

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département du Génie de l'Environnement
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Mémoire De Magister
Option : Génie de l'environnement

Thème

**Contribution à l'étude des émissions issues des
véhicules légers roulant au biocarburant.**

Présenté par
M^r BENDADA Mehdi

Soutenu le 14.12.2011 devant le jury composé de :

Présidente: Mme N. BELHANECHÉ (Professeur ENP-Alger)

Directeur : Mr R. KERBACHI (Professeur ENP, Alger)

Examineurs : Mr T.AHMED ZAID (Professeur ENP, Alger)

Mlle J.ARRAR (Maitre de Conf., ENP-Alger)

Mr M.BOUGHEDAOU (Maitre de Conf., Univ Saad Dahlab-Blida)

Année 2011

ENP 10, Avenue Hassan Badi, El-Harrach – Alger.

Remerciement

Je remercie ;

Le bon dieu de m'avoir donné la volonté, le courage, la patience et la foi pour entamer et finir ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur Pr KERBACHI pour son dévouement, sa patience et surtout sa disponibilité pour la réalisation de mon projet et durant toute ma formation.

Je remercie encore Mr CHIKHI pour son aide considérable et ses brillants conseils.

Toute l'équipe de la Direction centrale Engineering - NAFTAL Cheraga qui a contribué à l'élaboration de ce travail.

Je remercie aussi ma femme ainsi que ma famille pour leur soutien moral durant mes études.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma chère femme

Mes chers parents

Mon brave frère et mes douces sœurs

Mes Grands parents

Ma belle famille

Toute ma famille

Tous mes amis et collègues

Et à toutes les personnes qui m'aiment.

Mehdi

ملخص

تعالج الدراسة في مرحلة أولى الخاصيات الفزيوكماوية لمختلف أنواع ببيواتانول متكون من مختلف أنواع بنزين. ثم تم اجراء دراسة للانبعاثات احادية لكل من (HC و CO₂ و CO) الناتجة عن السيارة الخفيفة المزودة بالبنزين و ببيواتانول أثناء حالة السير الفعلي و لتحقيق ذلك تم استعمال نظام mini CVS (constant volume sampler) لإجراء اقتطف للغاز المنبعث. اندرجت التدابير على ثلاثة أنواع من المسارات : مسار حضري، مسار شبه حضري و مسار الطريق السريع. تبين النتائج المتحصل عليها على أن البيواتانول المكون من البنزين الغير محتوي على الرصاص هو الوقود الأقل تلوثا لأي نوع من أنواع المسارات و أن مسار الطريق السريع.

كلمات البحث : الانبعاثات الملوثة mini CVS، البيواتانول، أنواع المسارات .

Résumé

L'étude aborde dans un premier volet, la caractérisation d'un bioéthanol de différentes concentrations, les résultats obtenus ont permis de s'assurer que ces propriétés physico-chimiques respectent les spécifications en vigueur par les normes algériennes pour les carburants liquides.

Dans un second volet, Une étude des émissions unitaires de CO, CO₂ et HC issues de véhicules légers utilisant des bioéthanol a été réalisée en circulation réelle avec un mini CVS.

Les mesures ont été réalisées sur trois types de cycles : urbain, routier et autoroutier.

Les résultats obtenus montrent que le bioéthanol composé d'essence sans plomb et d'éthanol à hauteur de 15% le moins polluant en CO, CO₂ et HC par rapport aux carburants classiques.

Mots clé : pollution atmosphérique, mini CVS, Bioéthanol, trafic routier, cycles de conduite.

Abstract

This study, involve a part concerning, the characterization of different Bioethanols, composed of different gasoline (leaded or not) and different concentration of ethanol, also, their compliance with Algerian standards for liquid fuels was reached.

The second part, which include, identification of unit emissions of CO, CO₂ and HC from lights vehicles using biofuels was made in real traffic conditions with an embedded system: mini CVS.

Measurements were made on three types of cycles: urban, road and highway.

The results shown that biofuels composed of free-lead gasoline and ethanol at 15 percent provide low levels air pollutants of CO,HC and CO₂

Keywords: Air Pollution, mini CVS, Biofuels, road traffic, driving cycles.

Liste des tableaux :

- Tableau 1 : Augmentation absolue moyenne des émissions (en g/km) pour chaque pourcentage de pente supplémentaire.
- Tableau 2 : Surémissions en pourcentage liées aux accélérations (comparaison cycle « réel » et vitesse stabilisée).
- Tableau 3 : répartition du parc national automobile selon le genre des véhicules au 31/12/2009.
- Tableau 4 : répartition du parc automobile selon l'énergie et le genre de véhicules.
- Tableau 5 : répartition du parc national automobile selon les tranches d'âges des véhicules au 31/12/2009.
- Tableau 6 : répartition du parc national automobile selon le pays d'origine au 31/12/2009.
- Tableau 7 : Caractéristiques de l'essence normal.
- Tableau 8 : Caractéristiques de l'essence super.
- Tableau 9 : Caractéristiques de l'essence sans plomb.
- Tableau 10 : Limites d'émissions des véhicules particuliers en Algérie.
- Tableau 11 : Limites d'émissions UE pour les véhicules particuliers (g/km).
- Tableau 12: Propriétés physico-chimique de l'éthanol utilisé pour les mélanges au carburant.
- Tableau 13: mélange essence normal – éthanol.
- Tableau 14 : mélange essence sans plomb – éthanol.
- Tableau 15 : mélange essence sans plomb – éthanol.
- Tableau 16 : Résultats des essais en cycle urbain de la Mégane en Essence sans plomb et mélanges Essence Sans plomb-Ethanol.
- Tableau 17: Résultats des essais en cycle urbain de la Mégane en Essence Super et mélanges Essence Super-Ethanol.
- Tableau 18: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle Urbain pour la Mégane.
- Tableau 19 : Résultats des essais en cycle routier de la Mégane en Essence sans plomb et mélanges Essence Sans plomb-Ethanol.
- Tableau 20: Résultats des essais en cycle routier de la Mégane en Essence Super et mélanges Essence Super-Ethanol.
- Tableau 21: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle routier pour la Mégane.
- Tableau 22 : Résultats des essais en cycle urbain de la Mégane en Essence sans plomb et mélanges Essence Sans plomb-Ethanol.
- Tableau 23: Résultats des essais en cycle urbain de la Mégane en Essence Super et mélanges Essence Super-Ethanol.
- Tableau 24: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle Autoroutier pour la Mégane.
- Tableau 25 : Résultats des essais en cycle urbain de l'accent avec l'essence super et ses mélanges en éthanol.
- Tableau 26: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle urbain pour l'Accent.
- Tableau 27 : Résultats des essais en cycle routier de l'accent avec l'essence super et ses mélanges en éthanol.
- Tableau 28: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle routier pour l'Accent.
- Tableau 29 : Résultats des essais en cycle autoroutier de l'accent avec l'essence super et ses mélanges en éthanol.
- Tableau 30: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle autoroutier pour l'Accent.
- Tableau 31 : Nombre d'octane recherché en fonction des valeurs du knockmeter.

Liste des figures :

- Figure 1. Les sources à l'origine des émissions automobiles.
- Figure 2. Pyramide des effets aigus associés à la pollution atmosphérique.
- Figure 3: évolution du parc automobile selon la source d'énergie pour les véhicules de tourisme au 31/12/2009.
- Figure 4: évolution du parc automobile selon la source d'énergie pour les véhicules de tourisme au 31/12/2009.
- Figure 5 : Filières de production des biocarburants.
- Figure 6 : Différents voies de production de biocarburants.
- Figure 7 : Différents types de biocarburants.
- Figure 8 : Processus de formulation du bioéthanol.
- Figure 9 : Production d'éthanol dans le monde.
- Figure 10 : Schéma d'un prélèvement avec CVS.
- Figure 11 : Vue d'ensemble d'un système de prélèvement avec CVS.
- Figure 12 : Schéma de mesure de gaz par NDIR
- Figure 13 : Schéma du four dans un système FID
- Figure 14 : Principe de mesure FID
- Figure 15 : Cycle européen NEDC urbain et extra-urbain
- Figure 16: FTP75 (Federal test Procedure).
- Figure 17: cycle autoroutier (Highway Cycle).
- Figure 18 : Schéma du montage expérimental de prélèvement et d'analyses.
- Figure 19 : Cinémomètre installé accroché à la portière d'une voiture.
- Figure 20 : Cinémomètre installé à l'avant droit d'une Hyundai Accent.
- Figure 21 : DATALOGGER sur le siège arrière d'une Hyundai Accent.
- Figure 22 : embout formé de 112 tubes.
- Figure 23: Sac TEDLAR et autres matériels embarqués à l'arrière d'un véhicule.
- Figure 24 : Matériels d'analyses (Crystal 300 à droite et Graphite 750 à gauche)
- Figure 25 : Hyundai Accent équipé avec le système mini-CVS.
- Figure 26 : Renault Mégane avec le système mini-CVS.
- Figure 27 : Vue aérienne du circuit urbain.
- Figure 28 : Vue aérienne du circuit routier.
- Figure 29 : Vue aérienne du circuit autoroutier.
- Figure 30: evolution de la densité des mélanges en fonction du pourcentage d'éthanol.
- Figure 31: evolution de la TVR des mélanges en fonction du pourcentage d'éthanol.
- Figure 32: evolution de l'indice d'octane des mélanges en fonction du pourcentage d'éthanol.
- Figure 33: evolution du pouvoir calorifique en fonction du pourcentage d'éthanol.
- Figure 34 : Cycle urbain réalisée avec l'accent .
- Figure 35 : Cycle routier réalisée avec l'accent .
- Figure 36 : Cycle autoroutier réalisée avec l'accent .
- Figure 37 : Cycle urbain réalisée avec la mégane.
- Figure 38 : Cycle routier réalisée avec la mégane .
- Figure 39 : Cycle autoroutier réalisée avec la mégane .
- Figure 40: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) en fonct du % d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en urbain.
- Figure 41: Evolution d'émission unitaire mCO₂(g/km) en fonct du % d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en urbain.
- Figure 42: Evolution d'émission unitaire mHC(g/km) en fonct du % d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en urbain.
- Figure 43: Evolution d'émission unitaire mCO₂(g/km) en fonct du % d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en routier.

Liste des Tableaux et figures

Figure 44 : Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en routier

Figure 45: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en routier.

Figure 46: Evolution d'émission unitaire mCO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en autoroutier.

Figure 47: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en autoroutier.

Figure 48: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en autoroutier.

Figure 49 : Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) par cycle de conduite.

Figure 50: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) par cycle de conduite.

Figure 51: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) par cycle de conduite.

Figure 52: Evolution d'émission unitaire de l'essence super en fonction de la vitesse.

Figure 53: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 10 % d'éthanol en fonction de la vitesse.

Figure 54: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 15 % d'éthanol en fonction de la vitesse.

Figure 55: Evolution d'émission unitaire mCO₂ (g/km) par cycle de conduite.

Figure 56: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) par cycle de conduite.

Figure 57: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) par cycle de conduite.

Figure 58: Evolution d'émission unitaire d'essence sans plomb en fonction de la vitesse.

Figure 59: Evolution d'émission unitaire d'essence sans plomb + 5% d'éthanol en fonction de la vitesse.

Figure 60: Evolution d'émission unitaire d'essence sans plomb + 10% d'éthanol en fonction de la vitesse.

Figure 61 : Evolution d'émission unitaire d'essence sans plomb + 15% d'éthanol en fonction de la vitesse.

Figure 62: Evolution d'émission unitaire mCO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en urbain.

Figure 63: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en urbain.

Figure 64: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en urbain.

Figure 65: Evolution d'émission unitaire mCO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en routier.

Figure 66: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en routier.

Figure 67: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en routier.

Figure 68: Evolution d'émission unitaire mCO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en autoroutier.

Figure 69: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en autoroutier.

Figure 70: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en autoroutier.

Figure 71: Evolution d'émission unitaire mCO₂ (g/km) par cycle de conduite.

Figure 72: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) par cycle de conduite.

Figure 73: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) par cycle de conduite.

Figure 74: Evolution d'émission unitaire d'essence super en fonction de la vitesse.

Figure 75: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 5 % d'éthanol en fonction de la vitesse.

Figure 76: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 7.5% d'éthanol en fonction de la vitesse.

Figure 77: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 10 % d'éthanol en fonction de la vitesse.

Figure 78: Evolution des émissions CO₂ pour les deux véhicules en Essence Super et S/P.

Figure 79: Evolution des émissions CO₂ pour les deux véhicules en Essence Super et S/P avec addition de 10% d'éthanol.

Figure 80: Evolution des émissions CO pour les deux véhicules en Essence Super et S/P.

Figure 81: Evolution des émissions CO pour les deux véhicules en Essence Super et S/P avec addition de 10% d'éthanol.

Figure 82: Evolution des émissions HC pour les deux véhicules en Essence Super et S/P.

Figure 83: Evolution des émissions HC pour les deux véhicules en Essence Super et S/P avec addition de 10% d'éthanol.

Figure 84 : Thermodensimètre au laboratoire NAFTAL-AVM.

Liste des Tableaux et figures

Figure 85 : Lames de cuivres lors des essais de corrosion.

Liste des abréviations

CVS : Constant Volume Sampling

Mini-CVS : Constant volume sampler réduit

Euro zéro : Normes européennes d'émission de polluant de véhicule en vigueur avant 1992

Euro I : Norme européenne d'émission de polluant de véhicule entrée en vigueur en 1992

Euro II : Norme européenne d'émission de polluant de véhicule entrée en vigueur en 1996

Euro III : Norme européenne d'émission de polluant de véhicule entrée en vigueur en 2000

Euro IV : Norme européenne d'émission de polluant de véhicule entrée en vigueur en 2005

Euro V : Norme européenne d'émission de polluant de véhicule prévu en 2009

Euro VI : Norme européenne d'émission de polluant de véhicule prévu en 2014

FID : Flame Ionization Detector

GNC : Gaz Naturel Carburant

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

Naftal : Société nationale de commercialisation de carburant

ONS : Office National de Statistiques

PL : Poids Lourd

PTAC : Poids total autorisé en charge

PVR : Pression de Vapeur Reid (volatilité du carburant)

UE : Union Européenne

VP : véhicule particulier

VUL : véhicule utilitaire léger

Liste des symboles

CO: Monoxyde de carbone

CO₂: Dioxyde de carbone

COV : Composés organique volatil

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

HC : Hydrocarbures

N₂O: Protoxyde d'azote

NO₂: Dioxyde d'azote

NO_x : Oxydes d'azote

Pb : Plomb

PM : Particulate Matter - Matière particulaire

Sommaire

Introduction Générale	1
I - Généralités sur la pollution atmosphérique issues du trafic routier	3
I.1 - Origine des émissions issues des véhicules	4
I.2 - Type de polluants	6
I.3 - Les facteurs des émissions unitaires	10
I.4 - Effets et impacts de pollution de l'air	13
I.5 - Statistique du parc national	18
II – Les carburants	23
II.1 – Les essences	24
II.1.1 - Caractéristique des essences	24
II.1.2 - Spécifications nationales des essences	27
II.2 – Les biocarburants	31
II.2.1 - Historique	31
II.2.2 - Origines et types de biocarburants	31
II.2.3 - Principaux types de biocarburants	34
II.2.4 - le Bioéthanol	37
II.2.5 – Production mondiale du bioéthanol	39
II.2.6 - Effets de l'éthanol sur les propriétés de l'essence	40
II.2.7 – Enjeux socio-économiques et impacts environnementales	41
III – Techniques de mesure des émissions automobile	43
III.1- Technique de prélèvement	43
III.2 - Méthodes d'analyse des polluants	44
III.3 - Cinématique et cycles de conduite	46
III.4 - Les normes d'émissions	49
IV – Méthodologie expérimentale	50
IV.1- Analyse des mélanges éthanol-essence	50
IV.2 - Campagne de mesure des émissions automobile	51
IV.3 - Calcul de la masse des émissions polluantes	56

V- Résultats et Interprétations	56
V.1- Caractérisation du biocarburant	56
V.1.1- Analyse de l'éthanol pur	56
V.1.2 - Analyse des essences et de leurs mélanges avec l'éthanol	57
V.1.3 – Interprétations des analyses	59
V.1.4 – Conclusion	61
V.2- Mesure des émissions	62
V.2.1 - Données cinématiques	62
V.2.2 - Emissions unitaires	65
V.2.2.1 – En utilisant la RENAULT MEGANE	65
V.2.2.2 – En utilisant la Hyundai Accent	81
V.2.2.3 – Comparaison entre les deux véhicules	89
V.2.3 - Conclusion	93
Conclusion Générale	94
Références bibliographiques	95
Annexes	104
Annexe 1	104
Annexe 2	108

Introduction générale

Plusieurs études effectuées de par le monde ont montré qu'en milieu urbain, le trafic routier constitue l'une des principales sources de la pollution de l'air ambiant [1]. C'est le cas également des grandes agglomérations algériennes qui sont de plus en plus confrontées à une forte dégradation de la qualité de l'air [2 - 8].

