

## V) Conclusion

La demande nationale des carburants terre a connu un rythme de croissance élevé. Cette demande qui était de 600.000 tonnes en 1964 est passée à 5.9 millions de tonnes en 1999 pour finalement culminer à plus de 10 millions de tonnes en 2008.

Une rapide lecture des chiffres permet de constater la forte diésélisation du parc automobile. En vingt ans ; la consommation du gazole a pratiquement doublé pour atteindre un peu plus de 7 millions de tonnes en 2008 ce qui représente 75% de la consommation totale des carburants terre. Selon nos prévisions, cette demande est supposée atteindre les 13.38 millions de tonnes en 2030 tandis que la consommation du GPL<sub>c</sub> ne franchira pas la barre d'un million de tonnes, malgré que l'Algérie occupe des positions de leader mondial dans la production et dans la commercialisation de ce produit avec près de 9 millions de tonnes extraits ; séparés et livrés aux marchés intérieurs et extérieurs.

Plusieurs solutions existent afin de réduire la consommation et les rejets de polluants attribuables au parc automobile, mais quelle est la plus adéquate pour l'Algérie ?

La réponse à cette question se trouve dans le chapitre suivant...

## CHAPITRE IV :

Les solutions alternatives pour le  
secteur des transports routiers.

## I) Problématique

Les transports routiers utilisent presque exclusivement l'énergie primaire fossile (pétrole) dont les réserves sont limitées à une cinquantaine d'années et dont la combustion émet des gaz à effet de serre. Les défis majeurs de ce secteur sont principalement :

- Pollution de l'air : son implication sur la santé et l'environnement.
- Encombrements du trafic routier (surtout en ville) ; ce qui conduit à une surconsommation de carburant.
- Consommation : un point sensible avec la raréfaction du pétrole.

Il est donc nécessaire de réfléchir dès aujourd'hui à des solutions de substitution ou plutôt penser à les appliquer car elles existent déjà ; afin de lutter efficacement contre le réchauffement climatique et minimiser la gourmandise de ce secteur en pétrole.

Plusieurs procédés sont développés faisant appel à d'autres carburants. Les plus connus sont les GPL et le GNV issus principalement du gaz naturel, mais il en existe d'autres tels que les biocarburants (éthanol ou biodiesel).

Citons également le mélange de fuel et d'eau appelé « aquazole », composé de 85% de gazole ,13% d'eau et 2% d'additif chimique tensioactif nécessaire à la dilution de l'eau dans le gasoil, destiné aux poids lourds et autobus , et développé aujourd'hui par TOTAL Fina Elf. Or l'utilisation de ces carburants alternatifs, dont certains ne sont que des additifs aux combustibles classiques, ne permet pas de réduire de façon significative les émissions de gaz à effet de serre. [20]

Par conséquent, la recherche de solutions alternatives au moteur à explosion, essence et diesel est devenue nécessaire. Ces solutions passent par des énergies, sans ou à faible teneur en carbone, pouvant se substituer au pétrole, du moins venir en complément, et par des alternatives au moteur à combustion interne. Elles doivent être analysées au regard d'un bon compromis environnement/coût.

## II) Solution

### II.1) Les biocarburants

Le terme biocarburant désigne un carburant renouvelable constitué de dérivés industriels obtenus après transformation de produits d'origine végétale ou animale. On distingue d'une part, les biocarburants issus des organes de réserve de la plante, dits de première génération et d'autre part, des biocarburants issus de la plante entière (dont la partie lignocellulosique), dits de seconde génération. Les biocarburants se divisent entre les esters et les huiles d'une part et l'éthanol et les éthers d'autre part. [21]

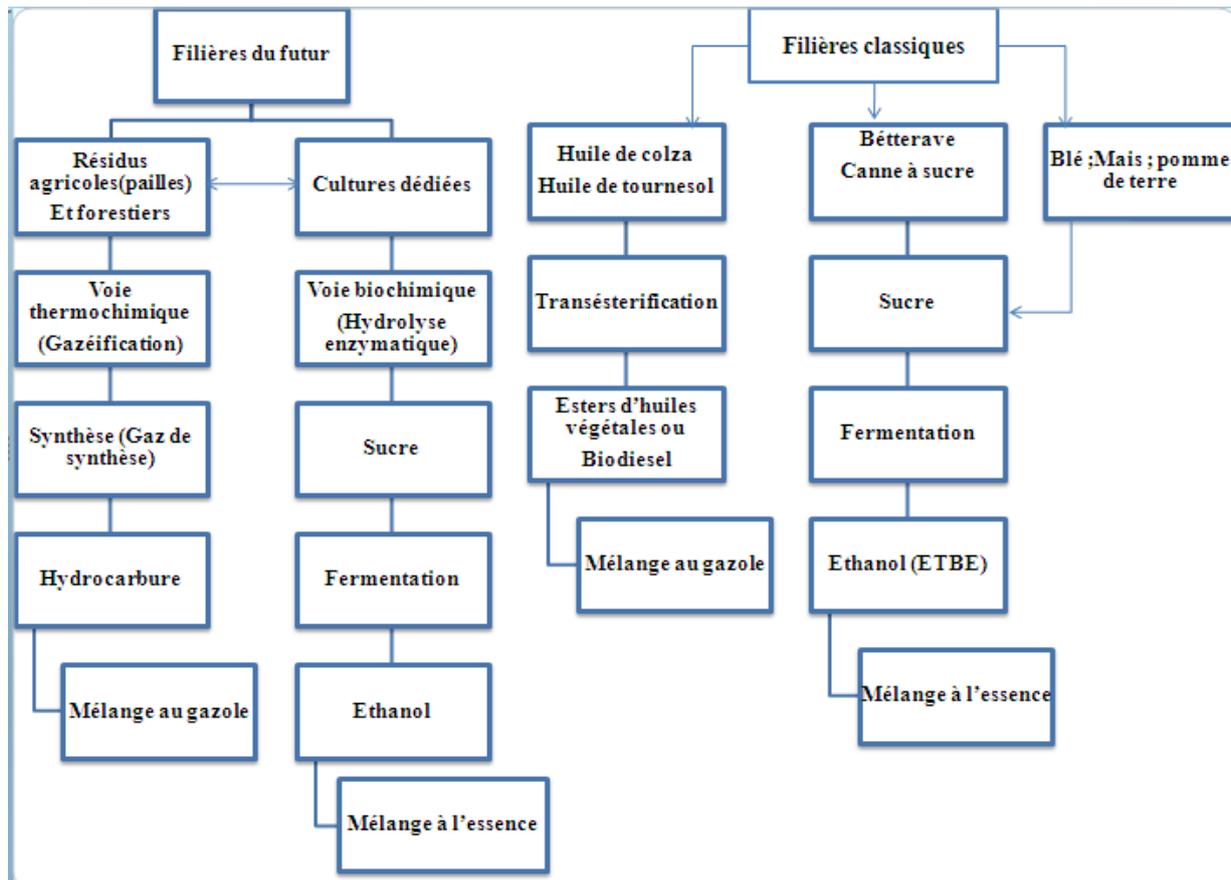


Figure 26: Filières de production des biocarburants (source : IFP)

### II.1.1) Filières de production des biocarburants

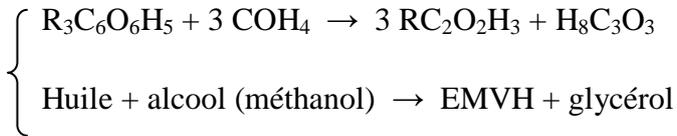
#### Biodiesel

Le biodiesel est un ester d'huile végétale. L'utilisation d'huile végétale comme carburant n'est pas une technique nouvelle. Rudolf Diesel, à l'origine, avait en effet développé le moteur qui porte son nom à l'aide d'huile d'arachide. Ces huiles végétales s'obtiennent classiquement par simple pressage de graines oléagineuses telles que le colza, le tournesol, le soja, etc. Des graisses animales ainsi que des huiles alimentaires usagées peuvent également être utilisées à cet effet. Ces huiles offrent cependant une trop forte viscosité et un indice de cétane (aptitude à l'auto-inflammation) trop faible, ce qui rend problématique leur utilisation directe dans un moteur diesel traditionnel. [20]

Afin d'obtenir des caractéristiques proches de celles du diesel d'origine pétrolière, ces huiles végétales vont subir une transestérification à l'aide d'alcool, principalement du méthanol (à noter que l'éthanol pourrait également être utilisé) pour donner de l'EMVH (Ester Méthylique d'Huile Végétale). Il est généralement utilisé en le mélangeant au diesel dans des proportions de 5 à 30% pour finalement donner du diester.

Cette réaction est obtenue à l'aide d'un catalyseur basique ou acide à température modérée (20-80°C) et à pression atmosphérique.

**Création du bio diesel :** La transestérification est une transformation chimique qui a pour équation bilan :



Nous remarquons que la création du biodiesel ne pollue pas. C'est une solution écologique.

En effet, si l'on brûle du biodiesel composé à 80% de gazole et 20% d'EMHV ; la pollution sera diminuée de 20%.