Afin de réduire les émissions nocives engendrées par le trafic routier, plusieurs avancées technologiques ont été réalisées, parmi elles, l'avènement de nouveaux carburants sur les marchés mondiaux, dit biocarburants ou carburants verts.

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse. Malgré qu'ils soient sujet à diverses controverses, liées notamment à la réduction réelle des émissions polluantes, ainsi qu'à leur viabilité économique et faisabilité technique, les biocarburants sont produits et commercialisés par un grand nombre de pays. En Algérie, ces carburants restent très méconnus et ne font pas l'objet d'un intérêt particulier de la part du secteur en charge de la politique énergétique du pays.

Pour évaluer, du point de vue environnemental, la qualité d'un carburant, il est nécessaire de mesurer la pollution issue de la combustion de ce carburant dans le moteur des véhicules. Dans une telle évaluation, on s'intéresse plus particulièrement à la mesure des émissions unitaires des véhicules, c'est-à-dire la quantité de polluant émis par unité de kilomètre parcouru et ce, si possible, dans des conditions réelles de circulation.

Dans notre pays, vu la complexité de la thématique, il n'y a eu que très peu de travaux sur l'étude des émissions unitaires de la pollution automobile [5, 9]. Aussi et afin d'étoffer nos connaissances dans ce domaine, nous nous proposons d'étudier, en collaboration avec l'entreprise nationale de commercialisation et distribution des produits pétroliers et dérivés (NAFTAL- Direction centrale de l'engineering DCE), les émissions unitaires de véhicules roulant au bioéthanol.

Introduction générale

Des mesures en circuit réel des émissions unitaires des polluants CO, CO₂ et HC issues de deux véhicules légers et roulants à l'essence et au bioéthanol ont été réalisées. Une comparaison des émissions issues de la combustion des deux carburants a été élaborée. Il s'agit principalement d'évaluer l'apport ou la performance du biocarburant, en matière de réduction de la pollution, par rapport à l'essence.

Chapitre I

Généralités sur la pollution atmosphérique issue du trafic routier

Introduction

Par opposition aux rejets industriels qui proviennent de sources fixes, la pollution routière est le fait de millions de sources mobiles, ce qui ne facilite pas son étude. Le parc automobile algérien est constitué de plus de 4 millions de véhicules, tous types confondus, au 31 décembre 2009 [10]. Ces dernières années, il a augmenté fortement. Selon un communiqué des Douanes Algériennes, pour les seuls neuf premiers mois de l'année 2011, l'Algérie a importé plus de 300.000 véhicules et on s'achemine vers 400.000 véhicules d'ici la fin de l'année [10].

La difficulté à appréhender la pollution émise par ce parc, forcément hétérogène du fait de la variété des véhicules qui le constitue (véhicule particulier ou utilitaire, essence ou diesel, récent ou âgé, etc.), est décuplée par la variabilité même des émissions propres à chaque véhicule.

Ces dernières évoluent en effet dans le temps (suivant que le moteur est chaud ou froid, le niveau de chargement, l'âge du véhicule, son entretien, le type de conduite, etc.) et dans l'espace (fluidité du trafic et caractéristiques de la route : altitude et pente) [11].

Enfin, tous les véhicules n'émettent pas les mêmes quantités et les mêmes proportions des différents polluants. On distingue généralement les polluants émis sous forme de particules des polluants gazeux. On distingue également les polluants primaires, émis directement à l'échappement des véhicules des polluants secondaires. Ces derniers ne sont pas issus directement des moteurs mais sont produits par la réaction chimique des polluants primaires entre eux ou avec les constituants normaux de l'atmosphère. Certains polluants secondaires, comme l'ozone par exemple, sont dits photochimiques [12], car leur apparition est favorisée par l'action du rayonnement solaire qui accélère la transformation des composés primaires dans l'atmosphère.

I.1 - Origine des émissions issues des véhicules

Les polluants atmosphériques émis par les moteurs à combustion interne peuvent avoir trois origines: les gaz de ventilation de carter, les pertes par évaporation et les gaz d'échappement (voir figure 1) [12].

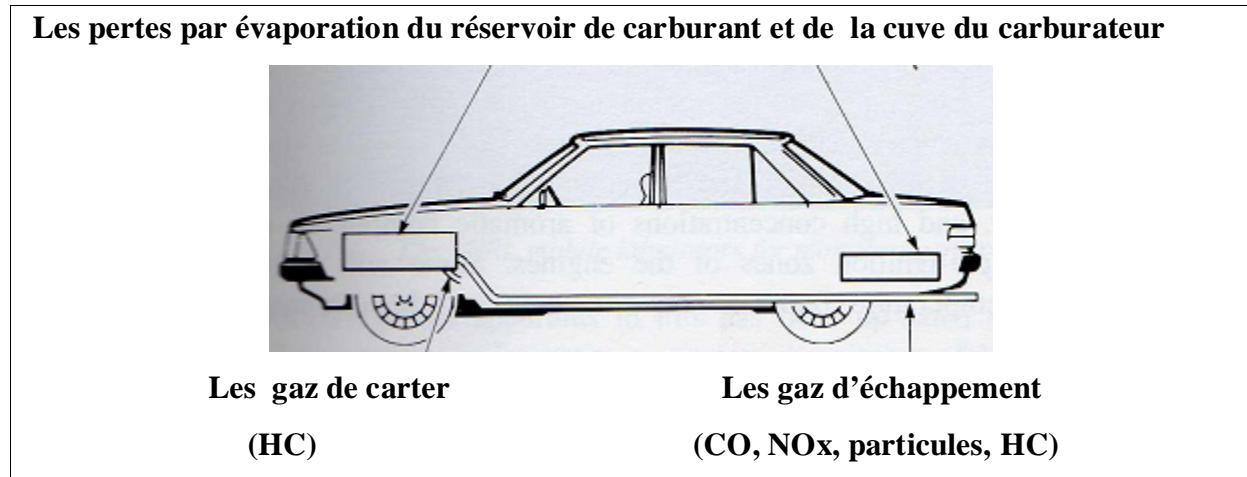


Figure 1 : Les sources à l'origine des émissions automobiles [12].

I.1.1 - Les gaz de carter :

Ces gaz proviennent des gaz de combustion ou des mélanges carburés (constitués d'air carburés à environ 80% et des gaz d'échappement [12]) envoyés dans le carter moteur au moment des phases de forte pression par l'intermédiaire des jeux fonctionnels provoquant des fuites à la segmentation des pistons et le long des organes de distribution (guides de soupapes, tiges de culbuteurs).

Avant les règlements anti-pollution, ces gaz de carter étaient envoyés à l'atmosphère par l'intermédiaire d'un événement appelé reniflard, pour éviter la mise en pression du carter et les risques d'explosion. Par la suite la solution adoptée consiste à ventiler le carter en renvoyant les gaz présents à l'admission du moteur où ils seront partiellement brûlés ou envoyés à l'échappement pour y subir une post combustion [13].

I.1.2 - Les émissions liées à l'évaporation des carburants (les pertes par évaporation)

Les pertes par évaporation se produisent par l'intermédiaire du réservoir de carburant et de la cuve du carburateur. Elles concernent essentiellement les moteurs à essence car l'essence est une substance fortement volatile et ainsi il s'évapore très facilement, par contre la volatilité du diesel étant basse, les pertes par évaporation sont donc inférieures à celle de l'essence.

Le taux d'évaporation augmente avec la température de l'air ambiant. Ainsi quand le véhicule est garé dans des terrains découverts sous le soleil, l'évaporation des carburants augmente et par conséquent les émissions polluantes aussi [14].

Les pertes à partir du réservoir se produisent en raison des changements de température et du volume de vapeur du carburant soit par respiration diurne ou au moment du remplissage du réservoir [24]. Les pertes au carburateur sont proportionnelles à la capacité de la cuve, à la pression à l'entrée et à la température du métal de la cuve, qui peut atteindre 40 à 70 °C, lors de l'arrêt du moteur chaud [13].

Ces pertes sont amenuisées sur les véhicules récents par des circuits de récupération de vapeurs qui les stockent temporairement sur des cartouches de charbon actif [12].

I.1.3 - Les émissions liées à la combustion de carburants (Les gaz d'échappement)

Les gaz d'échappement constituent la principale source de pollution automobile.

La transformation de la chaleur de combustion des hydrocarbures en travail mécanique est à l'origine des émissions polluantes des voitures à l'échappement. La combustion stœchiométrique ne produit que de la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone. En utilisation réelle du véhicule, cette combustion idéale n'est jamais réalisée. La mauvaise combustion liée d'une part au rapport air/carburant (mélange riche ou pauvre) et au régime de fonctionnement est la principale cause de ces émissions [15]. On distingue deux types d'émissions :

a) Les émissions «moteur à chaud» :

On entend par émissions à chaud les émissions produites par un moteur ayant atteint une température stable.

Ces émissions dépendent de nombreux facteurs comme la distance parcourue par chaque véhicule, sa vitesse, son âge, la taille et la cylindrée du moteur.

La vitesse a une influence majeure sur les quantités de polluants émises dans cette phase [16].

b) Les émissions « moteur à froid » :

On entend par « moteur à froid » un moteur en fonctionnement qui n'a pas encore atteint une température stable. Les émissions issues dans ce cas sont surtout prédominantes sur le réseau urbain.

L'entrée en vigueur des normes anti-pollution, l'amélioration des moteurs tendent à limiter leurs émissions et la mise en place de systèmes de post combustion (pots catalytiques) réduisent progressivement les émissions unitaires des véhicules et la pollution [12].

I.2 - Type de polluants :

La liste des polluants atmosphériques d'origine automobile est longue : parmi les polluants présents à l'état de gaz, on trouve les oxydes de carbones (CO et CO₂), les oxydes d'azote (NO et NO₂ regroupés sous l'appellation NO_x), les hydrocarbures HC et les composés organiques volatils (COVs), le dioxyde de soufre (SO₂) et les métaux lourds pour ne citer que les plus communs [16].

L'ozone troposphérique est un cas à part puisqu'il n'est pas directement issu des véhicules, mais est créé essentiellement à partir de NO_x et des COV sous l'influence du rayonnement solaire. Enfin, une partie de la pollution se trouve sous forme particulaire.

Diverses substances peuvent s'adsorber sur les particules : des hydrocarbures, notamment les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), dont certains sont cancérigènes, des métaux lourds.

Notons qu'un certain nombre de ces « polluants » sont des composés chimiques présents à l'état naturel et sont indispensables au maintien de la vie sur terre. Ainsi, c'est plus l'augmentation de leur teneur que leur présence dans l'air qui pose problème [16].

I.2.1 - Les polluants primaires :**a) NO_x - Oxydes d'azote.**

Les oxydes d'azote proviennent essentiellement de la combustion des combustibles fossiles. L'azote (N) et l'oxygène (O) entrent en réaction dans les conditions de hautes températures et de pression des moteurs pour former du monoxyde d'azote (NO).

Les NO_x mesurés à la sortie du pot d'échappement sont composés, en fonction du véhicule, principalement de NO et de NO₂, avec une proportion de 60 à 80% de NO [16].

L'oxydation de NO en NO₂ se poursuit dans l'atmosphère et explique dans le cas des villes à forte circulation la couleur brunâtre des couches d'air pollué situées à quelques centaines de mètres d'altitude (action conjointe des particules suspendues dans l'air).

Les oxydes d'azote interviennent dans la formation d'ozone, les dépôts acidifiants et eutrophisants (effet sur les sols, la faune et la flore mais aussi les bâtiments) et, par effet indirect, dans l'accroissement de l'effet de serre.

En effet, le protoxyde d'azote (N_2O) qui est engendré par l'azote présent initialement dans les combustibles ; qui est très peu réactif dans la troposphère (moins de 11 Km) mais très actif au-delà, attaquant ainsi la couche d'ozone.

b) CO - Monoxyde de carbone.

Le monoxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et insipide. Il est produit par des combustions incomplètes de matières organiques généralement dues à des installations mal réglées (surtout le cas des toutes petites installations).

Le CO_2 est émis dès lors qu'il y a combustion d'hydrocarbures, alors que le CO est émis essentiellement lorsque cette combustion est incomplète. La diffusion du CO est très rapide. Il disparaît rapidement dès que l'on s'éloigne d'une source d'émission. Le CO est un toxique puissant qui peut bloquer la fixation de l'oxygène par les globules rouges (anoxie) [14].

c) CO_2 - Dioxyde de carbone (ou gaz carbonique).

L'importance attribuée au CO_2 provient de l'accroissement rapide de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère par suite d'une augmentation de la consommation d'énergie fossile et d'une diminution importante des couverts forestiers (une forêt de type tropical absorbe de 1 à 2 kg de $CO_2/m^2/an$ tandis qu'une forêt européenne ou un champ cultivé n'absorbe que de 0,2 à 0,5 kg de $CO_2/m^2/an$) [18].

Par ailleurs, les océans jouent un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre général en carbone.

L'augmentation de CO_2 dans l'atmosphère, dans les proportions que nous connaissons, ne poserait probablement pas de problème à l'homme avant très longtemps s'il n'y avait pas l'accroissement de l'effet de serre et ses conséquences potentielles d'ordre socio-économique plus ou moins dramatiques selon les experts. Or, le dioxyde de carbone rejeté par les moyens de transport a augmenté de manière spectaculaire ces dernières décennies [16].

d) COV - Composés organiques volatils.

Les COV's regroupent une multitude de substances et ne correspondent pas à une définition très rigoureuse. Les composés organiques sont constitués par le carbone et ses combinaisons. Parmi ces substances, les hydrocarbures sont des composés binaires constitués de carbone et

d'hydrogène. Les autres grands groupes de COV sont les composés carbonés (alcanes, alcènes...) et les composés carboxylés (aldéhydes, cétones, éthers...) [16].

Rappelons que les COV's sont avec les NO_x des polluants précurseurs de la formation photochimique de l'ozone de la basse atmosphère

e) Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Les HAP, dont certains sont reconnus dangereux pour la santé car cancérigènes, sont des hydrocarbures aromatiques constitués de plusieurs cycles benzéniques (de 2 à 6, voire 8) accolés selon diverses formes. La majorité des HAP proviennent des processus de pyrolyse et en particulier de la combustion incomplète de matière organique ou de composés carbonés.

Les HAP sont la plupart du temps adsorbés sur des particules carbonées. Ils sont également détectés en phase gazeuse, en particulier dans les gaz d'échappement des moteurs à essence ; il s'agit dans ce cas des HAP de masse moléculaire la plus faible (jusqu'à 3 cycles), qu'on appelle HAP légers.

Dans les émissions diesel, une grande partie de ces HAP légers est adsorbée sur les particules en compagnie de HAP de masse beaucoup plus grande, les HAP lourds (4 cycle et plus).

Parmi les HAP, le benzo(a)pyrène (BaP) est le plus étudié car il est particulièrement dangereux pour la santé; il est émis pratiquement au même taux par un véhicule essence ou diesel [16].

f) Les BTEX (ou BTX).

Le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et les xylènes sont des HAM (Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques). Ce sont des hydrocarbures imbrûlés [15].

Le benzène est produit par décomposition des composés aromatiques si bien que même si on limite sa teneur dans les carburants, la présence de composés aromatiques entraîne sa formation. Les BTX sont les principaux COV émis par les véhicules essences non plombées. Ils sont très dangereux pour la santé (atteinte du système nerveux central entre autres) [14].

f) SO₂ - Dioxyde de soufre.

Les rejets de SO₂ sont dus en grande majorité à l'utilisation de combustibles fossiles soufrés. Les transports routiers participent pour une faible part aux émissions [15] et les normes sont de plus en plus sévères quant aux teneurs en soufre des carburants. En se transformant en acide sulfureux (H₂SO₃) ou en acide sulfurique (H₂SO₄), le SO₂ a longtemps été le principal responsable des phénomènes d'acidification (pluies acides). Ces acides très agressifs

s'attaquent aux roches calcaires (dégâts sur les bâtiments, le marbre y compris) mais aussi aux végétaux. Depuis, ce sont davantage les oxydes d'azote qui sont à l'origine des phénomènes d'acidification [16].

g) Les particules.

Le terme "particule" concerne, en général, les aérosols créés par la dispersion dans l'air de solides et de liquides atomisés, poudres ou gouttelettes et implique donc les termes de poussières, fumées, suies, brumes, brouillards, smog.

Le terme "particules en suspension" concerne essentiellement les poussières de taille inférieure à 10 μm dont la vitesse de sédimentation est lente, les particules plus grosses ayant tendance à retomber rapidement près de la source d'émission [14].

Notons que les particules ayant un diamètre inférieur à 10 μm sont désignées par le terme PM-10 (Particulate Matter), celles ayant un diamètre inférieur à 2,5 μm par PM-2,5. Le temps de séjour pour les poussières de l'ordre de 1 μm (particules diesel essentiellement) est proche de 10 jours ; d'une manière générale, les particules fines (PM10) se comportent comme un gaz et ils suivent la loi de STOCKES.

D'un point de vue biologique et sanitaire, ce sont les particules les plus fines qui sont les plus préoccupantes ; or les particules émises par les pots d'échappement sont de très petite taille (notamment pour les particules diesel qui sont responsables de 87 % des particules émises par le trafic) [17].

I.3 - Les facteurs des émissions unitaires :

I.3.1 - Emission unitaire :

Les quantités de polluants rejetées par un véhicule au cours d'une unité d'utilisation (le kilomètre ou la seconde) sont appelées « émissions unitaires » [11].

Ces émissions sont la résultante de toute une série de variables : type de véhicule, conduite du conducteur, conditions de circulation, caractéristiques de la route et des conditions climatiques.

I.3.2 - Les facteurs liés au véhicule

Les caractéristiques du véhicule ont une grande influence sur les émissions unitaires : type de véhicule, technologies mises en œuvre, type de carburant mais aussi l'entretien, le niveau de chargement et l'aérodynamisme [18].

Il existe des classifications très détaillées des divers véhicules (notamment pour les poids lourds).

Nous distinguons notamment les catégories suivantes :

- Les véhicules légers (VL) ou particuliers (VP) ou véhicule de tourisme.
- Les véhicules utilitaires (VU) comprenant les véhicules utilitaires légers (VUL) et les poids lourds (PL), et les deux roues.

D'une manière générale, plus les véhicules sont lourds, plus les besoins énergétiques sont élevés, plus la consommation de carburant augmente et plus les émissions sont importantes [19].

D'importantes variations existent entre les carburants et les diverses technologies. Etant donné leur très faible part dans le parc des véhicules, nous ne nous attarderons pas sur les carburants de substitution ou carburants alternatifs : GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié), GNC (Gaz Naturel Carburant). Ces carburants font partie des solutions pouvant permettre une réduction de la pollution automobile.

Dans cette étude, seule l'essence plombée, l'essence sans plomb, le bioéthanol seront pris en compte. Ces carburants hormis le biocarburant sont considérés comme représentant de la technologie la plus courante et la plus usagée en Algérie [10]: le moteur à essence. Sur les véhicules à essence, l'utilisation d'un pot catalytique permet de réduire les émissions de certains polluants [19].

Pour finir, rappelons qu'un véhicule chargé (ou dont l'aérodynamisme est réduit : galerie sur le toit, fenêtres ouvertes, etc.) émet une plus grande quantité de polluants puisque son moteur doit développer, pour atteindre une vitesse donnée, plus de puissance (d'où une hausse de la consommation de carburant) que lorsque le véhicule est vide ou plus aérodynamique.

Le niveau d'équipements de confort (notamment l'air conditionné) accroît aussi, la demande énergétique [11].

I.3.3 - Les facteurs liés aux conditions de circulation

Les émissions varient énormément selon les conditions de circulation : urbain lent, urbain fluide, route, autoroute, etc. En effet, les phases d'accélération et de décélération, la durée des arrêts aux feux (moteur au ralenti) ont un grand effet sur les niveaux d'émissions. Or, la vitesse est le paramètre essentiel des émissions bien que le style de conduite – qu'on évoquera plus loin – joue également mais dans une moindre mesure

Ainsi, les faibles vitesses comme les vitesses rapides sur autoroute contribuent à l'augmentation des émissions [20]. Enfin, notons aussi, que les émissions sont bien plus importantes lorsque le véhicule est froid (démarrage) [19].

I.3.4 - Les facteurs liés à la route

La route sur laquelle se déplace un véhicule influence elle aussi les émissions de ce dernier.

Deux paramètres sont à prendre en compte : l'altitude et la pente.

Les voitures sont réglées pour que les émissions soient minimales au niveau de la mer ; elles augmentent considérablement avec l'altitude : elles émettaient 4 fois plus de CO à 2500 m [21].

La pente, qui va souvent de pair avec les hautes altitudes, aggrave le niveau d'émission des véhicules (Tableau 1): comme le poids ou la limitation de l'aérodynamisme, la pente oblige le moteur à développer plus de puissance, donc sa consommation et finalement, à rejeter plus de polluants. La pente entraîne donc une augmentation considérable des émissions [11], surtout pour les PL et lorsque la pente est > 4% (tableau 1) [22].

Tableau 1 : Augmentation absolue moyenne des émissions (en g/km) pour chaque pourcentage de pente supplémentaire [11].

Polluant	CO	CO2	HC	NOx	Consommation
Surémission (g/km par % pente)	0,850	17,000	0,061	0,490	5,520 L

I.3.5 - Les facteurs climatiques

Lors du démarrage à froid, et tant que le moteur n'a pas atteint 70°C [12], les émissions sont plus importantes. La température de l'air joue donc un rôle puisqu'elle conditionne la durée qu'il faudra au moteur pour atteindre cette température. Le temps de chauffe sera d'autant plus long que la température ambiante est basse.

Aux émissions de polluants supérieures en hiver, s'ajoute le dépôt de nombreux polluants gazeux sous l'effet du faible ensoleillement et des basses températures [21].

Le vent, en ralentissant ou en facilitant le déplacement des véhicules constitue un autre paramètre influençant les émissions. Pour finir, l'ensoleillement ne joue pas de rôle sur les émissions directes des véhicules, mais les rayonnements UV sont les déclencheurs de la chimie atmosphérique à l'origine de la formation de polluants secondaires, l'ozone essentiellement [23].

I.3.6 - Les facteurs liés au conducteur

Il s'agit essentiellement du style de conduite. Un véhicule conduit de manière dite « agressive ou performante » (forte augmentation des rapports entre les vitesses, accélération, freinage, vitesse volontairement élevés) émettra une quantité de polluants supérieure au même véhicule conduit de manière « normale ou économique ». Les écarts entre les deux styles de conduite sont significatifs dans la plupart des cas, et se fait essentiellement dans la montée en vitesse.

Le tableau 2 montre l'influence des accélérations sur le total des émissions émises.

Les chiffres proposés indiquent dans quelle proportion les accélérations ont contribué aux émissions totales. Ces chiffres ont été obtenus en comparant les émissions de VP lorsque la vitesse est stabilisée avec celle d'un cycle de conduite « réelle » (de vitesse moyenne équivalente) mais comportant des phases d'accélération et de décélération [11].

Tableau 2 : Surémissions en pourcentage liées aux accélérations (comparaison cycle « réel » et vitesse stabilisée) [11].

	Vitesse (km/h)	CO	CO2	HC	NOx	Particules	Conso.
Ess. non catalysée	15	53	18	58	65		33
	90	47	14	30	11		22
Diesel	15	2	28	35	30	40	40
	90	7	17	29	21	27	18

Ce facteur « style de conduite » est important car, d'une part les variations engendrées ne sont pas négligeables, et d'autre part parce qu'il s'agit d'un des rares facteurs humains (avec l'accroissement général de l'utilisation des véhicules particuliers, mais aussi l'accroissement de la puissance et du poids des véhicules ainsi que des éléments de confort comme la climatisation) qui intervienne directement sur les émissions [18]. Le style de conduite, bien que propre à chacun, semble cependant avant tout lié à la culture du pays ; il s'agit donc d'un facteur vis à vis duquel il est possible de faire évoluer les mentalités. Il ne faut toutefois pas surestimer son influence sur les émissions : quel que soit le style de conduite du conducteur, il faut obligatoirement freiner et accélérer.

I.4 - Effets et impacts de pollution de l'air :

La pollution de l'air a un impact négatif sur la santé, les végétaux, les écosystèmes et les bâtiments : les effets sont nombreux et certains n'ont été que récemment documentés et pris en compte (par exemple les effets relatifs à l'acidification, l'eutrophisation et la pollution photochimique, les effets des rejets de gaz carbonique et autres gaz à effet de serre sur le changement climatique, ou les effets des particules fines sur la santé). Il n'existe pas en général de seuil de nocivité mais plutôt une relation croissante entre les effets et les niveaux de pollution, parfois assortis de phénomènes cumulatifs, comme pour certaines expositions chroniques [24].

I.4.1- Effets sur l'être humain :

a) Voie d'exposition :

L'inhalation est la principale voie d'exposition de l'être humain à la pollution de l'air. L'action nocive des polluants s'exerce ainsi principalement, si ce n'est exclusivement, par les voies respiratoires. Il faut rappeler qu'une personne respire chaque jour environ 15 m³ d'air et

que la zone des échanges gazeux de l'appareil respiratoire constitue une interface de 70 m² environ entre le milieu extérieur et l'organisme [25].

b) Impact des polluants sur la santé :

Les chercheurs utilisent trois principales approches pour étudier les relations entre santé humaine et polluants atmosphériques [26] : Les études épidémiologiques, Les études cliniques (exposition de sujets humains aux polluants, dans des conditions contrôlées) et les études toxicologiques.

Dans le cas des études épidémiologiques sur les effets des particules, on examine les corrélations statistiques existant entre les fluctuations de la prévalence des troubles cardiorespiratoires dans la population générale. Il faut rappeler que les effets nocifs de l'exposition aux particules sont strictement associés à l'appareil cardiorespiratoire surtout des plus jeunes (cœur et poumons) [27-30]. Il arrive qu'on conteste les résultats des analyses épidémiologiques et leur interprétation, en raison de l'existence de facteurs confondants tels que la température, l'humidité, les autres polluants et l'état de santé des sujets, qui peuvent contribuer aux effets observés [31].

Les études cliniques permettent cependant d'examiner de manière plus approfondie les corrélations établies par les études épidémiologiques, en exposant des sujets à des quantités déterminées de polluants ; évidemment, pour des raisons d'éthique, les effets sur la santé induits doivent être réversibles et de courte durée [32].

Les études toxicologiques consistent à exposer des animaux, ou des tissus humains et animaux, à des polluants. Cependant, il est difficile d'extrapoler aux être humains les résultats obtenus chez des animaux [26].

Dans une optique de santé publique, les études épidémiologiques constituent le meilleur moyen d'examiner les effets sur la population générale d'une exposition aux polluants qui sont réellement présents dans l'atmosphère [31].

Les études cliniques et toxicologiques sont alors utilisées pour corroborer éventuellement les signes épidémiologiques observés et expliquer les mécanismes par lesquels l'exposition aux particules peut provoquer l'apparition de certains effets [26].

Les effets néfastes de la pollution atmosphérique urbaine ont été mis en évidence par des études épidémiologiques. Ils sont cohérents avec les travaux toxicologiques, même si l'ensemble des phénomènes physiopathologiques n'est pas encore expliqué [33], pourtant la densification du trafic routier dans les grandes métropoles et grandes villes ses dernières

années s'accompagnent avec des hausses du nombre de personnes atteintes de maladies respiratoires [34].

Les effets sont classés en deux groupes [35] :

a) Les effets à court terme :

Ils sont les manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques survenant dans des délais brefs (quelques jours ou semaines) suite aux variations journalières des niveaux ambiants de pollution atmosphérique.

b) Les effets à long terme :

Ils peuvent survenir après une exposition chronique (plusieurs mois ou années) à la pollution atmosphérique et qui peuvent induire une surmortalité et une réduction de l'espérance de vie. L'exposition à long terme aux particules fines conduit à un risque accru de cancer du poumon et à une augmentation du risque de décès et plus spécifiquement par maladies cardio-respiratoires. Mais il reste difficile d'attribuer un effet spécifique à un polluant en particulier.