- **Bioéthanol** [22]

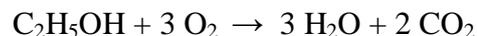
Le bioéthanol est obtenu par la fermentation du sucre extrait des plantes sucrières (canne à sucre, betterave..) ou par distillation de l'amidon du froment ou du maïs. La réaction de fermentation :



Nous remarquons qu'il y a formation de CO<sub>2</sub>, mais nous supposons qu'il est capté pendant la croissance du végétal. Il n'y a pas de création de CO<sub>2</sub> mais en quelque sorte rejet du CO<sub>2</sub> absorbé par la plante. La création du bioéthanol ne pollue pas.

### Combustion du bioéthanol

La combustion du bioéthanol est une réaction chimique caractérisée par l'équation bilan suivante :



La combustion du bioéthanol produit du CO<sub>2</sub> mais en plus faible quantité que la combustion de l'essence. Nous pouvons donc trouver un avantage à l'utilisation du bioéthanol.

**Remarque :** Ces biocarburants ne sont pas utilisés purs. Ils sont principalement introduits en faible quantité dans les essences et les gazoles. Le biodiesel est incorporé au gazole et l'éthanol est également incorporé à l'essence.

### II.1.2) Avantages et inconvénients

L'utilisation des biocarburants permet une réduction des émissions de gaz à effet de serre, même si le bilan peut varier fortement en fonction des espèces végétales utilisées et des modes de production. De plus, utilisés en mélange dans l'essence ou le gazole, ils ne nécessitent pas de réseau de distribution spécifique ni d'adaptation des véhicules.

Néanmoins, il reste quelques obstacles à leur diffusion : Le coût plus élevé de ces biocarburants que celui des carburants fossiles, et la difficulté de les produire en quantités suffisantes (notamment pour répondre aux objectifs de la directive Européenne) avec la concurrence du marché de l'alimentaire pour l'attribution des terres.

En résumé ; les biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération ne peuvent en aucun cas constituer une solution miracle de remplacement des carburants issus du pétrole. Les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération semblent plus prometteurs en matière d'efficacité énergétique, de réduction des émissions de GES et de respect de l'environnement. En particulier, la filière ligno-cellulosique permet de valoriser l'ensemble de la plante et pas seulement le sucre ou l'huile. Par contre la productivité nette par hectare reste faible. Ils ne seront sans doute pas non plus une solution à grande échelle pour remplacer les carburants fossiles. [21]

Il apparaît donc que les biocarburants, malgré leurs qualités, doivent être considérés seulement comme un moyen de diversification et de réduction de la consommation des carburants fossiles.

## II.2) L'hydrogène

Incolore, inodore, le dihydrogène possède un haut pouvoir énergétique de 120Mj.kg<sup>-1</sup>. Cependant sa légèreté lui confère un faible pouvoir volumétrique, ce qui pose un problème de transport et de stockage. Une caractéristique qui lui vaut mauvaise réputation est qu'il présente des risques d'inflammabilité et d'explosivité. Néanmoins, il a pour lui de se diffuser très vite dans l'air : en cas de fuite, l'hydrogène s'échappe vers le haut, sa concentration diminue rapidement, passant ainsi sous le seuil d'inflammabilité.

### II.2.1) Combustion de l'hydrogène

L'hydrogène réagit avec l'oxygène, libérant de l'eau et de la chaleur. Lors de la combustion de l'hydrogène dans l'air, on n'a aucune formation de dérivées carbonées, soufrées, cependant on a formation de faibles quantités de NO<sub>x</sub> du fait de la réaction de l'azote de l'air avec une partie de l'O<sub>2</sub>. L'équation de combustion complète de l'hydrogène dans l'oxygène est la suivante :  $H_{2(g)} + 1/2 O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$

### II.2.2) Filières de production de l'hydrogène [23]

L'hydrogène pur n'existant pas à l'état naturel ; il est combiné à l'oxygène dans l'eau ou avec du carbone dans les hydrocarbures, il faut une source d'énergie pour, en quelque sorte, l'extraire. Le bilan environnemental d'une filière hydrogène dépend en grande partie de la source d'énergie utilisée. L'hydrogène peut paradoxalement contribuer à une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> s'il est produit à partir d'énergie primaire fossile (pétrole, charbon, ou encore gaz naturel). Des recherches sont conduites pour pouvoir produire de l'hydrogène "renouvelable" issu de la biomasse (bois, déchets, etc.), ou avec de l'électricité ex-énergie renouvelable (centrales hydroélectriques et panneaux solaires) ou bien encore à partir d'énergie nucléaire.

- **Production d'hydrogène à partir des énergies fossiles**

L'hydrogène est produit à partir des combustibles fossiles par reformage : cette réaction chimique casse les molécules d'hydrocarbure sous l'action de la chaleur pour en libérer l'hydrogène. Le vaporeformage du gaz naturel est le procédé le plus courant : le gaz naturel est exposé à de la vapeur d'eau très chaude, et libère ainsi l'hydrogène qu'il contient. Mais la production d'hydrogène par reformage a l'inconvénient de rejeter du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère, cette technique se caractérise par un faible cout et un bon rendement énergétique.

Précisons que l'hydrogène -carburant- ne peut évidemment pas provenir d'unités de reformage de gaz naturel, car l'opération consomme de l'énergie fossile et produit plus de CO<sub>2</sub> que l'utilisation directe de gaz naturel comme carburant.

### **Production de l'hydrogène par décomposition de l'eau**

Une voie possible consiste à dissocier les atomes d'oxygène et d'hydrogène combinés dans les molécules d'eau (selon la réaction  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$ ).

Cette solution est la plus intéressante en termes d'émission de gaz à effet de serre... à condition toutefois d'opérer cette dissociation à partir de sources d'énergie elles-mêmes non émettrices de CO<sub>2</sub>. Parmi les procédés envisageables, deux sont actuellement à l'étude :

L'électrolyse et la dissociation de la molécule d'eau par cycles thermochimiques. L'électrolyse permet de décomposer chimiquement l'eau en oxygène et hydrogène sous l'action d'un courant électrique. Pour être rentable, ce procédé exige de pouvoir disposer de courant électrique à très faible coût. Actuellement, la production d'hydrogène par électrolyse coûte 3 à 4 fois plus cher que la production par reformage du gaz naturel. Elle souffre de plus d'un mauvais rendement global. L'électrolyse à haute température, qui est une amélioration de l'électrolyse classique, permettrait d'obtenir de meilleurs rendements. L'autre procédé de décomposition de la molécule d'eau par cycles thermochimiques permet d'opérer la dissociation de la molécule à des températures de l'ordre de 800° à 1 000 °C. De telles températures pourraient être obtenues par le biais de réacteurs nucléaires à haute température de nouvelle génération, actuellement à l'étude, ou de centrales solaires.

- **Production directe à partir de la biomasse**

La biomasse est une source de production d'hydrogène potentiellement très importante. Elle est constituée de tous les végétaux (bois, paille, etc.) qui se renouvellent à la surface de la Terre. L'hydrogène est produit par gazéification, laquelle permet l'obtention d'un gaz de synthèse (CO + H<sub>2</sub>). Après purification, celui-ci donne de l'hydrogène. Cette solution est attrayante car la quantité de CO<sub>2</sub> émise au cours de la conversion de la biomasse en hydrogène est à peu près équivalente à celle qu'absorbent les plantes au cours de leur croissance.

- **Production de l'hydrogène à partir des bactéries**

Des chercheurs étudient la possibilité de produire de l'hydrogène à partir de bactéries et de micro- algues. On a en effet découvert récemment que certains de ces organismes avaient la particularité de produire de l'hydrogène sous l'action de la lumière. Mais ce procédé n'en est aujourd'hui qu'au stade du laboratoire. [24]

### **II.2.3) Problèmes liés à l'utilisation de l'hydrogène**

La mise en œuvre de ce type de carburant pose des problèmes complexes, l'hydrogène stocké à bord des véhicules doit être, en effet, soit comprimé à environ 200 bars, soit maintenu sous forme liquide dans des réservoirs cryogéniques, soit encore transformé en hydrures métalliques.

Dans le premier cas, le dispositif mis en œuvre est simple, mais il est lourd et encombrant. Ainsi, la masse de l'ensemble réservoir + carburant est à quantité d'énergie égale, près de 25 fois plus élevée que dans le cas des carburants liquides classiques.

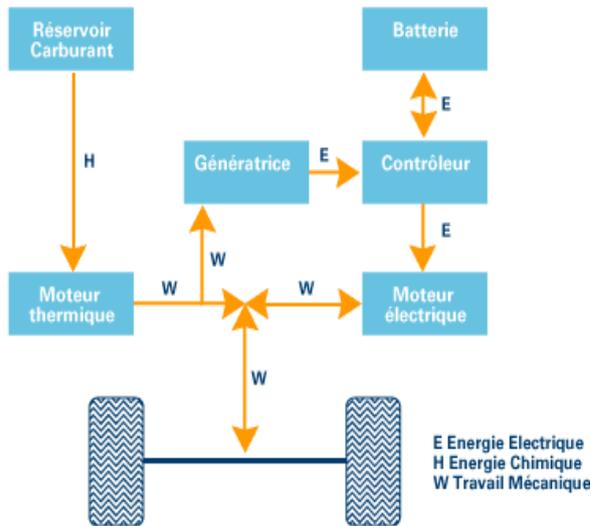
Dans le second cas, le rapport de masse ne s'élève qu'à 2 ; mais le dispositif est couteux (cryogénie) et complexe (maîtrise des pertes par évaporation). Avec les hydrures la capacité de stockage est relativement grande, mais il est nécessaire de disposer d'un système de régulation de la température. Lors du remplissage l'hydrogène se combine à des alliages appropriés (à base de magnésium, fer, titane, nickel, lanthane, cuivre....) ; pour former les hydrures du type  $Mg_2NiH_4$  ;  $MgH_2FeTiH_2$  ;  $Mg_2CuH_3$  . La réaction d'adsorption d'hydrogène doit s'effectuer sous pression (10 à 20 bar) ; elle exige un contrôle strict de l'exothermicité qui est très élevée. A l'inverse, le dégagement d'hydrogène est endothermique et nécessite un apport de chaleur modéré, par l'intermédiaire des gaz d'échappement ; par exemple. [20]

### **II.3) La voiture hybride [25]**

La voiture hybride est aujourd'hui un besoin qui se fait de plus en plus ressentir par les usagers de la route. En effet, les raisons d'opter pour l'achat d'une voiture hybride sont très justifiées. Que ce soit pour sa grande économie de carburant ou sa faible propagation d'émission de  $CO_2$ .

Ce schéma illustre les différents éléments d'un véhicule hybride :

## ■ Schéma véhicule hybride



L'idée d'installer deux moteurs sous le capot peut paraître peu rentable, compliquée et vouée à l'échec. Mais dans la pratique, elle peut permettre d'accroître le nombre de kilomètres parcouru avec un litre d'essence de plus de 12 %, tout en réduisant la pollution d'un tiers. Mieux, ces voitures offrent une conduite aussi satisfaisante, si ce n'est plus, que celles à essence.

### Principe de fonctionnement

La voiture hybride possède deux moteurs, un moteur classique (Diesel, essence ou gaz) qui fait tourner aussi un alternateur produisant de l'électricité stockée dans des batteries supplémentaires ; et un moteur électrique qui peut faire avancer la voiture.

- Lorsque le véhicule est immobilisé, aucun moteur ne fonctionne;
- Au démarrage, le moteur électrique assure la mise en mouvement de la voiture, jusqu'à des vitesses plus élevées (25 ou 30 km.h<sup>-1</sup>);
- Lorsque la vitesse plus grande est atteinte, le moteur thermique prend le relais;
- En cas de grande accélération, le système lance les deux moteurs en même temps afin d'obtenir une puissance plus grande;
- En phase de décélération et de freinage, l'énergie cinétique est utilisée pour recharger les batteries.

Quel est l'avantage par rapport à une voiture classique ?

L'idée est de faire fonctionner le moteur électrique dans les moments (démarrage, ralenti, vitesse lente) ou le moteur thermique classique surconsomme. A l'arrivée, la consommation de carburant, et donc d'émission de CO<sub>2</sub> et d'autres polluants, est considérablement réduite.

Quel avantage par rapport à une voiture entièrement électrique ?

Plus d'autonomie, car il n'y a pas besoin de nombreuses et lourdes batteries pour stocker l'électricité, ni d'immobiliser le véhicule plusieurs heures durant la recharge.

## II.4) Véhicule électrique [26]

### Principe de fonctionnement

Le principe de la voiture électrique est très simple : au lieu d'un moteur à explosion essence ou Diesel, alimenté en carburant stocké dans un réservoir, et dont la puissance est transmise aux roues au moyen d'une boîte de vitesses, la voiture électrique est propulsée par un moteur électrique, alimenté par des batteries, dont la puissance est régulée par un dispositif électronique de contrôle. Enfin, il faut que l'utilisateur dispose d'un réseau de distribution d'électricité pour pouvoir recharger les batteries de son véhicule quand il en a besoin.

Comme tout moteur, le moteur électrique a besoin d'une source d'énergie. Pour un moteur électrique, celle-ci est fournie soit par un câble, soit par des batteries qui stockent l'énergie électrique.

### Avantages

- Les véhicules électriques consomment l'électricité uniquement lorsqu'ils sont moteurs, c'est à dire qu'ils ne consomment aucune énergie à l'arrêt et peuvent même récupérer l'énergie cinétique pendant le freinage: les économies peuvent donc être réelles avec un moteur électrique. De plus l'électricité, en fonction de son origine de production, dégage plus ou moins de CO<sub>2</sub> pour être produite.
- Aucune émission d'hydrocarbures, de fumées ou de particules (du réservoir à la roue).
- Les batteries se rechargent pendant les phases de décélération.
- Les dépenses d'entretien sont réduites de 30 à 40 %.
- Les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- Le démarrage se fait toujours au quart de tour, même en hiver.
- Le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).
- Le moteur est parfaitement silencieux.

### Inconvénients

- Prix d'achat d'une voiture électrique est trop élevé.
- Faible autonomie (environ 100km).
- Longue durée de rechargement des batteries (plusieurs heures).
- Les batteries sont lourdes et encombrantes.
- Les batteries sont très chères (environ 5000 euros).
- Les batteries ont une durée de vie limitée (elle varie selon le type de la batterie).
- Le système de remplacement des batteries n'est pas installé.

- Les batteries usagées ne sont pas recyclables quand elles doivent être changées.
- Le plomb et l'acide sulfurique des batteries sont dangereux pour l'environnement.

## II.5) Véhicule à hydrogène [27]

Les véhicules à hydrogène sont des véhicules électriques qui produisent leur électricité à partir d'une pile à combustible : une solution des plus efficaces. Le moteur électrique est alimenté différemment en fonction des conditions de conduite :

- Par la pile seule à vitesse stabilisée comme sur l'autoroute,
- Par la pile et la batterie en cas d'accélération répétées comme la conduite urbaine.

La batterie sera rechargée par la pile ou bien par l'énergie récupérée lors des freinages, comme sur les voitures hybrides. Cette souplesse d'utilisation permet de réellement optimiser l'utilisation de l'énergie.

### II.5.1) La pile à combustible [28]

Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,...) en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique. La plus prometteuse des PAC pour équiper nos véhicules utilise la technologie des membranes échangeuses de protons (PEM pour Proton Exchange Membrane en anglais).

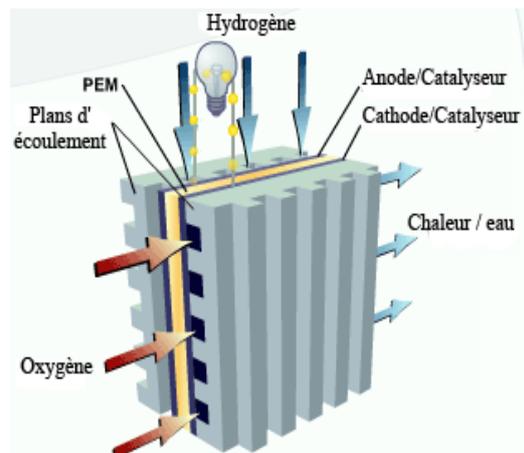
#### Principe de la pile à combustible

La transformation d'énergie chimique en énergie électrique dans la pile à combustible est basée sur une réaction d'oxydoréduction, dans laquelle l'hydrogène et l'oxygène réagissent pour former de l'eau.

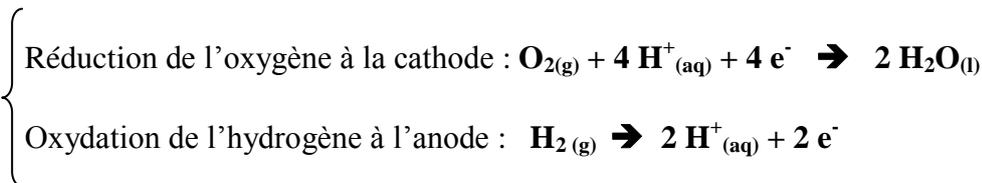
La pile à combustible est un générateur d'électricité transformant de l'énergie chimique d'un gaz ou liquide combustible en énergie électrique. Le combustible en question dans la plupart des cas est l'hydrogène. Il se combine avec l'oxygène pour former de l'eau selon la relation suivante :  $2 \text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

Cette relation correspond à celle de la combustion de l'hydrogène. La différence se trouve dans la forme d'énergie transformée. Elle n'est pas libérée uniquement sous forme de chaleur mais partiellement sous forme d'électricité. Pour arriver à cela, la combustion se produit à basse température à l'aide d'un catalyseur. Les éléments généralement utilisés sont le platine(Pt), le ruthenium(Ru) ou le nickel(Ni).