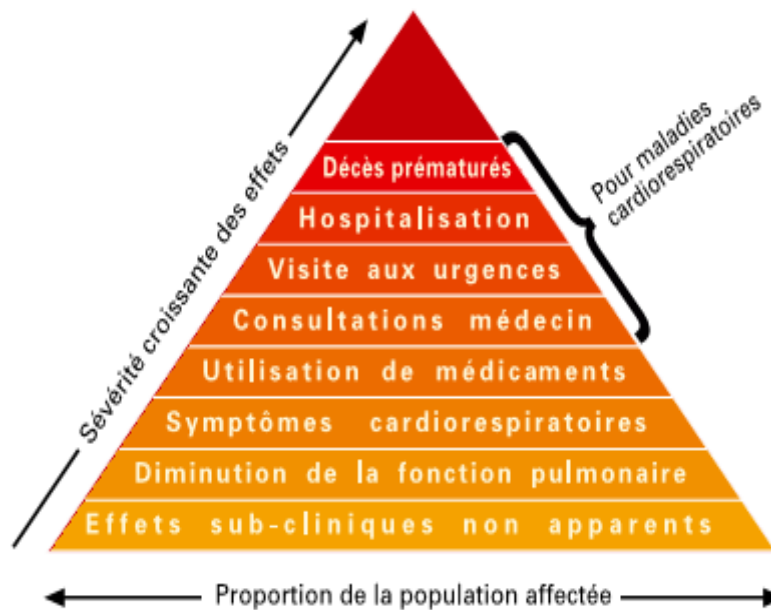


Figure 2. Pyramide des effets aigus associés à la pollution atmosphérique [35].

c) Effets sur les animaux

L'intoxication se traduit par l'introduction dans l'organisme animal de certaines substances toxiques supportées par des particules et après une exposition plus ou moins longue.

L'arsenic, le plomb et le sélénium sont toxiques pour les animaux. Ils se produisent certains symptômes au niveau du système nerveux, de l'appareil respiratoire et du tube digestif.

Les poussières alcalines provenant des composés du calcaire dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et modifications du pH [36].

d) Effets sur les végétaux

Les végétaux sont exposés de manière durable à la pollution atmosphérique. Dans certaines recherches, Ils sont d'ailleurs utilisés comme bio-indicateurs (lichens par exemple). Ils peuvent être l'objet d'atteintes aiguës telles que nécroses et d'atteintes chroniques telles que troubles de croissance. A part les forêts, la pollution de l'air touche aussi les céréales et les plantes agricoles, comme les pois, les épinards et le trèfle [37].

Certaines espèces d'arbres fruitiers sont également très sensibles; c'est le cas par exemple des abricotiers. Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussière et de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints directement par le feuillage et aussi indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). Bien que chaque polluant ait un effet spécifique, ce sont surtout les retombées acides qui sont dangereuses pour les végétaux [37].

La couche protectrice des feuilles et des aiguilles peut subir des lésions visibles, telles que fentes et augmentation de la taille des pores. L'eau de pluie ruisselant à l'intérieur des forêts présente un pH inférieur à celui des pluies en terrain découvert. La base du tronc est ainsi fortement atteinte [38].

L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux radicelles des arbres et se répercuter sur l'activité des micro-organismes, comme les bactéries de l'azote par exemple.

En tant qu'oligo-éléments, les plantes ont besoin de composés métalliques à base de cuivre, fer, zinc, ...etc. Mais une accumulation de ces métaux équivaut à un empoisonnement.

e) Effets sur les matériaux

Les dégradations des matériaux, (métaux, pierres, peintures, tissus, cuir, plastiques, caoutchouc, papier...), utilisés dans différentes fonctions (bâtiment, matériels mécaniques et électroniques, revêtements...) dues aux particules solides peuvent se produire par abrasion, salissure et corrosion [16].

Les peintures peuvent être assombries par les dépôts de particules solides noires. Les surfaces fraîchement peintes sont généralement collantes et retiennent les particules.

A coté de la corrosion des matériaux, une autre forme d'impact de la pollution atmosphérique sur le cadre bâti est constituée par le phénomène de salissure de la surface des matériaux du fait des dépôts de particules. Les particules fines, et notamment les particules émises par les moteurs diesel, paraissent particulièrement efficaces et ils peuvent s'infiltrer à l'intérieur des habitations et provoquent la salissure des murs, plafonds, tapis, ...etc.

Cette dégradation de la bâtie (bâtiment, monuments historiques,...) est l'effet le plus visible. Des relations mathématiques entre la diminution du réfléchissement d'une peinture blanche et la teneur en particules suies ont été établies [20].

f) Effet sur la visibilité

La visibilité est la qualité de l'atmosphère qui permet de voir à une plus ou moins grande distance, mais aussi de voir plus ou moins bien des objets proches et d'en apprécier les détails de couleur ou de texture. La visibilité est considérée comme un élément de bien-être.

La pollution atmosphérique réduit la visibilité par absorption et par diffraction de la lumière.

L'absorption est principalement le fait des particules de carbone élémentaire émises notamment par les moteurs diesels, et de gaz tels que le dioxyde d'azote qui donne à l'atmosphère une couleur brune [39].

Dans les effets sur l'environnement global, on invoque de plus en plus un éventuel effet des particules sur les changements climatiques. Les particules peuvent réfléchir les rayons ou constituer un écran, ce qui conduirait à un refroidissement de la planète (action antagoniste à l'effet de serre) [26].

I.5 - Statistique du parc national :

a) Genre de véhicule :

Due à la forte croissance économique depuis le début de l'année 2000, le parc automobile algérien n'a cessé d'évoluer, le nombre de véhicule de tourisme (nom donné aux véhicules légers, classification selon la base de données de l'ONS) sujet de la présente étude n'a cessé d'augmenter jusqu'à occuper près de 62 % du parc global. Ainsi, l'étude de ce genre de véhicule à lui seule peut donner une bonne approximation (voir tableau 3) de la pollution atmosphérique issue du trafic routier en Algérie [10].

Tableau 3 : répartition du parc national automobile selon le genre des véhicules au 31/12/2009 [10].

Genre du véhicule	Nombre	Pourcentage
Véhicule de tourisme	2 593 310	62,16%
Camion	362 257	8,68%
Camionnette	821 626	19,69%
Autocars-Autobus	70 070	1,68%
Tracteur routier	63 417	1,52%
Tracteur agricole	130 839	3,14%
Véhicule spécial	3 358	0,08%
Remorque	115 972	2,78%
Moto	10 978	0,26%
Total	4 171 827	

b) Source d'énergie :

Malgré un vif engouement ces dernières années, de la part des usagers, pour les véhicules diesel, l'essence reste largement en tête avec plus de 81 % des véhicules roulant du parc automobile Algérien (voir tableau 4) [10].

Tableau 4 : répartition du parc automobile selon l'énergie et le genre de véhicules [10].

Genre du véhicule	Essence	Pourcentage	Gasoil	Pourcentage	Total
Véhicule de tourisme	2115242	81,57%	478068	18,43%	2 593 310
Camion	20018	5,53%	342239	94,47%	362 257
Camionnette	525978	64,02%	295648	35,98%	821 626
Autocars-Autobus	1442	2,06%	68628	97,94%	70 070
Tracteur routier	1036	1,63%	62381	98,37%	63 417
Tracteur agricole	2816	2,15%	128023	97,85%	130 839
Moto	10241	93,29%	737	6,71%	10 978
Total	2677120	66,01%	1378735	33,99%	4 055 855*

*Total n'incluant pas les remorques.

c) Age Moyen du parc

Il est aussi à noter ici, que malgré une sensible croissance économique, le parc automobile algérien reste très vieux avec 64 % des véhicules qui ont 15 ans et plus en moyenne d'âge, notamment les véhicules lourds et autres tracteurs qui en moyenne sont âgés de plus de 20 ans, à ne pas oublier que ce genre de véhicules qui constitue plus de 10 % du parc automobile global roule exclusivement au diesel ce qui induit une forte pollution en particule fines.

Néanmoins une précédente étude du parc algérien [40], basé elle-même sur une étude faite auparavant [41], a révélé qu'il y avait certaines disparités de tailles entre la réalité et les chiffres de l'office national algérien des statistiques, cela est du essentiellement à ce que :

- L'ONS considère que tout les véhicules ayant un numéro d'immatriculation comme faisant partie intégrale du parc national, ce qui peut mener à des surestimations, vu que beaucoup de vieux véhicules ne sont plus en circulation dus à leurs usures.

Tableau 5 : répartition du parc national automobile selon les tranches d'âges des véhicules au 31/12/2009 [10].

Age	Nombre de véhicules	Pourcentage
<i>0 à 4 ans</i>	933 053	22%
<i>5 à 9 ans</i>	346 788	8%
<i>10 à 14 ans</i>	214 287	5%
<i>15 ans et plus</i>	2 677 699	64%
Total	4 171 827	4 171 827

Dans le tableau 5, il est remarquable de constater que 22 % du parc à moins de 5 ans de moyenne d'âge, alors que seulement 13 % ont une moyenne d'âge allant de 5 à 15 ans. Ce qui nous indique une forte évolution du parc automobile ces dernières années dues notamment à une croissance économique sensible.

d) Origine des véhicules :

Dans le tableau 6, on remarque qu'avec plus de 82 % du parc automobile algérien a comme pays d'origine un des pays membre de l'union européenne, il est d'emblée à noter que le parc automobile national suit les évolutions du parc européens et cela malgré une certaine progression des ventes de véhicules asiatiques ces dernières années, notamment japonaise et coréenne surtout.

Tableau 6 : répartition du parc national automobile selon le pays d'origine au 31/12/2009 [10].

Pays d'origine	Nombre	Pourcentage
<i>UE</i>	2114956	82%
<i>Japon</i>	172568	7%
<i>Corée du sud</i>	124405	5%
<i>États-Unis</i>	65435	3%
<i>Autres</i>	106356	4%
<i>Total</i>	2583720	100%

L'exemple le plus typique de cette tendance à suivre le modèle européen, est la diésélisation très forte des véhicules de tourisme, des deux parcs automobiles (européens et nationales) ces dernières années, mais avec un décalage de 5 à 10. Cela est dû notamment aux dernières avancées technologiques permettant au diesel d'être plus performant et plus économique. En effet les véhicules de tourisme qui roulent au diesel ne représentaient que 5%, au milieu des années 90, ce chiffre n'a cessé d'évoluer jusqu'à atteindre ces dernières années plus de 18 % du parc national (voir figure 3).



Figure 3: évolution du parc automobile selon la source d'énergie pour les véhicules de tourisme au 31/12/2009 [10].

Globalement, c'est tout le parc national qui se diésélise, comme le montre les données de la figure 4.

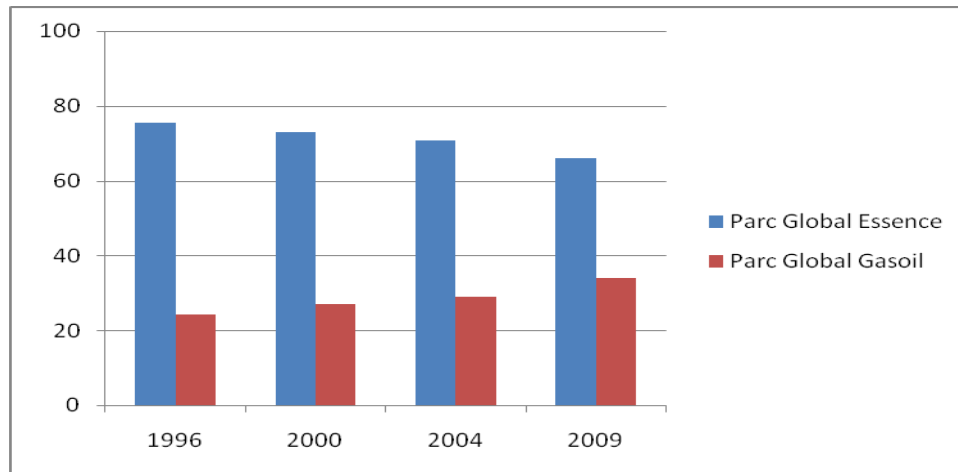


Figure 4: évolution du parc automobile selon la source d'énergie pour les véhicules de tourisme au 31/12/2009 [10].

Chapitre II

Les carburants

Introduction :

Dans leur immense majorité, les carburants sont des liquides, ce qui permet d'obtenir un excellent compromis entre la compacité, la facilité et la sécurité de mise en œuvre. Ces pour ces mêmes raisons que les carburants gazeux ont du mal à se développer d'une manière conséquente [16].

Quant aux carburants solides (charbon, bois) leur contribution qui fut parfois importante en période de pénurie énergétique ne revêt plus maintenant qu'un intérêt historique.

Les carburants proviennent essentiellement du pétrole qui, lui-même, assure encore, une part importante de la consommation d'énergie primaire dans toutes les régions du monde. Mais ces énergies fossiles sont loin d'être inépuisables, pour faire face donc, aux pénuries prochaines, des sources d'énergies alternatives se développent, c'est le cas notamment des biocarburants.

Les **biocarburants** sont des carburants d'origine végétale issus de la biomasse (d'où le surnom de « **carburants verts** »).

On les produit à partir de déchets végétaux ou de plantes cultivées dans ce but. Ils possèdent des propriétés similaires au pétrole et peuvent parfois s'employer dans des moteurs diesel ou des moteurs à essence ; ils se substituent partiellement ou parfois même dans certains moteurs dédiées, totalement aux carburants pétroliers.

I. Définition :

Un **carburant** est un combustible qui alimente un moteur thermique. Celui-ci transforme l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique.

Comme leur nom l'indique, les carburants contiennent du carbone. (Dans le cas de l'hydrogène par exemple on parlera de combustible). Souvent sous forme liquide ou gaz, ils peuvent être classés de différentes manières.

On peut par exemple distinguer les carburants fossiles des biocarburants.

Les premiers, sont ceux qui proviennent de la transformation des matières organiques mortes mélangées à divers minéraux à de grandes profondeurs. Cette transformation nécessite plus d'un million d'années et se déroule à des températures et pressions très élevées. Ils sont en quantité limitée sur terre. Ils sont aussi parfois appelés hydrocarbures [42].

Tandis que les seconds, proviennent de plantes ou animaux (non fossilisés). Parmi les produits les plus développés commercialement à l'étranger, citons le bioéthanol et le biodiesel.

II - Types de carburants :

Pour ce qui nous concerne, on se résumera à une analyse bibliographique de l'essence et du bioéthanol sujets de notre expérimentation.

II.1 - Les Essences :

L'essence est utilisée comme carburant dans les moteurs thermiques ou les moteurs à combustion interne à allumage commandé. C'est un mélange d'hydrocarbures, auxquels sont parfois ajoutés d'autres produits combustibles ou adjuvants. On y trouve en moyenne [43]:

- 20 % à 30 % d'alcane, hydrocarbures saturés de formule C_nH_{2n+2} ,
- 5 % de cycloalcane, hydrocarbures saturés cycliques,
- 30 % à 45 % d'alcène, hydrocarbures non saturés,
- 30 % à 45 % d'hydrocarbures aromatiques, de la famille du benzène.

II.1.1 - Caractéristique des essences :

Les caractéristiques essentielles de l'essence automobile sont de deux ordres : les unes se rattachent à sa courbe de distillation, les autres à la constitution chimique des hydrocarbures qui la composent. Cependant les deux voies sont liées.

a) La densité

La densité est la caractéristique la plus simple à mesurer, elle est influencée par une autre propriété fondamentale : la composition chimique [43]. Si on utilise une essence de faible densité, elle entraînera une augmentation de la consommation et, une mauvaise vaporisation. Avec une

essence de forte densité, la consommation spécifique diminue, mais la pauvreté du mélange carburé se traduit par un manque de puissance [44].

b) Distillation ASTM

Les essences sont des mélanges d'un grand nombre d'hydrocarbures ayant chacun des points d'ébullition différents. L'intervalle va généralement du $C_5 - C_6$ (environ 35°C) à $C_{15} - C_{16}$ (environ 210°C).

Si l'on note, quand on effectue une distillation au laboratoire, la température à laquelle distille un certain volume d'essence, on obtient des points qui, réunis entre eux, donnent la courbe de distillation. Les températures sont données en ordonnées, les pourcentages distillés en abscisse.

La courbe de distillation ASTM reflète en un certain sens la composition du produit et que la comparaison des courbes ASTM permet de tirer des conclusions sur la répartition des hydrocarbures dans les échantillons analysés. C'est ainsi que le point 10% de la distillation ASTM peut caractériser suffisamment la richesse en hydrocarbures légers, le point 50%, le niveau moyen de la volatilité d'ensemble, le point 90% et le point final, la richesse en hydrocarbures lourds à points d'ébullition élevés [45].

L'examen de la courbe de distillation ASTM d'une essence nous renseigne sur son comportement dans les moteurs, notamment en ce qui concerne les facilités de départ à froid, les mises en action, les facultés d'accélération, les dépôts possibles dans les chambres de combustion [43].

Un suivi strict de la volatilité de l'essence est essentiel pour garantir un bon fonctionnement du moteur dans toutes les conditions. Si la volatilité est trop faible, le moteur démarre difficilement par temps froid ; si elle est trop élevée, le moteur peut caler ou présenter des difficultés de redémarrage par temps chaud, ajouté à cela, les pertes par évaporations lors de l'approvisionnement qui peuvent être source de pollution [12].

c) Tension de vapeur Reid (volatilité)

Cette caractéristique liée à la précédente a une grande importance en ce qui concerne le comportement du carburant dans le moteur. En fait, elle mesure l'aptitude plus ou moins prononcée d'un carburant à émettre des vapeurs [43].

Les spécifications de tension de vapeur Reid imposent un maximum à ne pas dépasser : 800 g/cm² en hiver et 650 g/cm² en été.

Les éléments volatils favorisent le démarrage à froid en hiver, mais risquent de provoquer le givrage du carburant pendant la mise en température du moteur, par suite de l'humidité atmosphérique. On remédie à cet inconvénient en limitant la TVR et en ajoutant des additifs antigivres (ou antigel) à l'essence [44].

De même en été, une trop forte proportion d'hydrocarbures légers peut provoquer l'arrêt du moteur par formation d'un bouchon de vapeur ou « vapor lock » [45].

d) Indice d'octane

C'est la caractéristique la plus importante. C'est une mesure de la valeur antidétonante du carburant ou, encore, son aptitude à supporter la compression.

Les carburants commerciaux étant composés d'un grand nombre d'hydrocarbures, chacun de ces hydrocarbures réagissant différemment aux paramètres influençant la détonation (pression, température, richesse etc.). Le carburant idéal devrait posséder des isoparaffines et des oléfines dans ses fractions légères et des aromatiques dans sa partie lourde [43].

Cette caractéristique intéresse principalement le constructeur en ce qu'elle est déterminante pour le calcul de base de son moteur ; l'indice d'octane préside, en effet, au choix du taux de compression ; de ce choix découle les efforts supportés par les organes, donc leur dimensionnement, la rigidité, la puissance spécifique et enfin la consommation [45].

On peut dire que l'amélioration des rendements des voitures depuis ces dernières années est due pour une large part à l'augmentation de l'indice d'octane des carburants.

La mesure de l'indice d'octane se fait par méthode C. F. R (Cooperative Fuel Research), moteur monocylindrique, exceptionnellement robuste, à taux de compression variable construit par la société Wankesha (U.S.A) en 1928 [43].

Il existe deux procédures normalisées de détermination des indices d'octane: la méthode «Recherche» et la méthode «Moteur». Les indices correspondants sont désignés par les sigles RON (Research Octane Number) et MON (Motor Octane Number).

Les distinctions entre ces deux procédures portent essentiellement sur les conditions de fonctionnement du moteur CFR, lors de la mesure; ainsi, dans le premier cas (RON), le moteur tourne à 600 tr/min et le mélange air-carburant n'est pas réchauffé avant son admission dans le

cylindre; dans le second cas (MON), la vitesse de rotation atteint 900 tr/min et la température d'admission 150 °C.

La plupart des essences classiques présentent un RON compris entre 95 et 99, tandis que le MON se situe, le plus souvent, entre 85 et 89; plus précisément, la différence RON-MON est généralement proche de 10 points.

C'est pour accroître l'indice d'octane d'un carburant, qu'on met du plomb tétraméthyle ou du plomb tétraéthyl. Pour les carburants sans plomb, on utilise des composés organiques, comme le méthyle tertiobutyl éther [45].

II.1.2 - Spécifications nationales des essences

En Algérie, la demande en carburants a nettement augmenté avec la croissance du parc automobile, l'essence représente environ 23 % de la demande totale en produits pétroliers.

Toutefois, les spécifications des essences n'ayant pas beaucoup évolué, si ce n'est la tendance à la diminution de la teneur en plomb (jusqu'à 0.4g/l) pour diminuer la pollution en métaux lourds.

Il est à signaler la mise sur le marché national dès 1998 de l'essence sans plomb pour répondre à une demande de véhicules munis de pots catalytiques, sans toutefois qu'un basculement intégrale vers ce type de carburant ne soit envisagé [46].

Les spécifications nationales des essences actuelles (NORME ALGERIENNE NA 8108 et NA 11042) ne sont pas conformes aux spécifications internationales et notamment pour ce qui concerne le respect des teneurs en plomb, aromatiques, benzène, et autres.

Aussi, une mise à niveau de l'outil de raffinage s'avère nécessaire pour se conformer aux spécifications internationales [47].

a) Essence normal

C'est un mélange d'hydrocarbures (qui comptent de 4 à 7 atomes de carbone) d'origine minérale ou de synthèse et éventuellement de composés oxygénés organiques, coloré, selon les normes algériennes il doit répondre aux spécifications données au du tableau N°7 [48].

Tableau 7 : Caractéristiques de l'essence normal [48].

Caractéristiques	unités	Limites		Méthodes d'essai
		MIN	MAX	
Nombre d'octane « recherche », RON		89		<i>NA 2653</i>
Teneur en plomb	<i>g/l</i>		0,40	<i>NA 2803</i>
Teneur en soufre	<i>%pds</i>		0,01	<i>NA 11046</i>
Teneur en gomme actuelle (lavées au solvant)	<i>Mg/100ml</i>		10	<i>NA 2654</i>
Distillation			70	<i>NA1445</i>
10%	°C		140	
50%	°C		195	
95%	°C		205	
Point final	°C		2	
résidu	<i>% Vol</i>			
Corrosion à la lame de cuivre	<i>Cotation</i>		1b	<i>NA 566</i>
Tension de vapeur Reid				<i>NA 422</i>
Hiver du 1/11 au 31/03	<i>kPa</i>		80	
Été du 1/04 au 30/10			65	
Densité à 15 °C		0,710	0,765	<i>NA 417</i>
DOCTOR TEST		<i>Négatif</i>		<i>NA 8115</i>

b) Essence super

C'est le mélange d'hydrocarbures (qui comptent de 4 à 7 atomes de carbone) d'origine minérale ou de synthèse et éventuellement de composés oxygénés organiques, coloré, et répondant aux spécifications du tableau 8: [48].

Tableau 8 : Caractéristiques de l'essence super [48].

Caractéristiques	Unités	Limites		Méthodes d'essai
		MIN	MAX	
Nombre d'octane « recherche », RON		96		NA 2653
Teneur en plomb	<i>g/l</i>		0,40	NA 2803
Teneur en soufre	<i>%pds</i>		0,01	NA 11046
Teneur en gomme actuelle (lavées au solvant)	<i>Mg/100ml</i>		10	NA 2654
Distillation			70	NA1445
10%	°C		140	
50%	°C		195	
95%	°C		205	
Point final	°C		2	
résidu	<i>% Vol</i>			
Corrosion à la lame de cuivre	<i>Cotation</i>		1b	NA 566
Tension de vapeur Reid				NA 422
Hiver du 1/11 au 31/03	<i>kPa</i>		80	
Été du 1/04 au 30/10			65	
Densité à 15 °C		0,730	0,770	NA 417
DOCTOR TEST		Négatif		NA 8115

c) Essence sans plomb :

De même que l'essence super mais sans additions de plomb, il doit répondre aux spécifications résumées en tableau 9 [49].

Tableau 9 : Caractéristiques de l'essence sans plomb [49].

Caractéristiques	unités	Limites		Méthodes d'essai
		MIN	MAX	
Nombre d'octane « recherche », RON		95		NA 2653
Nombre d'octane « moteur », MON		85		NA 2653
Teneur en plomb	<i>g/l</i>		0,013	NA 11044
Teneur en benzène	<i>%V/V</i>		5	NA 11044
Masse volumique à 15 °C	<i>Kg/m³</i>	725	780	NA 417
Teneur en soufre	<i>%pds</i>		0,01	NA 11046
Stabilité à l'oxydation	<i>Min</i>	360		NA 8139
Teneur en gomme actuelle (lavées au solvant)	<i>Mg/100ml</i>		5	NA 2654
Aspect		<i>Clair et limpide</i>		<i>Insp visuelle</i>
Distillation				
70°C	<i>%V/V</i>		47	
100°C		15	70	
180°C		40		NA1445
210°C		85		
Point final	<i>°C</i>	90	215	
Résidu	<i>%V/V</i>		2	
Corrosion à la lame de cuivre (3h à 50°C)	<i>Cotation</i>	<i>CLASSE 1</i>		NA 566
Tension de vapeur Reid				
Hiver du 1/11 au 31/03	<i>kPa</i>		80	NA 422
Été du 1/04 au 30/10			65	

II.2 - Les biocarburants :

II.2.1 - Historique :

Les biocarburants sont connus depuis les débuts de l'industrie automobile. En effet, Nikolaus Otto, l'inventeur du moteur à explosion avait conçu son invention pour utiliser de l'éthanol ; tandis que Rudolf Diesel l'inventeur du moteur à combustion faisait tourner ses machines à l'huile d'arachide [50].

Avec le premier et second choc pétrolier de 1973 et 1979, les autorités publiques, et les milieux académiques s'intéressèrent davantage aux biocarburants.

De nombreuses études furent ainsi menées à la fin des années 1970 et au début des années 1980. C'était le Brésil qui avait pris les devants dès les années 1970 en lançant un vaste programme de développement de l'éthanol à partir de la canne à sucre. Pour cela le gouvernement (par le biais de la société pétrolière nationale Petrobras) s'était engagé à acheter à bon prix tout l'éthanol que les paysans pourraient produire. Petrobras revendait ensuite cet éthanol aux automobilistes dans tout le pays [50].

Mais, avec le contre-choc pétrolier de 1986 (baisse des prix de l'or noir), l'enthousiasme international pour les énergies renouvelables en général et pour les biocarburants en particuliers retombèrent rapidement.

Finalement, au début et milieu des années 2000, avec la nouvelle hausse du prix du baril de pétrole, et la crainte du pic pétrolier, la volonté de lutter contre l'effet de serre, et avec les craintes sur la stabilité de certains pays producteurs, les gouvernements multiplièrent les discours et aides pour le secteur des biocarburants.

II.2.2 - Origines et types de biocarburants :

Les biocarburants sont des carburants d'origine végétale issus de la biomasse. On les produit à partir de végétaux ou de plantes cultivés dans ce but, de sous-produits et déchets organiques ou de biomasse exploitée pour cela (bois).

Définition de biomasse [51] :

« Quatrième source d'énergie primaire consommée dans le monde après le pétrole, le charbon et le gaz, la biomasse représente aujourd'hui la première forme d'énergie renouvelable. »

Les biocarburants de 1^{ere} génération regroupent l'ensemble des produits dont il est possible d'extraire de l'huile végétale pour la production de biodiesel pour les moteurs diesel, à savoir le colza, le tournesol, le soja, le palmier à huile, etc., ainsi que les produits dont il est possible de fermenter les sucres pour la production d'éthanol pour les moteurs à essence, à savoir la betterave sucrière, la canne à sucre, les céréales riches en amidon (blé, maïs) [51].

Les biocarburants de 2^{eme} génération ou filières du future, désignées aussi sous le terme de matières lignocellulosiques (bois, paille), correspondent à l'ensemble des produits composés de cellulose, hémicellulose et lignine transformables en substitut au gazole et au kérosène (filière Biomass-to-Liquid) ou à l'essence (éthanol) comme indiqué sur la figure 5 [52].

Potentiel Algérien :

En Algérie, le potentiel forestier actuel est évalué à environ plus de 37 Millions de TEP (Tonnes équivalent pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre 3,7 Millions de TEP. Soit un taux de récupération actuel de l'ordre de 10% [53].

Le potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles non recyclés est de 5 millions de tonnes. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de Tep/an [53].