Pour mettre en œuvre cette réaction, on dispose de deux électrodes l'anode et la cathode. La clé de la technologie de la PAC est de séparer la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) de celle de réduction de l'oxygène (à la cathode) par un électrolyte (milieu bloquant le passage des électrons mais laissant circuler les ions). Cette réaction est déclenchée en utilisant un catalyseur.



### Les demi-équations d'oxydoréduction



Le bilan global donne donc :  $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{chaleur}$ .

Cette réaction est exothermique : à 25°C, l'enthalpie libre de la réaction est de -237 ou -229 kJ/mol selon que l'eau formée est liquide ou gazeuse. Ceci correspond à des tensions théoriques de 1,23 et 1,18 V. Cette tension dépend aussi de la température.

### Avantage

- Aucune émission polluante
- Un rendement plus élevé que celui du moteur thermique
- Un moteur électrique dynamique offrant un grand confort
- Electricité pour des applications additionnelles à bord
- Un mode de fonctionnement quasiment silencieux
- Un excellent bilan écologique global en cas d'utilisation d'hydrogène obtenu à partir d'énergies renouvelables.

## Inconvénients

- Le coût de fabrication des véhicules à hydrogène reste bien trop élevé et le coût pour la généralisation de l'hydrogène sur les stations services.
- L'hydrogène réagit avec l'oxygène, libérant de l'eau et de la chaleur (290 kJ/mol H<sub>2</sub>). Lors de la combustion de l'hydrogène dans l'air, on n'a aucune formation de dérivées carbonées, soufrées, cependant on a formation de faibles quantités de NO<sub>x</sub> du fait de la réaction de l'azote de l'air avec une partie de l'O<sub>2</sub>. Du fait de cette réaction, un des "problèmes" de l'hydrogène est le risque d'inflammabilité et d'explosibilité.

A cause de l'affaire Hindenburg (destruction du dirigeable Hindenburg en 1937), l'hydrogène jouit d'une mauvaise réputation.

## II.6) Voiture GPL<sub>c</sub>

La génération actuelle de moteurs d'automobiles alimentés au GPL<sub>c</sub> est dérivée directement du moteur à allumage commandé et fonctionne usuellement en bicarburation alternée GPL<sub>c</sub> et essence, après transformation réalisée par des ateliers spécialisés. Le véhicule est équipé de deux réservoirs distincts de carburant, le GPL<sub>c</sub> étant pour sa part stocké dans un réservoir en acier.

Plusieurs arguments font du GPL<sub>c</sub> le carburant le plus avantageux du marché. Entre autre, il concilie les indéniables atouts que sont l'écologie et le prix (le GPL est le carburant le moins cher à la pompe). Parmi les carburants alternatifs, le GPL<sub>c</sub> est le premier en nombre d'utilisateurs, avec plus de 13 millions de véhicules contribuant à la préservation de la planète. [29]

## II.7) Comparaison entre les différents modes de transport routiers en Algérie

Quel est le mode de transport le moins polluant ; le moins cher ; le moins consommateur d'énergie ? Afin de répondre à ces questions ; nous avons pensé à développer une application sous l'environnement MATLAB [30] ; qui a pour objet d'offrir à l'utilisateur une interface interactive très simple à utiliser; qui permet de calculer pour chaque mode de transport choisi : les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la quantité de carburant utilisée ainsi que la facture de ce dernier, en fonction de quelques paramètres que nous allons citer en dessous. Finalement, nous allons faire une comparaison entre ces modes de transport et montrer l'utilité du transport en commun en calculant la quantité de CO<sub>2</sub> émise par personne.

### Principe

L'utilisateur doit préciser :

- Son mode de transport.
- Le carburant utilisé.
- Le kilométrage.

- Pourcentage de conduite en ville ; et en autoroute.

L'utilisateur a le choix entre les modes de transport suivants :

- Voiture.
- L'avion.
- Le tramway.
- L'autobus.
- A pied (pas de carburant).
- Vélo (pas de carburant).

Les types de carburants sont :

- Essence.
- Diesel.
- GPL.
- Kérosène.
- Electricité.
- Pas de carburant.

**Hypothèse :** Afin de pouvoir caractériser chaque mode de transport, nous avons fait les hypothèses suivantes :

- **Transport aérien**

La flotte d'Air Algérie compte actuellement 33 avions dont 31 sont destinés au transport des passagers et deux avions-cargos. La flotte contient 10 avions de type BOEING 730-800. Nous allons modéliser notre flotte par le BOEING 737-800. Le BOEING 737-800 est un avion biréacteur (deux moteurs de type CFM56-7b, un sous chaque aile).

Consommation (d'un moteur) :  $2\,950\text{ l.h}^{-1}$

Vitesse de croisière moyenne :  $848\text{ Km.h}^{-1}$  ; D'où une consommation en ( $\text{l.km}^{-1}$ ) :  $3.471.\text{km}^{-1}$  pour un moteur.

Pour les deux moteurs : consommation moyenne de  **$6.95\text{ l.km}^{-1}$**

Le carburant utilisé : le Kérosène

Facteur d'émission de  $\text{CO}_2$ :  **$2.48\text{ kg.l}^{-1}$**  de Kérosène. (Calculé dans le chapitre II)

Capacité (passagers) : 189.

- **Transport routier**

### 1- Voiture

Les deux marques les plus vendues et qui représente plus que la moitié du total du parc automobile national sont RENAULT et PEUGEOT. Le modèle le plus vendu chez RENAULT est la Clio Classic (actuellement SYMBOL) .Nous allons donc prendre comme exemple de voiture la clio symbol (ex clio classic) version essence et diesel :

Voiture	Consommation urbaine	Consommation Extra-urbaine	Consommation Mixte	Facteur d'émission par type de carburant
<b>Renault Clio Symbol (Diesel)</b>	<b>5.4 L/100km</b>	<b>4 L/100km</b>	<b>4.5 L/100km</b>	<b>2.65 Kg.l<sup>-1</sup></b>
<b>Renault Clio Symbol(essence)</b>	<b>7.7 L/100km</b>	<b>5 L/100km</b>	<b>5.9 L/100 km</b>	<b>2.31Kg.l<sup>-1</sup></b>
<b>Dacia Logan GPL</b>	<b>9.1 L/100km</b>	<b>5.2 L/100km</b>	<b>6.6 L/100km</b>	<b>1.57 Kg.l<sup>-1</sup></b>

### 2- Autobus

Nous avons choisi le modèle: ISUZU - Q BUS 31 TURQUOISE

Nombre de places : 29

Carburant : diesel

Consommation en carburant : 17 l/100km.

### 3- Tramway

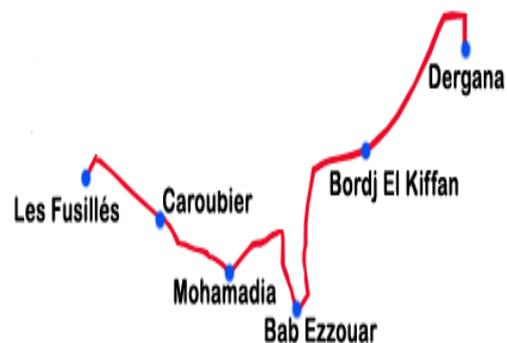
Longueur de la ligne du tramway d'Alger :  
23,3 km.

Nombre de station : 38

Population touchée estimée 500 000  
habitants

Fréquence de 4 minutes en heures de pointe,  
et 8 minutes en heure creuse.

Capacité (passagers) : entre 150 000 et  
185 000 personnes /jour.



Consommation en électricité : elle est de l'ordre de 0.06 Kwh/passagers.km ; avec une capacité (en passagers) de 400 passagers par rame; nous aurons une consommation de 24 Kwh.km<sup>-1</sup>.

#### 4- Voiture électrique

La Fiat Doblo (version électrique) compte parmi les voitures électriques les plus vendues. Nous l'avons pris comme modèle de véhicule électrique avec une batterie de 43 kWh au plomb-acide, offrant une autonomie de 150 km en cycle urbain pour une seule charge, la recharge prend 5-8 heures.

Consommation moyenne en électricité :  $0.28 \text{ kWh.km}^{-1}$

#### 5- La marche à pied et le vélo :

Ces deux modes de transport ne nécessitent aucun carburant voire aucune pollution atmosphérique, néanmoins, ils ne peuvent être utilisés que pour les courts trajets.