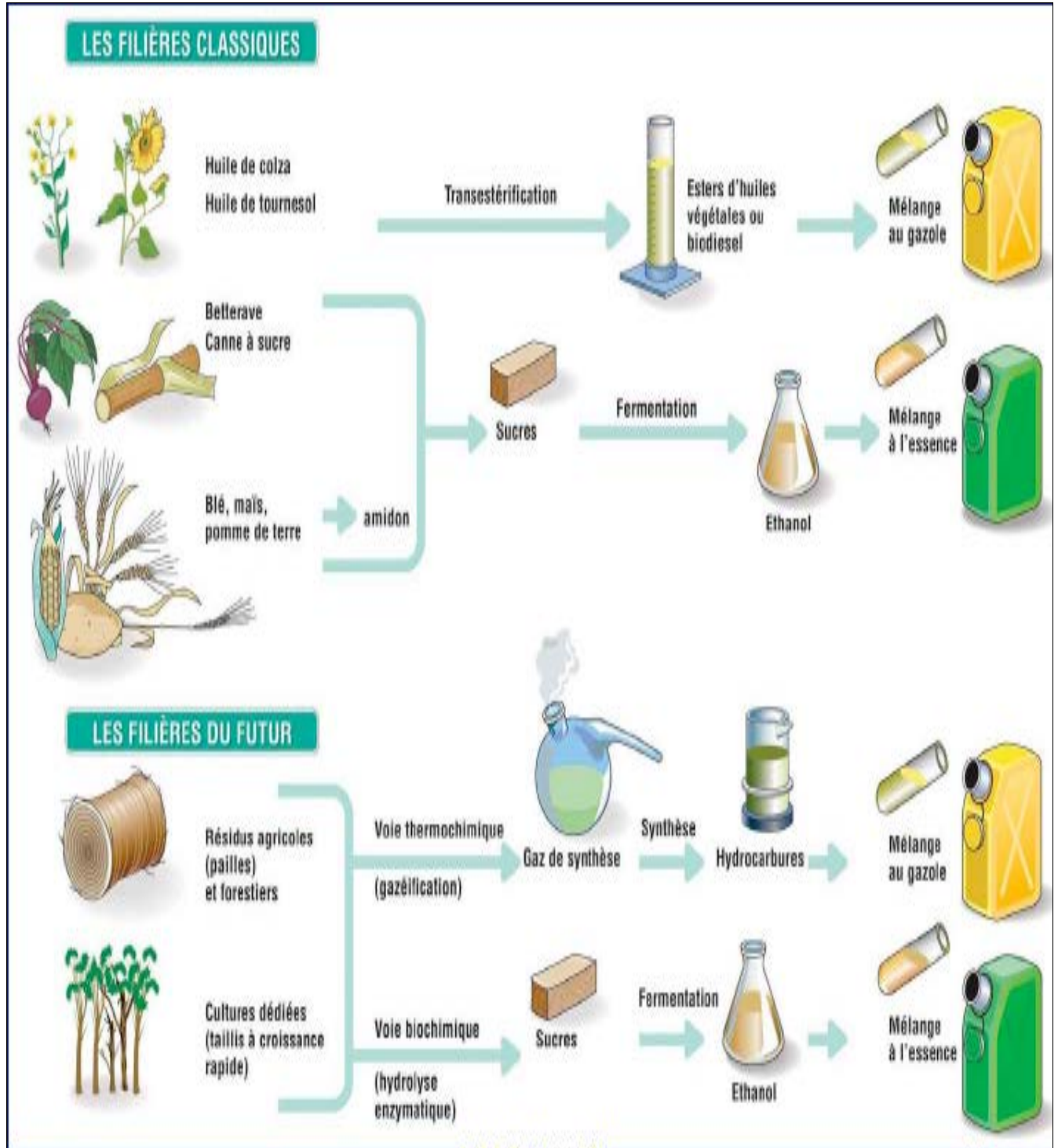


Figure 5 : Filières de production des biocarburants [52].

II.2.3 - Principaux types de biocarburants

Les biocarburants peuvent être produits à partir de diverses matières premières (voir figure 6), selon différents procédés de transformation [51].

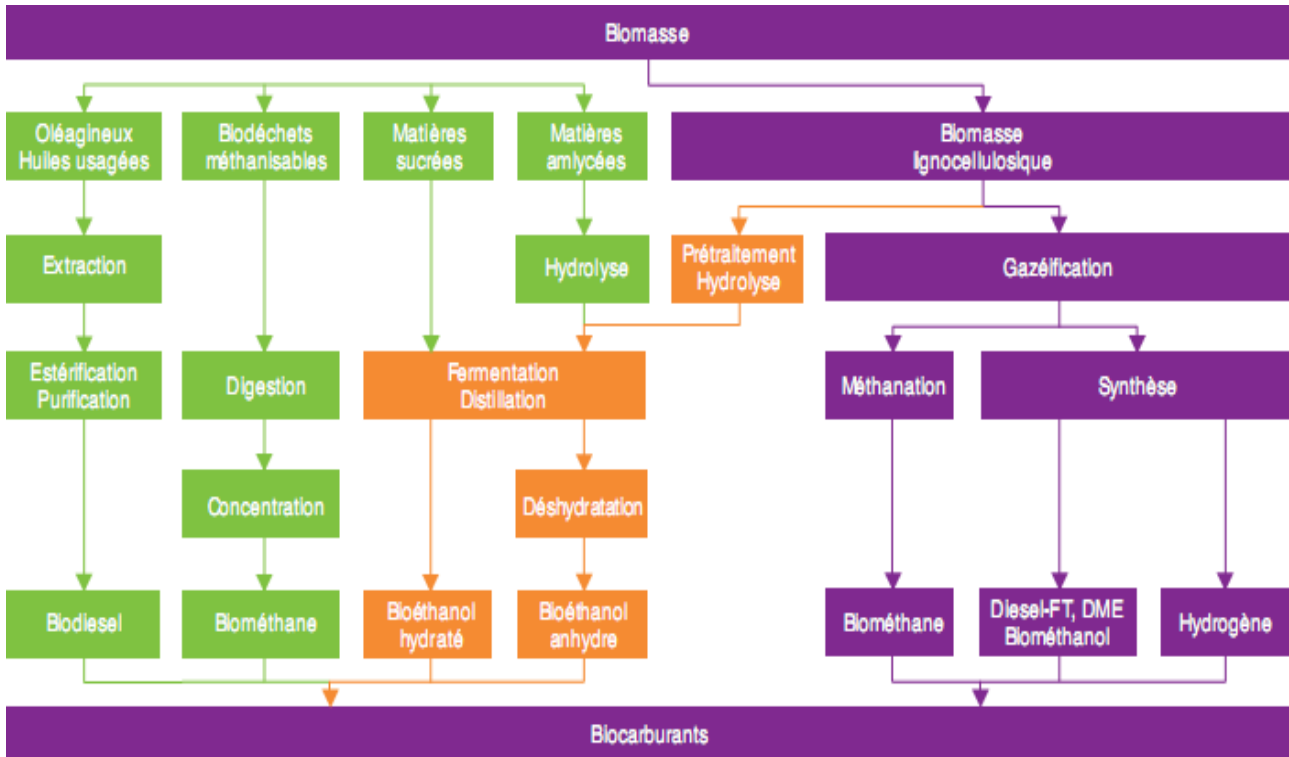


Figure 6 : Différents voies de production de biocarburants [51].

Aujourd'hui les principaux biocarburants, en termes de production, sont le bioéthanol et le biodiesel [54]. Aussi, trois grandes classes peuvent se dégager (figure 7) [55].

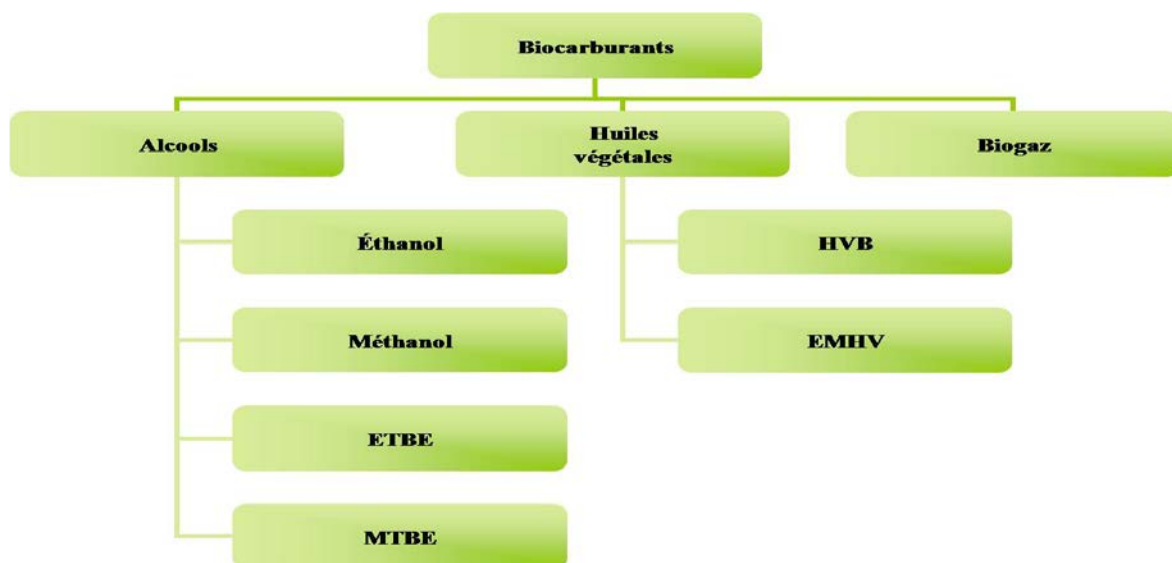


Figure 7 : Différents types de biocarburants [55].

II.2.3.1- Les alcools et leurs éthers

a) Alcool éthylique ou éthanol

Tous les sucres fermentescibles (glucose, saccharose, etc.) peuvent être transformés en éthanol par fermentation. Ces sucres sont présents dans un état plus ou moins polymérisé dans trois filières du monde végétal : la filière sucrière (la betterave à sucre, la canne à sucre), la filière amylicée (le blé, le maïs, la pomme de terre), mais également dans la filière lignocellulosiques (l'herbe ou encore le bois).

Suivant l'état de polymérisation, ces sucres doivent subir un (ou plusieurs) traitement(s) préalable(s), dont le but est de transformer les chaînes de polymères en sucres simples.

Après fermentation à l'aide de micro-organismes (levures, bactéries, etc.), l'éthanol est recouvré par distillation (éthanol hydraté à 95-96% v/v), puis par déshydratation (éthanol anhydre à 99,7% v/v) [56].

Dans cette étude, c'est ce type d'alcool (éthanol anhydre) qui a été utilisée dans nos expérimentations, avec des proportions allant de 5 à 15 % en mélange avec l'essence pour constituer le biocarburant. Il sera décrit plus en détail ultérieurement.

b) Méthanol

Le méthanol est produit abondamment dans le monde, à partir de gaz naturel. Il peut être produit également à partir de biomasse, et de bois en particulier. Le méthanol produit pourrait servir de constituant pour fabriquer des esters méthyliques d'huile végétale ou du MTBE (méthyl-tertiobutyl-éther) [56].

c) ETBE (éthyl-tertiobutyl-éther)

L'ETBE peut être produit industriellement à partir de différentes matières premières et de différents procédés à partir d'éthanol et d'isobutène [56].

d) MTBE (méthyl-tertiobutyl-éther)

Le MTBE peut être produit industriellement à partir de différentes matières premières et de différents procédés à partir de méthanol et d'isobutène [56].

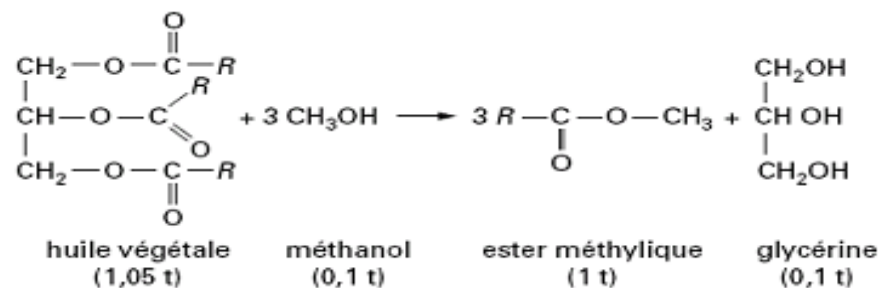
I.2.3.2 - Huiles végétales et leurs esters

a) Huiles végétales non transformées chimiquement

Les huiles végétales s'obtiennent classiquement par simple pressage de graines oléagineuses, suivi d'une extraction par solvant de l'huile résiduelle contenue dans le tourteau. Elles ont cependant une très forte viscosité et une aptitude à l'auto-inflammation (indice de cétane) faible, qui les rendent plus difficiles à utiliser en l'état dans certaines conditions, à faible température, du fait de la longueur de leurs chaînes carbonées. Elles peuvent alors être transformées chimiquement, en raccourcissant ces chaînes, ce qui modifie leurs caractéristiques [57].

b) Esters d'huiles végétales

De nombreux esters peuvent être obtenus avec des caractéristiques différentes selon leur longueur de chaîne carbonée. Les acides gras des huiles végétales sont estérifiés couramment avec l'alcool dont la formule est la plus simple, le méthanol. L'éthanol peut être également utilisé, mais la purification de l'ester semble industriellement plus délicate que celle de l'ester méthylique. La réaction utilisée est dans ce cas la transestérisation donnant ainsi un ester méthylique d'huile végétale (EMHV):



La réaction est obtenue avec un catalyseur basique ou acide, à température modérée de 20 à 60°C et à la pression atmosphérique.

II.2.3.3 - Biogaz

La méthanisation est une technologie de conversion énergétique de la biomasse et une technologie de dépollution. Ce procédé est utilisé pour le traitement des boues urbaines par les stations d'épuration, des effluents industriels, des déchets ménagers organiques et des déjections d'élevage. Il peut s'appliquer à la transformation de la plupart des végétaux si la teneur en lignocellulose est faible [58].

II.2.4 - le Bioéthanol :

Sujet de notre étude, le bioéthanol est un biocarburant destiné aux moteurs à essence. Comme il a été décrit auparavant, il s'agit d'un vecteur énergétique issu de l'agriculture et appartenant à la famille des énergies renouvelables.

On parle généralement de filière "sucre" pour désigner cette filière de production du bioéthanol. Cet éthanol d'origine biologique n'est rien d'autre que de l'alcool éthylique, le même que celui que l'on trouve dans toutes les boissons alcoolisées. Il peut être mélangé à l'essence en des proportions allant de 5 à 85 % [50]. Néanmoins, au-delà de 20 % des adaptations aux moteurs de voitures sont souvent nécessaires, dues notamment à sa corrosivité élevée, qui endommage les jointures [51, 55].

a) Fabrication :

Les végétaux contenant du saccharose (betterave, canne à sucre ou dattes) ou de l'amidon (blé, maïs...) peuvent être transformés pour donner du bioéthanol, obtenu par fermentation du sucre extrait de la plante sucrière ou par distillation de l'amidon du froment ou du maïs (voir figure 8) [50].

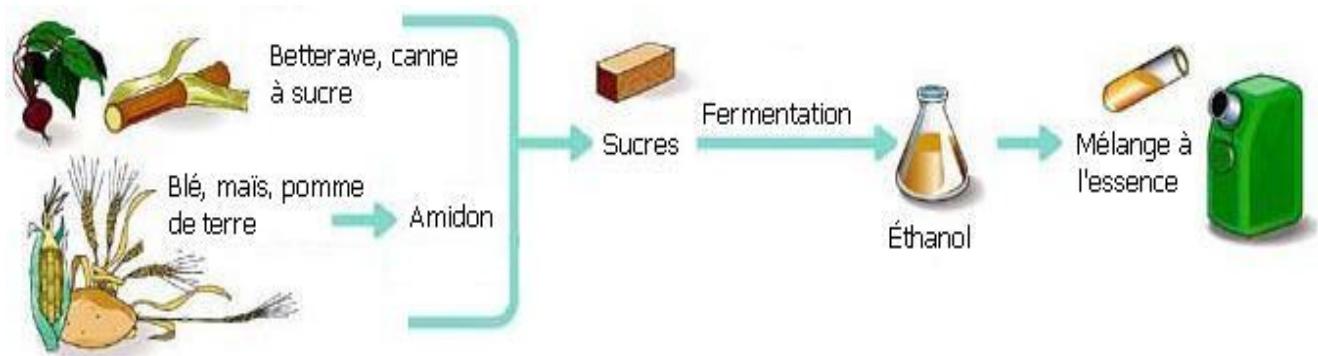


Figure 8 : Processus de formulation du bioéthanol. [50].