La finalité de cette application sera :

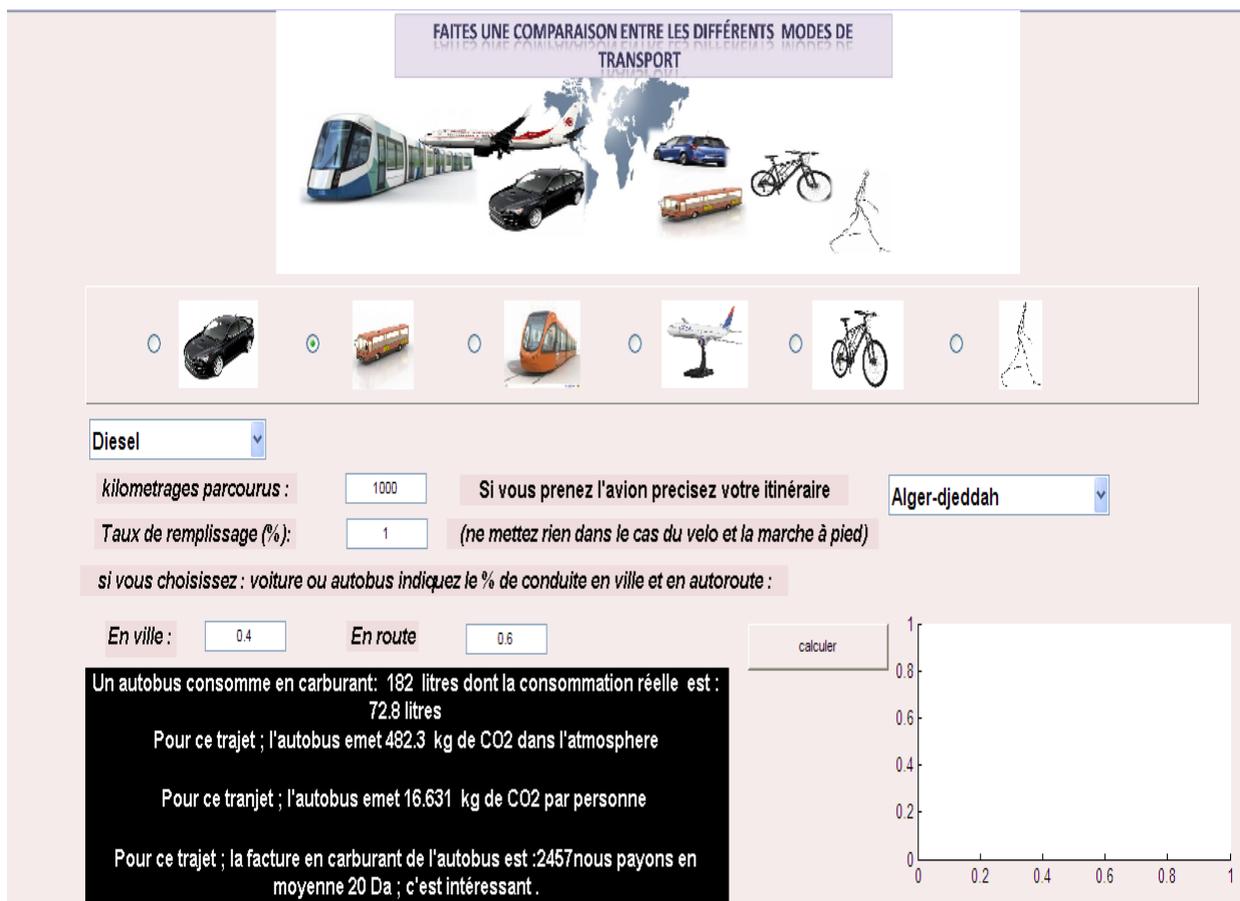


Figure 27: Interface interactive pour la comparaison entre les différents modes de transport

### III) Quel est la meilleure solution pour l'Algérie ?

Actuellement, les voitures hybrides ou électriques n'existent pas en Algérie, il en est de même pour les biocarburants qui sont encore en phase de développement.

Il semble que la solution la plus prometteuse en terme de réduction des émissions des gaz à effet de serre en Algérie est : le GPL<sub>c</sub>. Néanmoins ; aucune technologie n'apportera à elle seule une réponse aux défis. Pour cela, nous avons besoin à un recours aux transports en commun, le covoiturage, le tramway ...etc.

#### Obstacles de la diffusion des véhicules GPL<sub>c</sub> sur le marché algérien

Les propriétaires de véhicules essence ainsi que les futurs acquéreurs, et en l'absence d'autres mesures initiatives (subventions ou autres) ne semblent pas emballés par la conversion de leur véhicule au GPL<sub>c</sub> en raison notamment :

- Du cout supplémentaire induit par l'installation d'un kit de conversion GPL<sub>c</sub> dont le prix varie entre 20000 Da et 37000Da.
- De la « fausse » mauvaise réputation du GPL<sub>c</sub> (risque d'explosion, mauvais pour le moteur...etc) ce qui n'est pas du tout vrai.
- De la réticence quant à la réduction du volume du coffre après installation du réservoir GPL<sub>c</sub> (le réservoir torique semble atténuer cette réticence mais pose un autre problème, celui de l'emplacement de la roue de secours).
- D'un réseau de distribution insuffisant de longues files d'attente.  
Sur les 50 stations (1000km) qui vont être installées, il faut absolument installer des distributeurs GPL.
- D'un choix parmi les modèles de voitures limité car il n'y a souvent qu'un seul modèle GPL par gamme de véhicule.
- Du fait que les véhicules GPL ne sont pas admis dans la plupart des parkings sous terrains. [31]

#### Discussions

A notre avis ; la différence négligeable entre le prix du litre de gazole et du GPL<sub>c</sub> ; conjuguée aux énormes progrès technologiques qu'a connu le moteur ces dernières années (baisse de la consommation) sont les éléments les plus dissuasifs de l'utilisation du GPL<sub>c</sub>. Pourquoi se diriger alors vers le GPL<sub>c</sub> ?

Nous allons faire une petite démonstration :

- **Coté état**

Pour la seule année 2009, l'Algérie a importé 500 000 tonnes de gazole pour un montant de 300 millions de dollars.

300 millions de dollars → 500 000 tonnes de gazole d'où 600 dollars.tonne<sup>-1</sup> .... (1)

1tonne=1000kg ; la densité de gazole est d=0.85kg.l<sup>-1</sup> donc

1tonne = 1176.47litres .....(2)

De (1) et (2) ; on trouve que le prix d'un litre de gazole est : 0.51dollars.l<sup>-1</sup>

Le taux de change en 2009 était:1dollar = 73.965 Da

Le prix réel du gazole doit être 37.77Da.l<sup>-1</sup>

Le prix du gazole à la pompe est : 13.7 Da.l<sup>-1</sup>

Différence = 24.07 Da.l<sup>-1</sup>

Facture des pertes = 24.07 \* 1176.47 \* 500000 = 14157974000 Da !!!

Cette facture permet l'installation des kits GPL pour 471932.4 véhicules.

- **Coté conducteur**

Consommation moyenne d'une voiture Diesel : 4.7 litres/100 km

Consommation moyenne d'une voiture essence : 6.8litres/100km

Consommation moyenne d'une voiture GPL : 7.15 litres/100 km

**Différence entre les factures avec le prix actuel du gazole :**

Pour parcourir 100km :

En gazole : ça coute 64.39 Da, en GPLc : 64.35 Da

C'est vrai que le GPLc est moins polluant que les carburants conventionnels (diesel ; essence) mais est ce que cela est suffisant pour pousser les gens à se diriger vers ce type de carburant?

L'agent crucial pour le choix de carburant est la différence entre les prix et le cout d'installation du kit GPLc.

**Exemple**

A quel prix le litre du gazole doit être vendu afin de récupérer le prix du kit GPL ; pour un kilométrage de 10000km

Facture<sub>GPL</sub> = 0.0715 \* 9 \* 10000.

Facture<sub>gazole</sub> = 0.047 \* prix \* 10000.

Facture<sub>GPL</sub> - Facture<sub>gazole</sub> = 10000 → prix<sub>gazole</sub> = 34.96 Da

Donc pour récupérer 10000Da ; en parcourant 100000km ; il faudra que le prix du gazole soit presque 35 Da.

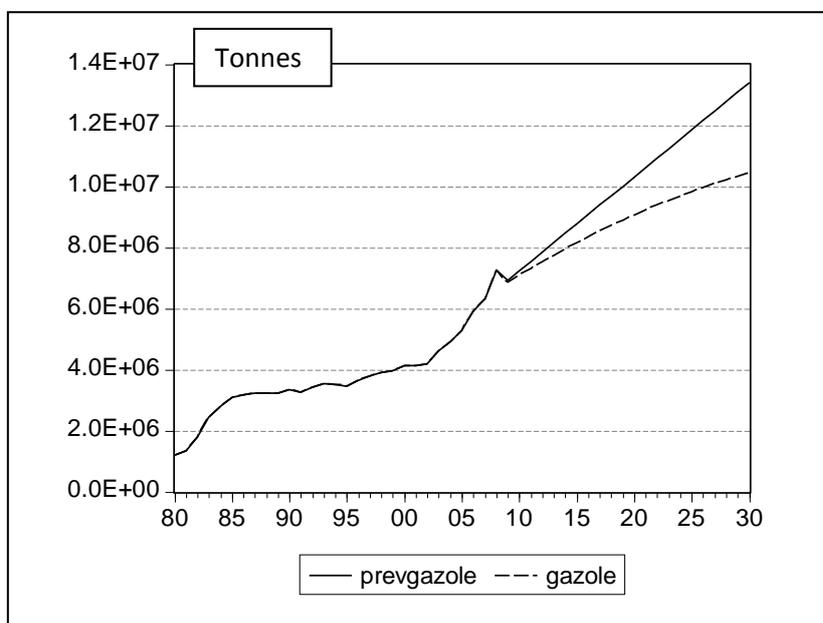
## Réflexions

Selon nos prévisions ; la consommation du gazole devrait atteindre plus que 13 millions de tonnes en 2030, donc l'écart entre l'offre et la demande va de plus en plus augmenter d'où une plus grosse facture d'importation. Et encore, nous le vendons à même pas la moitié de son prix réel...