La filière "sucre" est de loin la plus développée dans le monde, principalement au Brésil, où le bioéthanol de canne à sucre couvre 22 % des besoins nationaux en carburant, et aux États-Unis, où plus de 10 % de l'essence contient du bioéthanol à hauteur de 10 % [54].

b) Moteurs à éthanol :

Les moteurs à éthanol actuels, sont des moteurs à essence légèrement modifiés, notamment au niveau des joints qui sont améliorés pour résister à l'effet corrosif de l'alcool. Les véhicules sont équipés soit de ces moteurs spécifiquement conçus pour l'éthanol, soit de moteurs dit "Flex-Fuel" capables de fonctionner aussi bien à l'essence qu'à l'éthanol [52].

La consommation d'un moteur à éthanol est supérieure d'environ 34% à celle d'un moteur à essence; toutefois, ses taux de compression sont plus élevés ce qui permet d'exploiter plus de puissance. En général, les moteurs à éthanol sont étudiés pour fournir des puissances et couples similaires à ceux des moteurs à essence [51].

Cependant, certains moteurs "FFV - Flex-Fuel Véhicule" fonctionnant indifféremment à l'essence ou à l'éthanol E85, fournissent des rendements supérieurs (plus de 10%) lors du fonctionnement sous E85 (éthanol à 85%) [51].

c) Différents types de bioéthanol :

Il existe plusieurs types de carburants contenant de l'éthanol, la plupart sont des mélanges d'essence et d'éthanol à différentes proportions.

On les désigne par la lettre E suivie du pourcentage d'éthanol dans le mélange: par exemple le E85 représente un carburant contenant 85% d'éthanol anhydre et 15% d'essence. Dans cette nomenclature, E100 désigne l'éthanol pur. On trouve ainsi de l'E5, E7, E10, E15, E20, E85, E95, E100 en fonction du pays dans lequel on se trouve et de l'utilisation que l'on veut en faire.

Il est à noter que dans notre étude nous avons utilisé le E5, E10 et E15, cela afin d'éviter les contraintes liées à la corrosion des joints de moteurs au delà de 20% d'éthanol [51, 55].

II.2.5 – Production mondiale du bioéthanol :

Les deux plus grands producteurs de bioéthanol sont les États-Unis et le Brésil avec 16 et 15,5 milliards de litres produits en 2005. Union européenne : 900 millions de litres (le principal producteur est l'Espagne) [58, 59].

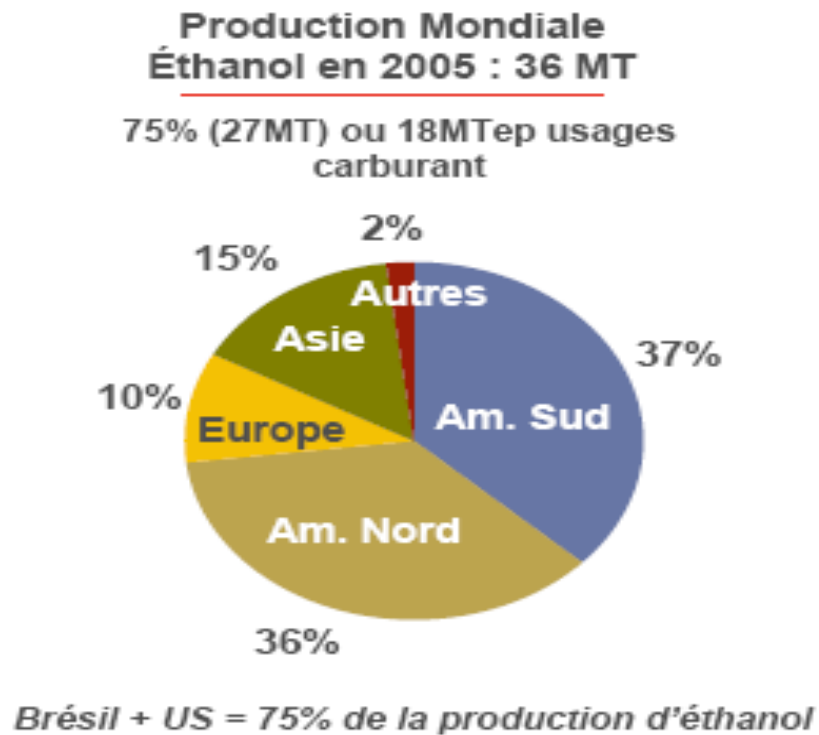


Figure 9 : Production d'éthanol dans le monde. [58].

Comme il a été décrit auparavant, l'Algérie a un fort potentiel en biomasse pouvant servir à la création de base importante pour la formulation d'éthanol, plusieurs études ayant des résultats optimistes pour la production de biocarburants à partir des écarts de dattes (déchets de la datte) dans cette optique ont été réalisées [60-62].

II.2.6 - Effets de l'éthanol sur les propriétés de l'essence**a) Effet de l'éthanol sur l'indice d'octane**

L'éthanol a un indice d'octane plus élevé que de nombreux composants de l'essence. Ainsi, lorsqu'on le mélange à l'essence, il en augmente l'indice d'octane du carburant final.

Il a été constaté que les mélanges éthanol-essence jusqu'à 10%, présentaient une plus grande résistance à l'auto-allumage, ce qui améliore les rendements des moteurs à essences, et éliminerait aussi le problème de rallumage (la tendance d'un moteur à continuer de fonctionner après coupure du contact) [63].

b) Effet de l'éthanol sur la volatilité

L'éthanol a un point d'ébullition fixe et par conséquent une volatilité constante, donc l'ajout de ce dernier dans l'essence confère au mélange une volatilité constante assurant de ce fait un meilleur rendement du moteur [63].

c) Effet sur la consommation de carburant

En matière de consommation, les moteurs alimentés par un mélange éthanol-essence sont plus gourmands du fait de leur faible pouvoir calorifique par rapport à celui conféré par l'essence pure.

La consommation est de 2 %, voir même parfois, à 3 % supérieure dans le cas des moteurs alimentés au mélange éthanol-essence [64].

d) Effets de l'éthanol sur le rendement du véhicule

L'ajout d'éthanol dans l'essence confère à ce dernier des propriétés intéressantes, comme il a été déclaré plutôt, la présence de l'éthanol dans l'essence relève l'indice d'octane et permet également une meilleure combustion (présence de molécules d'oxygène) [64].

II.2.7 – Enjeux socio-économiques et impacts environnementales :

Selon la plupart des gouvernements occidentaux et de nombreux experts, les biocarburants ont un bilan d'émission de CO₂ proche de zéro. En effet, lorsque l'on utilise du pétrole, on libère du carbone qui était enseveli profondément dans le sol depuis des centaines de milliers d'années. Ce carbone provient de la décomposition de la faune et de la flore qui y avait vécu auparavant [65].

Cependant, Les biocarburants émettent autant de carbone dans l'atmosphère que les plantes en ont absorbé durant leur croissance. Le bilan est donc nul : les plantes absorbent du CO₂ pour croître, lors de la combustion, le carbone absorbé retourne dans l'atmosphère. Celui-ci sera à nouveau absorbé par de nouvelles plantes qui pousseront et qui pourront être à nouveau brûlées. C'est le cycle du carbone [58].

Néanmoins certains experts internationaux en énergies renouvelables, pensent que le bilan serait négatif : l'émission de carbone est supérieure à la consommation, car, selon eux, d'autres facteurs ne sont pas pris en compte ou sont négligés. Parmi celles-ci citons, le carbone nécessaire à la fabrication des engrais, l'énergie nécessaire aux outils agricoles, à l'irrigation et à la fabrication des biocarburants. Mais si on admet qu'un jour toutes les activités quelles qu'elles soient, utilisent les biocarburants pour fonctionner le bilan reviendrait au point nul [66].

Il reste que la production de biocarburants peut aussi s'avérer non « écologique » ou non durable, si les matières premières sont produites grâce à une agriculture intensive qui entraîne un épuisement des nappes phréatiques et pollution des eaux par l'usage d'engrais et pesticides. De plus, certaines experts considèrent comme dangereux l'usage de plantes OGM qui permettraient d'obtenir de plus hauts rendements [67].

Il n'y a pas que les plantes qui peuvent être modifiées génétiquement. Par exemple, dans la fabrication du bioéthanol, l'ADN des levures est aussi souvent modifiée pour permettre une transformation plus rapide du sucre en éthanol [55].

En ce qui concerne les gaz émis lors de la combustion des biocarburants, la comparaison avec le pétrole est nuancée. Les biocarburants produisent généralement moins de SO_x, mais parfois plus de NO_x [58].

De plus, la combustion du bioéthanol produit davantage d'aldéhydes que l'essence. Mais ceux du bioéthanol sont moins toxiques (acétaldéhydes contre formaldéhydes pour l'essence). Il faut aussi ajouter, que les biocarburants se dégradent plus vite que les carburants fossiles, ce qui limiterait les dégâts occasionnés à la nature lors d'une « marée noire » ou autre cas de déversement accidentel [58].

Aujourd'hui, les développements des filières biocarburants ont montré qu'elles ne pourront certainement jamais se substituer entièrement au pétrole. Les biocarburants sont une solution d'appoint à l'essence ou au gazole. Leur mode d'utilisation en mélange est d'ailleurs leur point fort puisque, contrairement à d'autres carburants alternatifs (GNC surtout, GPL à moindre degré), ils peuvent bénéficier des réseaux actuels de distribution de carburants présent dans notre pays, et être utilisés sans adaptation particulière des véhicules à des concentrations volumique ne dépassant pas les 10 à 15 % selon les modèles de véhicules [51].

Chapitre III

Techniques de mesure des émissions automobile

L'étude des émissions automobiles consiste à mesurer les émissions unitaires qui représentent la quantité de polluant émis à l'échappement par unité de kilomètres parcourus. La méthode de mesure des émissions nécessite, d'une part un système de prélèvement des gaz d'émission, et d'autre part la connaissance de la cinématique du trajet parcouru c'est-à-dire le cycle de conduite.

III.1- Technique de prélèvement

a) Méthode CVS :

La méthode la plus utilisée est celle de l'échantillonnage à volume constant (Constant Volume Sampling), appelé aussi méthode CVS, qui tend à reproduire, en laboratoire, sur un banc à rouleaux (figures 10 et 11), un cycle de conduite (défini ultérieurement), et de prélever et collecter ensuite à volume constant des fractions des gaz d'échappement et de l'air de dilution, afin de les analyser ensuite sur la durée de la séquence [68, 69].

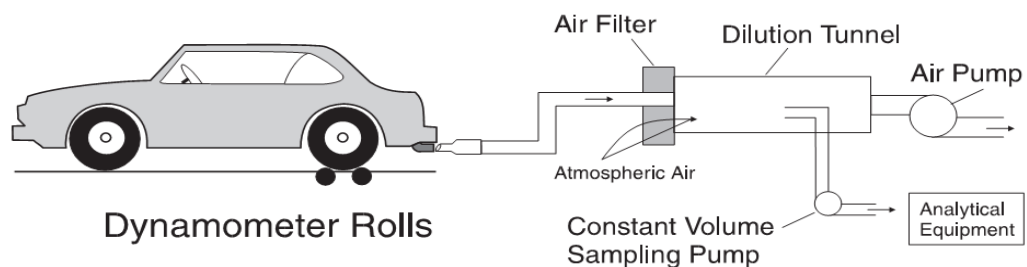


Figure 10 : Schéma d'un prélèvement avec CVS [68].

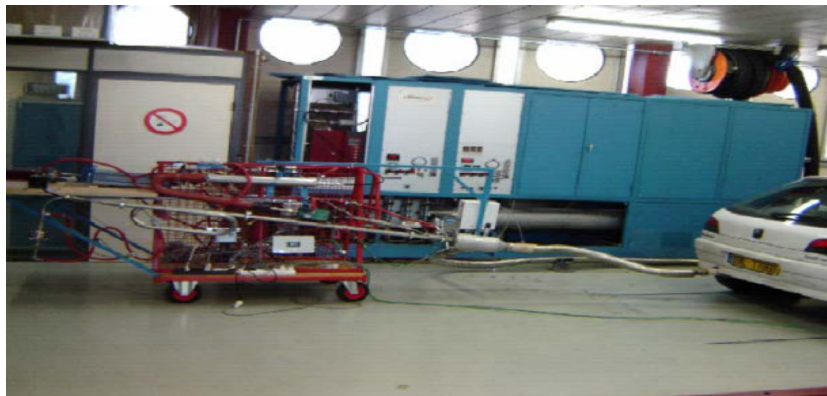


Figure 11 : Vue d'ensemble d'un système de prélèvement avec CVS.

b) Méthode Mini-CVS :

Une technique similaire à la méthode CVS sur le principe mais qui utilise un système de mesure réduit et simplifié, appelé mini CVS.

En effet, sa compactibilité et sa simplicité font que les coûts des installations sont réduits, ce qui en facilite l'accès à cette technologie [5, 9]. Cette même compactibilité, lui permet d'être embarqué à bord du véhicule et de travailler en circulation réelle, et des données d'émissions sont obtenues dans des conditions réelles.

De part le monde, plusieurs études ont été réalisées avec ce système, notamment au Japon [70] et en Algérie [5, 9], d'autres ont même réussi à faire des rapprochements entre les deux méthodes (CVS et mini-CVS) et prouvant ainsi l'efficacité et la crédibilité des systèmes portatifs, atteignant des concordances de l'ordre de 90% entre les données rapportées par les deux méthodes [71].

Le mini-CVS selon [5, 9] élimine entre autre, les problèmes et les incertitudes liées à l'étalonnage du banc à rouleaux, au refroidissement du moteur, à l'environnement réel du véhicule (état effectif des routes, température ambiante, conditions climatique).