Nous avons perdu 14157974000 Da en vendant du gazole à son prix actuel. Pour remédier à ce problème, nous proposons la solution suivante :

- Vendre le gazole à son prix réel (37Da).
- Soutenir le prix d'installation du Kit GPL (10000Da).

Si nous introduisons le GPLc à 22% dans la consommation finale du gazole sur une période de 22 ans ; ça va permettre de baisser cette dernière de 13.38 à 10.43 millions de tonnes.



Années	22% GPLc
2009	6851504,1725
2010	7083764,6277
2011	7309872,6830
2012	7529828,3399
2013	7743631,5970
2014	7951282,4548
2015	8152780,9132
2016	8348126,9722
2017	8537320,6320
2018	8720361,8923
2019	8897250,7534
2020	9067987,2150
2021	9232571,2774
2022	9391002,9403
2023	9543282,2040
2024	9689409,0683
2025	9829383,5332
2026	9963205,5988
2027	10090875,2650
2028	10212392,5320
2029	10327757,3995
2030	10436969,8677

**Figure 28:** Prévision de la consommation du gazole selon le scénario 22% GPLc sur une période de 22 ans

#### **IV) Conclusion**

Les voitures hybrides, voire électriques ne peuvent être considérées comme une solution efficace pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux des transports routiers en Algérie ; ceci est dû à plusieurs paramètres qui sont principalement le coût élevé de cette technologie ; leur faible autonomie ; qui vont être des obstacles pour le succès de cette technologie des moteurs électriques. La solution la plus prometteuse en Algérie est la diffusion des véhicules GPLc, en outre, développer les transports en commun afin de minimiser l'utilisation individuelle des véhicules.

## Conclusion Générale

En guise de conclusion, il serait pertinent de remettre en question même momentanément, le modeste travail que nous venons de réaliser : avons-nous atteint les objectifs fixés au départ ?

Au début de ce travail, nous nous sommes posées la question : pouvons-nous couvrir tous nos besoins énergétiques liés au secteur transport à l'horizon 2030 ? Si oui, quelles seraient les vecteurs énergétiques utilisés. Afin de répondre à ces questions, nous avons proposé plusieurs modèles prédictifs de l'évolution de la consommation des carburants routiers en Algérie à l'horizon 2030.

Malgré que l'Algérie soit l'un des premiers producteurs du GPL dans le bassin Méditerranéen, sa part dans la consommation restera encore marginale en 2030 soit 986183 tonnes contre celle du gazole qui dépassera les 13 millions de tonnes. Il est nécessaire donc d'encourager l'utilisation des carburants propres pour minimiser les émissions des gaz à effet de serre tout en tenant compte du caractère épuisable des ressources en hydrocarbures et de l'évolution de la demande nationale d'énergie dans les années à venir.

Les nouvelles technologies comme les voitures hybrides, électriques, ne peuvent être considérées comme une solution efficace à court terme ; ceci est dû à plusieurs paramètres qui sont principalement le coût élevé de cette technologie ; leurs faible autonomie ; qui vont être des obstacles pour le succès des moteurs électriques en Algérie.

La solution la plus prometteuse en Algérie est la diffusion des véhicules GPL<sub>c</sub>. mais il faut d'abord régler les obstacles liées à la commercialisation de ce nouveaux vecteur énergétique entre autre le coût d'installation du Kit GPL<sub>c</sub> et le prix concurrent du gazole.

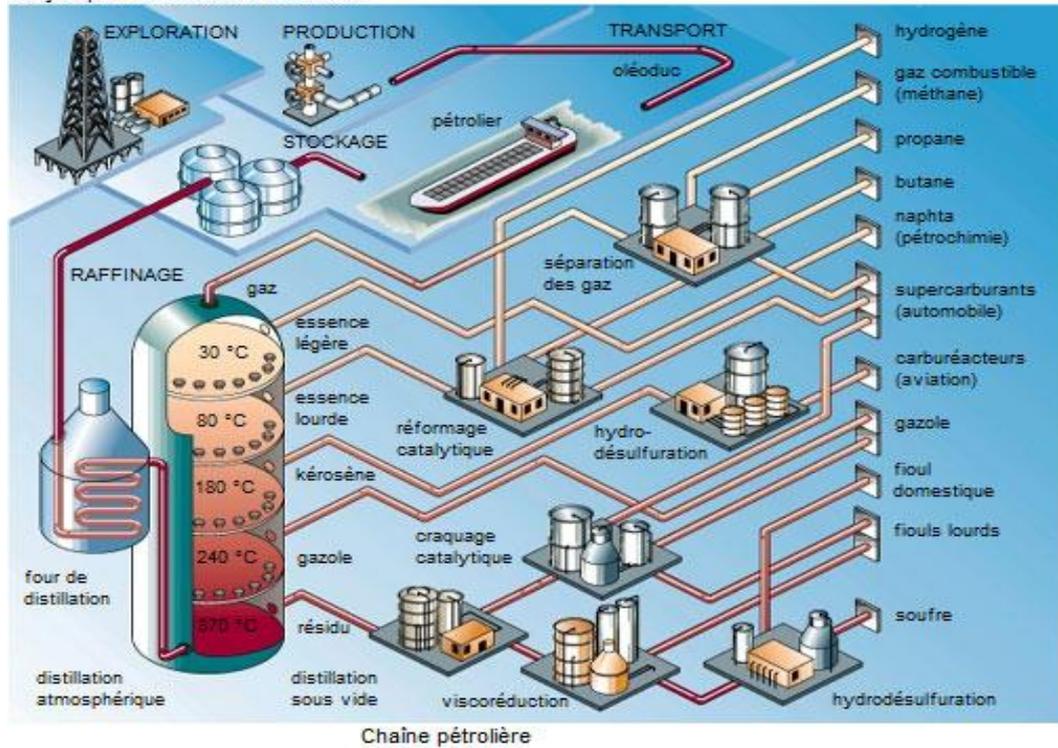
En outre, le développement des transports en commun pourra apporter un plus pour la réduction de cette consommation.

# Annexes

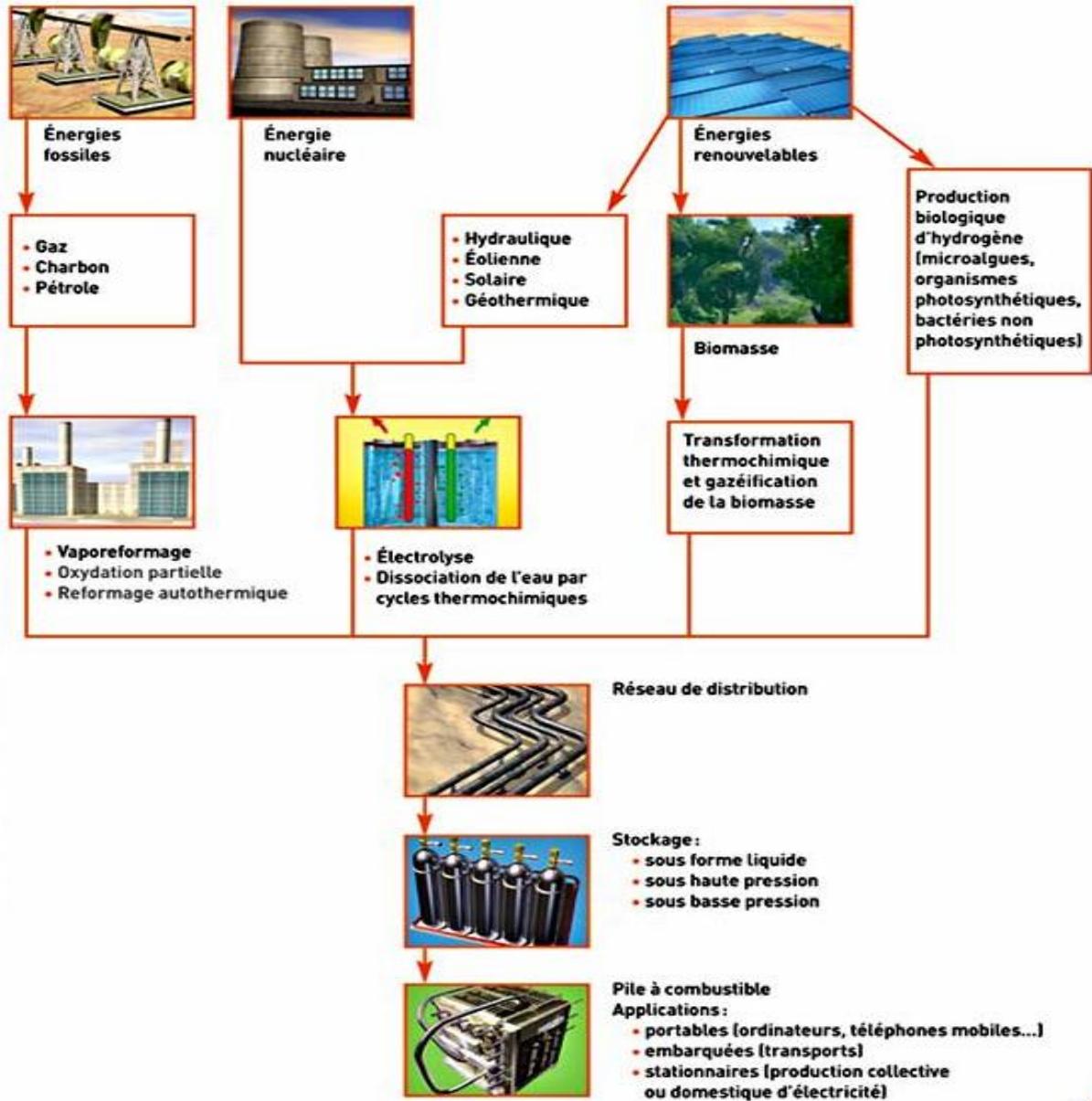
## Annexe 1 :

- Fabrication des carburants par raffinage du pétrole

Encyclopédie Universelle Larousse



- Filières de production de l'hydrogène

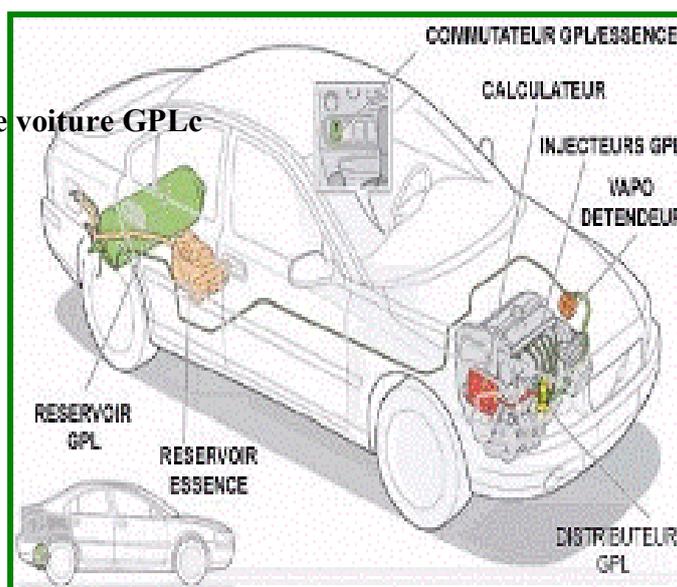


Source : [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

## Annexe 2

### Principe de fonctionnement d'une voiture GPLe

#### Comment ça marche ?



- Le GPL est rempli sous forme liquide dans le réservoir à l'aide d'un pistolet hermétique, ce n'est que plus tard qu'il se transforme en gaz.
- Il est acheminé vers l'avant de la voiture par une conduite en cuivre gainée de 6 mm de diamètre.
- Il alimente le vapo-détendeur qui va se charger de le faire passer de forme liquide à gazeuse.
- De là, le GPL maintenant transformé en gaz, est mélangé à l'air et admis dans le moteur.
- Le principe de base est toujours le même pour tous les **kits GPL** de type aspiré.
- On peut passer du GPL à l'essence en roulant, sans avoir à couper le contact ni à s'arrêter.
- On peut faire le plein dans tous les pays, il suffit de se munir du raccord adapté (il n'y en a que 2).
- On garde la même capacité d'essence qu'avant le montage GPL, le réservoir essence n'est pas modifié.

Il n'y a aucun problème de mise en route du moteur à chaud comme à froid car systématiquement, le moteur démarre à l'essence, ce n'est que quelques secondes plus tard que la commutation au GPL se fait automatiquement. Pas besoin de jouer à chaque démarrage avec le commutateur.

#### Sur quelle voiture ?

Le GPL se monte sur les moteurs fonctionnant à l'essence, pas au diesel.

On préférera toujours monter le GPL sur les moteurs prévus pour fonctionner au sans plomb, car les soupapes y sont mieux adaptées. En effet, il n'y a pas de plomb dans le GPL, le plomb qui est un très bon lubrifiant de la partie haute du moteur. Les soupapes risquent de souffrir à long terme.

De ce manque de lubrification. On peut pallier ce problème par un système de lubrification extérieur qui n'est pas très coûteux et qui fonctionne très bien. Dans le cas des voitures fonctionnant au sans plomb, le problème ne se pose pas puisque GPL ou pas , les soupapes sont déjà prévues pour résister.

### **Où vais-je trouver du GPL (sirghaz) ?**

Pas de problèmes ! plus de 70% de stations services de type A , à travers le territoire national sont équipées de stations GPL et ce chiffre est en constante augmentation.

### **Utilisation optimale de l'installation**

- Utilisez des bougies compatibles avec le GPL ou l'essence sans plomb, les remplacer tous les 15000 kilomètres.
- Entretenez le filtre à air régulièrement.
- Utilisez du glaciol ou de l'anti-freeze pour votre système de refroidissement.
- Un contrôle semestriel de l'installation est recommandé.
- La durée de vie du réservoir GPL est de 15 ans.
- La réépreuve se fait tous les 5 ans.

**Annexe 3 :**

- **Parc automobile national par marque (les plus vendues)**

<b>Années</b> <b>Marque</b>	1997	1998	1999	2000	2001	2002
<b>PEUGEOT</b>	800871	806 372	812825	842 214	849 765	862 124
<b>RENAULT</b>	587 191	601 115	622347	659 897	665 709	677 687
<b>WOLSWAGEN</b>	127 780	129 348	131936	136 130	137 096	138 592
<b>TOYOTA</b>	64 671	65 664	67639	75 021	76 751	78 516
<b>SNVI</b>	97 114	97 000	99773	104 189	105 626	106 830
<b>CITROËN</b>	51 848	52 237	52 874	53 125	53 578	54 710

<b>Années</b> <b>Marque</b>	2003	2004	2005	2006	2008
<b>PEUGEOT</b>	892 370	911 80	985 859	1 011091	1 007 757
<b>RENAULT</b>	632 827	687 654	732 316	765 203	857 068
<b>WOLSWAGEN</b>	142 344	148 060	157 316	167 689	182 196
<b>TOYOTA</b>	82 417	94 720	104 735	123 015	183 117
<b>SNVI</b>	113 864	114 754	115 427	117 543	121 856
<b>CITROËN</b>	55 603	61 381	63 922	69 867	83 917

**Source : Office nationale des statistiques**

**Annexe 4 :**

- **Les données des séries chronologiques**

Années	Population (individus)	Parc diesel	Parc essence	Taux de croissance annuel du parc automobile	Parc automobile total (véhicules)
<b>1980</b>	18666000	229806	966575	0,196381	1196381
<b>1981</b>	19262000	268597	1097459	0,141823	1366056
<b>1982</b>	19883000	299188	1212318	0,106474	1511506
<b>1983</b>	20522000	338310	1329543	0,103437	1667853
<b>1984</b>	21185000	385774	1477483	0,117159	1863257
<b>1985</b>	21863000	419087	1580489	0,073161	1999576
<b>1986</b>	22512000	448977	1661624	0,055524	2110601
<b>1987</b>	23139000	475483	1753061	0,055881	2228544
<b>1988</b>	23783000	492730	1818937	0,037299	2311667
<b>1989</b>	24409000	512304	1892029	0,040086	2404333
<b>1990</b>	25022000	540190	1951581	0,036366	2491771
<b>1991</b>	25643000	564678	1989984	0,025223	2554662
<b>1992</b>	26271000	586846	2014593	0,01831	2601439
<b>1993</b>	26894000	612466	2038196	0,018992	2650662
<b>1994</b>	27496000	636643	2055784	0,015756	2692427
<b>1995</b>	28060000	665262	2058898	0,011786	2724160
<b>1996</b>	28566000	697897	2044409	0,006661	2742306
<b>1997</b>	29045000	723070	2063187	0,016027	2786257
<b>1998</b>	29507000	739704	2078977	0,011636	2818681
<b>1999</b>	29965000	764792	2121272	0,023905	2886064
<b>2000</b>	30416000	777623	2136649	0,009773	2914272
<b>2001</b>	30879000	791147	2147105	0,008228	2938252
<b>2002</b>	31357000	840358	2137499	0,013479	2977857
<b>2003</b>	31848000	895620	2131825	0,016652	3027445
<b>2004</b>	32364000	960067	2147459	0,026451	3107526
<b>2005</b>	32600000	1053467	2157585	0,033314	3211052
<b>2006</b>	33200000	1147145	2323484	0,012753	3470629
<b>2007</b>	33 852 700	1239852	2483758	0,053232	3 655 378
<b>2008</b>	34 361 800	1301248	2 572 596	0,090436	3 985 958

Source : Office nationale des statistiques

Années	Consommation GPLc (tonnes)	Consommation Gasoil (tonnes)	Consommation essence (tonnes)	Prix du GPLc à la pompe (da/l)	Prix de l'essence à la pompe (da/l)	Prix du gasoil à la pompe (da/l)
1980	0	1974127	1212970	0	0,1	0,2
1981	0	2161911	1326221	0	0,5	0,2
1982	0	2284736	1393504	0	1,39	0,2
1983	0	2635585	1528789	0	1,39	0,2
1984	0	2906280	1715085	0	1,39	0,2
1985	0	3127540	1784843	0	2,3	0,2
1986	0	3236904	1897175	0	2,3	0,45
1987	0	3337156	1907341	0	2,3	0,45
1988	0	3246494	1962230	0	2,3	0,45
1989	0	3435207	2093969	0	2,3	0,45
1990	5021	3390503	2169015	1,1	3	1,1
1991	9487	3673728	2267384	1,3	5	1,3
1992	10000	3577702	2217840	1,3	5	1,3
1993	10000	3446211	2333354	2,7	6	2,7
1994	10000	3225275	2209085	4	7	6,45
1995	43567	3131433	2049359	4,8	12	7,5
1996	70333	3097795	2022983	5	13	9,7
1997	103927	3023384	1958481	7	18	11,5
1998	133049	3351496	1944286	7,2	18,4	11,5
1999	153579	3434132	1870744	7,2	19,15	11,75
2000	182194	3697428	1903945	7,2	19,15	11,75
2001	217267	3929919	1864496	7,2	19,15	11,75
2002	253770	4560486	1847649	7,2	20,15	11,75
2003	281989	4833707	1850061	7,2	20,15	11,75
2004	307636	5124643	1872343	7,2	21,2	11,75
2005	308900	5370000	1881500	7,2	21,2	11,75
2006	316950	5790000	1860020	9	21,2	13,7
2007	330940	6402000	2009000	9	21,2	13,7
2008	340000	7246000	2221000	9	21,2	13,7

Source : NAFTAL

- **Prévision**

Années	Parc diesel	Rapport1	Pop	Taux	Prix essence
2009	1362644	1.60372575711	34887833.1095	0.0969981152481	21.2408416296
2010	1424040	1.64553085124	35413866.219	0.110834176697	21.2617353531
2011	1485436	1.68733594537	35939899.3285	0.124670238147	21.2826290766
2012	1546832	1.7291410395	36465932.4381	0.138506299596	21.3035228001
2013	1608228	1.77094613363	36991965.5476	0.152342361045	21.3244165235
2014	1669624	1.81275122776	37517998.6571	0.166178422495	21.345310247
2015	1731020	1.85455632189	38044031.7666	0.180014483944	21.3662039705
2016	1792416	1.89636141602	38570064.8761	0.193850545393	21.387097694
2017	1853812	1.93816651015	39096097.9856	0.207686606842	21.4079914175
2018	1915208	1.97997160428	39622131.0951	0.221522668292	21.4288851409
2019	1976604	2.02177669841	40148164.2047	0.235358729741	21.4497788644
2020	2038000	2.06358179254	40674197.3142	0.24919479119	21.4706725879
2021	2099396	2.10538688667	41200230.4237	0.26303085264	21.4915663114
2022	2160792	2.1471919808	41726263.5332	0.276866914089	21.5124600349
2023	2222188	2.18899707493	42252296.6427	0.290702975538	21.5333537583
2024	2283584	2.23080216907	42778329.7522	0.304539036987	21.5542474818
2025	2344980	2.2726072632	43304362.8618	0.318375098437	21.5751412053
2026	2406376	2.31441235733	43830395.9713	0.332211159886	21.5960349288
2027	2467772	2.35621745146	44356429.0808	0.346047221335	21.6169286522
2028	2529168	2.39802254559	44882462.1903	0.359883282785	21.6378223757
2029	2590564	2.43982763972	45408495.2998	0.373719344234	21.6587160992
2030	2651960	2.48163273385	45934528.4093	0.387555405683	21.6796098227

## Bibliographie

- [1] Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2030.
- [2] Géopolitique de l'énergie: besoins, ressources, échanges mondiaux Par Jean-Pierre Favennec
- [3] : Thèse de Magister .Thème : L'apport des GPL<sub>c</sub> dans le transport routier algérien présenté par M<sup>lle</sup> DAGHDICHE.SAMIRA .Directeur de thèse : Pr. C.E.CHITOUR. Année [2005/2004] : Energie nucléaire par Jean-Louis Basdevant ,James Rich, Michel Spiro.Edition de l'école polytechnique ,Aout 2006. 91128 Palaiseau Cedex
- [5] : L'énergie en 2050: Nouveaux défis et faux espoirs Par Bernard Wiesenfeld.EDP science 2005. page 39.
- [6] : <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/energies/energie02.htm>
- [7] : [http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/tonne\\_equivalent\\_petrole\\_tep.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/tonne_equivalent_petrole_tep.php4)
- [8] : Les transports face aux défis de l'énergie et du climat. Benjamin Dessus, Global Chance, <http://www.global-chance.org>
- [9] : (Source: CCFA- Comité des Constructeurs Français d'Automobiles)
- [10] : ministère de l'énergie et des mines <http://www.mem-algeria.org>  
- Les stratégies énergétiques des états .Préface de Mohamed meziane PDG de Sonatrach .sous la direction du Pr. C.E.CHITOUR .Editions Sonatrach.
- [11] : Evolution du secteur de l'énergie et des mines 1962-2007 [Ministère de l'énergie et des mines]
- [12] : Les énergies renouvelables en Algérie. Auteur : Mission économique d'Alger Rédigée par : Nicolas BROUTIN. Revue par : Sarida BENDJEDDOU et Claude MASEGOSA
- [13] Carburants liquides : Technologie, énergie, environnement par Jean-Claude GUIBET. Volume I. Edition : Technip
- [14] Les carburants : une source d'énergie chimique Article rédigé par Hagop Demirdjian (professeur agrégé à l'ENS)
- [15] Les biocarburants: état des lieux, perspectives et enjeux du développement Par Daniel Ballerini, Nathalie Alazard-Toux.
- [16] : NAFTAL ([www.naftal.dz](http://www.naftal.dz))
- [17] : Mémento de l'Hydrogène : Techniques de l'Ingénieur, Cours E.N.S.T.A de construction navale. Jane's Fleet of the world 16<sup>th</sup> . World Hydrogen Energy Conference, Lyon 2006. L'hydrogène, John Libbey Eurotext, 2006

- [18] : Moteurs Diesel d'automobile – Conception par Jean-Pierre POUILLE. Référence BM2575 | Date de publication : 10 avr. 2008 [technique de l'ingénieur ]
- [19] : Modélisation et prévision à moyen terme de la consommation nationale du GPL carburant 2007-2011. Projet de fin d'études présenté par :Mlle Amira KETTAL et Mlle Lamia OUIS . Promotion : juin 2007
- Econométrie - Manuel et exercices corrigés par Régis Bourbonnais .Edition DUNOD.
- [20] : Carburants et moteurs: technologies, énergie, environnement, Volume II Par Jean-Claude Guibet,Emmanuelle Faure .Edition Technip .
- [21] : [www.ifp.fr](http://www.ifp.fr)
- [22] : <http://voiture-ecologique-tpe.e-monsite.com/rubrique,biomasse,556169.html>
- [23] : comité de l'énergie atomique :  
[http://www.cea.fr/jeunes/themes/les\\_nouvelles\\_energies/l\\_hydrogene/les\\_modes\\_de\\_production\\_de\\_l\\_hydrogene](http://www.cea.fr/jeunes/themes/les_nouvelles_energies/l_hydrogene/les_modes_de_production_de_l_hydrogene)
- [24] : De l'hydrogène à la production d'énergie. Commissariat à l'Énergie Atomique(CEA), 2004
- [25] : [http://bonvoiture.com/voiture\\_hybride.php](http://bonvoiture.com/voiture_hybride.php)
- [26] : Voitures propres: stratégies pour des véhicules peu polluants. Service de publication de l'OCDE (organisation de coopération et développement économique)
- [27] : Quelles énergies pour demain ? Par Robert Dautray [Odile Jacob science.Novembre 2004]
- [28] : Thèse de doctorat : Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM présenté par :Wolfgang FRIEDE en 2003. Institut national polytechnique de lorraine
- [29] : (Comité français du butane et propane)
- [30] : MATLAB : [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- [31] : Mémoire de Post-graduation spécialisée. Thème : Situation actuelle du marché du SIRGHAZ et perspectives de développement à l'horizon 2020. Dirigé par : Dr.Afia Mefti et Dr Faroudja Mohellebi. Année : 2009-2010.