III.2 - Méthodes d'analyse des polluants**a) Mesure du CO et CO₂ par spectroscopie d'absorption infrarouge**

La spectroscopie IR non dispersive (NDIR) est la plus utilisée pour la mesure des composés issus des pots d'échappements des véhicules. Cette technique est dite par corrélation : elle est basée sur l'utilisation d'une source lumineuse limitée par un filtre centrée sur l'absorbance de la molécule considérée. Le faisceau passe alternativement (à grande vitesse) sur une cellule contenant le composé à forte concentration pour éliminer toutes les radiations le concernant et déduire l'absorption des autres composés, puis sur une cellule contenant l'échantillon et sur une cellule contenant le solvant. A condition que l'absorption des autres composés soit faible sur la plage de longueurs d'onde caractéristiques du composé, l'absorption déduite est spécifique à ce dernier (voir figure 13)

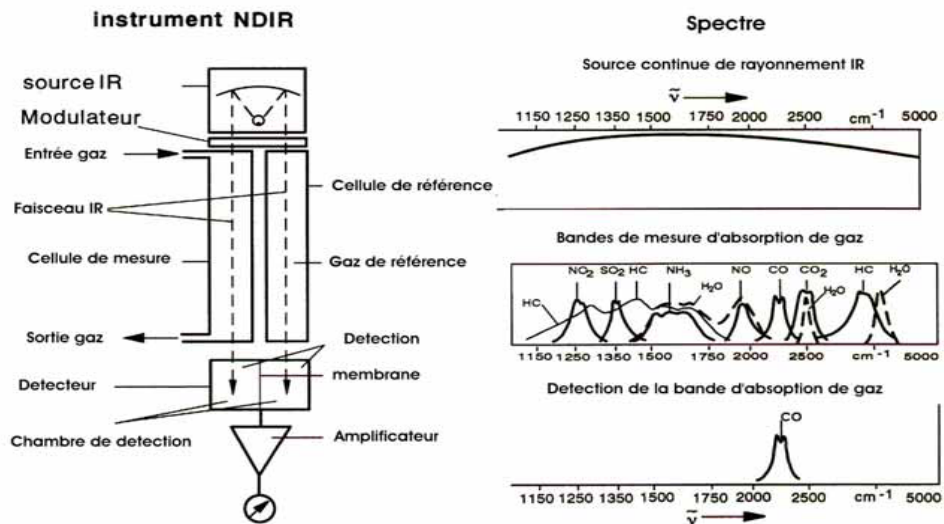


Figure 12 - Schéma de mesure de gaz par NDIR [42].

b) Mesure des hydrocarbures totaux (HC)

Le principe du dispositif appelé FID (Flamme Ionisation Detector) repose sur la mesure du débit des électrons libérés par l'ionisation des HC (voir figure 13), La figure 14 montre le détecteur qui travaille à partir d'une flamme d'hydrogène qui brûle dans l'air et dans laquelle sont injectés les gaz d'échappement du moteur. Deux électrodes de captage sont montées au dessus de la flamme. La proportion en hydrocarbures dans l'échantillon est fonction de l'intensité du courant électrique qui s'établit entre les deux électrodes.

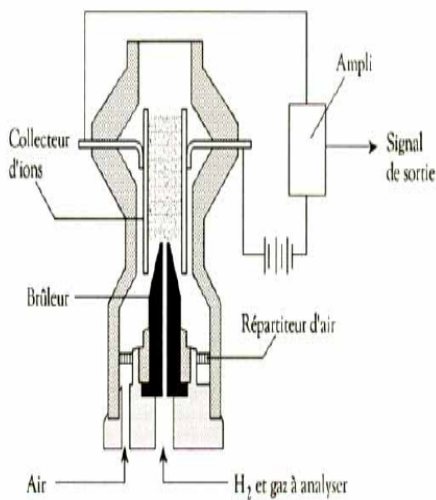


Figure 13 : Principe de mesure FID

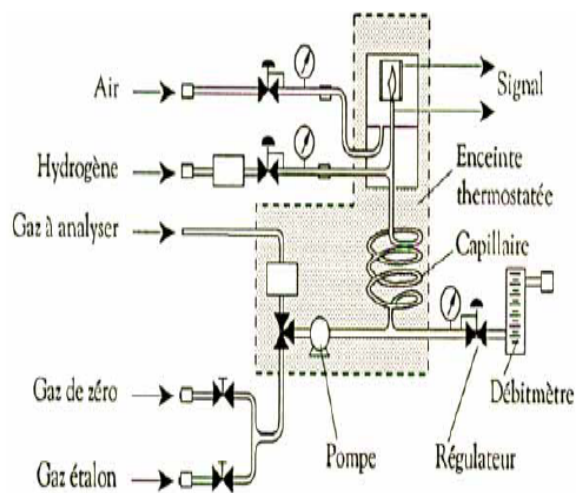


Figure 14 : Schéma du four dans un système FID

III.3 - Cinématique et cycles de conduite

Afin de reproduire aux mieux les conditions réelles de circulation urbaine ou extra-urbaine, ainsi qu'à l'homologation des véhicules neufs, des cycles de conduite réglementaires ont été construits, toutefois ces derniers n'ont pas pour vocation de décrire l'ensemble des spécificités et conditions d'utilisation des véhicules.

De ce fait, ces cycles sont nécessairement courts et simplifiés, compte tenu de leur objectif de reproductibilité et de fiabilité élevée des résultats, pour des tests de type "contrôle ou mesure par rapport à des valeurs limites" [69].

a) Cycle européen NEDC urbain et extra-urbain

Le *New European Driving Cycle* (ou cycle NEDC), aussi appelé le *Motor Vehicle Emissions Group* (MVEG), est un cycle de conduite automobile européen conçu pour imiter de façon reproductible les conditions rencontrées sur les routes européennes. Il est principalement utilisé pour la mesure de la consommation et des émissions polluantes des véhicules [72] ; Le cycle d'essai est en vigueur dans la communauté européenne depuis juillet 1973.

Le principe de ce cycle est un « scénario » fait d'accélérations/décélérations et de paliers de vitesse sur une durée de 20 minutes.

Il s'appuie sur un cycle plus ancien : ECE-15, à dominante urbaine, qui est répété 4 fois et auquel s'ajoute un cycle extra-urbain (voir figure 15).

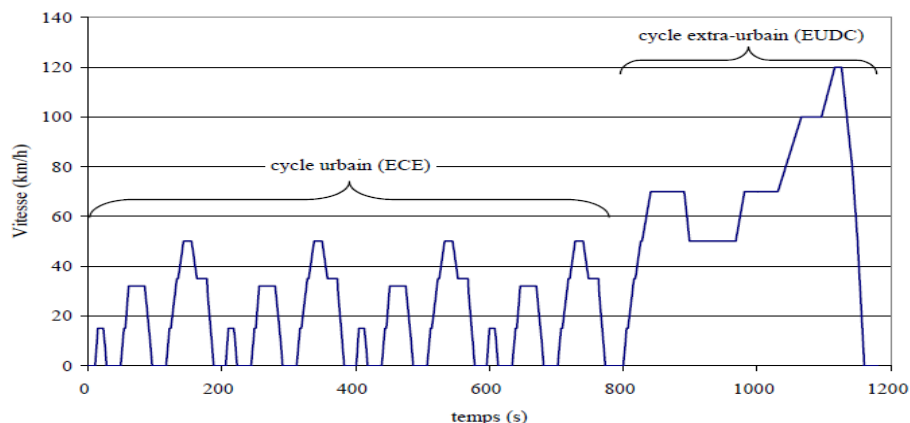


Figure 15 : Cycle européen NEDC urbain et extra-urbain

Cette procédure est l'objet de révisions en vue d'intégrer des conditions d'accélération fortes et de vitesses élevées mal décrites par le cycle actuel [72].

b) Cycles américains [75] :

L'homologation des véhicules automobiles pour les États-Unis inclut une certification de l'Environmental Protection Agency (Agence de protection de l'environnement), qui impose des mesures de consommation et de pollution faites en suivant les cycles de conduites suivant:

- FTP75 (Federal Test Procedure 75) (voir figure 16) :

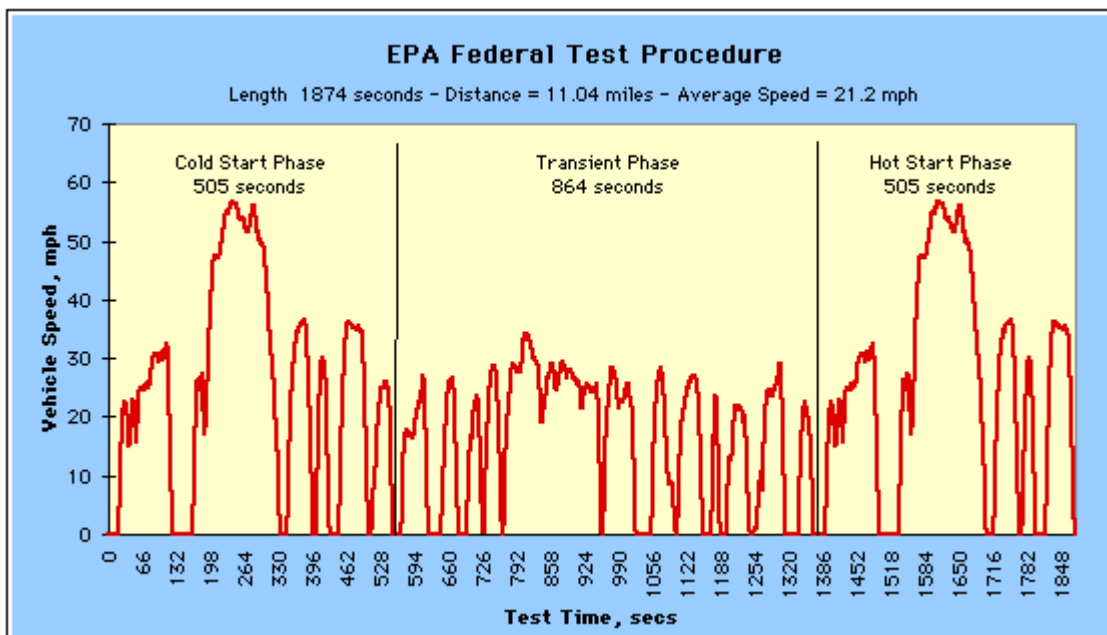


Figure 16: FTP75 (Federal test Procedure) [73].

Le cycle FTP75 (Federal Test Procedure de 1975) est utilisé aux États-Unis pour contrôler les émissions des véhicules légers.

Ce cycle, construit sur la base d'un itinéraire étudié à Los Angeles en 1972 et révisé plus tard en 1975, simule un parcours urbain de composé de 18 km avec des arrêts allant jusqu'à 20% de la durée du test. Il se compose de deux phases FTP72-1 et FTP72-2 mais exécutée en trois étapes :

- La première étape, c'est la phase FTP72-1 qui est exécutée avec un démarrage à froid,
- La deuxième étape, c'est la phase FTP72-2 qui est exécutée, cette phase représente une partie lente avec des arrêts répétés afin de reproduire aux mieux la densité du trafic routier,
- La troisième étape est composée de la phase 1 (FTP72-1) mais qui est exécutée cette fois-ci avec des démarrages à chaud.

- Cycle autoroutier (voir figure 17)

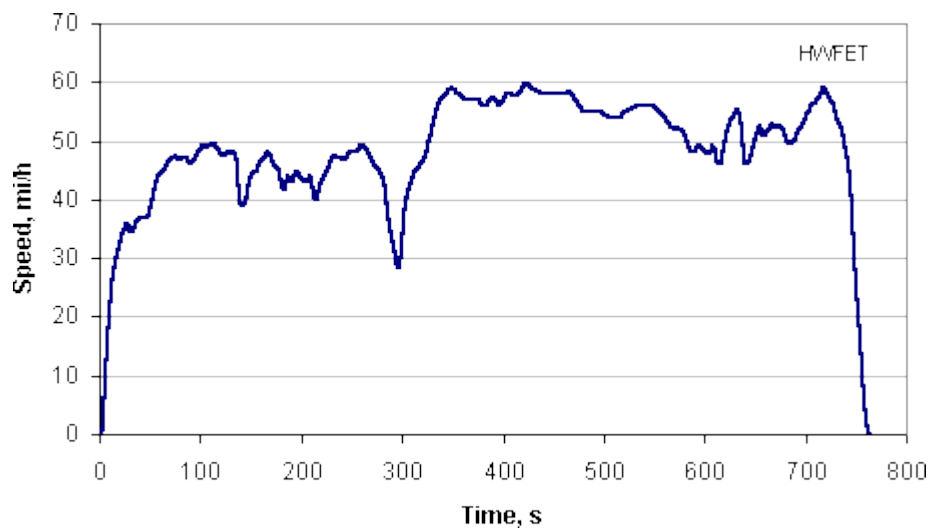


Figure 17: cycle autoroutier (Highway Cycle) [73].

Le cycle Highway qui est exécutée à chaud, qui est caractérisé des pointes de vitesses allant jusqu'à plus de 96 km/h.

Il est remarquable de noter que les conditions éventuelles de passage des rapports de boîte de vitesse dans les deux cycles sont laissées à l'initiative du constructeur du véhicule à homologuer, cela peut avoir une incidence sur l'interprétation de ces données par rapport à la manière de conduire qui selon certaine étude a une influence particulière sur les émissions, selon que la conduite soit agressive ou dite sportive, avec des passages de vitesses très rapide [69].

III.4 - Les normes d'émissions

a) La norme algérienne

Les seuils limites d'émissions des polluants pour véhicules particuliers sont donnés en le tableau suivant :

Tableau 10 : Limites d'émissions des véhicules particuliers en Algérie [74].

Catégorie des véhicules automobiles	Emissions massiques			
	Oxyde de carbone CO	Hydrocarbures imbrulés HC	Oxyde d'azote NOx	Particules
Véhicules particuliers :				
- Essence-GPL-GNC	2,3g/km	1,5g/km	0,4g/km	/
- Diesel	1g/km	1g/km	0,65g/km	1g/km

Cette norme apparue en novembre 2003, qui impose pourtant un contrôle de conformité aux véhicules neufs entrant sur le sol algérien, qui s'inspire par ses valeurs limites, largement d'EURO 3 (norme européenne) ne fait état ni de comment (quelle méthode) et de par quelle institution ou par rapport à quel model de cycle de conduite les mesures d'émissions doivent se faire.

b) Les normes européennes

Les émissions de polluants sont mesurées sur le cycle de conduite normalisé NEDC (New European Driving Cycle) : Les successives normes Euro sont résumées dans le tableau 11 [75].

Tableau 11 : Limites d'émissions UE pour les véhicules particuliers (g/km) [75].

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Oxydes d'azote (NOx)	-	-	0,15	0,08	0,06	0,06
Monoxyde de carbone (CO)	2,720	2,200	2,200	1,000	1,000	1,000
Hydrocarbures (HC)	-	-	0,200	0,100	0,100	0,100
Particules (PM)	-	-	-	-	0,005	0,005
Hydrocarbures non méthanique (HCNM)	-	-	-	-	0,068	0,068

Euro 1 : véhicules mis en service après 1993 ; Euro 2 : véhicules mis en service après 1996 ;

Euro 3 : véhicules mis en service après 2000 ; Euro 4 : véhicules mis en service après 2005 ;

Euro 5 : après septembre 2009 pour la réception et janvier 2011 pour l'immatriculation de véhicules neufs ;

Euro 6 : après septembre 2014 pour la réception et septembre 2015 pour l'immatriculation de véhicules neufs.

Véhicules à moteur essence ou fonctionnant au GPL ou au GNV (en Algérie appelé GNC).

Chapitre IV

Méthodologie Expérimentale

IV.1- Analyse des mélanges éthanol-essence :

Les analyses effectuées sur les essences (normale, super et sans plomb) et sur leurs mélanges avec de l'éthanol déshydraté à des teneurs de 5, 7.5, 10 et 15% ont été réalisées au niveau du Laboratoire Central de Dar el Beida de NAFTAL Aviation et Marine.

Pour précision, ce dernier a introduit, une demande de pré-évaluation auprès d'ALGERAC (organisme Algérien d'accréditation), afin de se conformer au référentiel ISO/CEI 17025:2005 « Exigences concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais » [76].

Les méthodes de mesures utilisées seront détaillées avec plus de précision dans la partie annexe.

IV.1.1- Mesure de la densité

La densité est le rapport du poids d'un certain volume d'échantillon à une température T au poids du même volume d'eau à une température standard [43]. Elle est acquise grâce à un thermodensimètre.

IV.1.2 - Mesure de la tension de vapeur

La tension de vapeur est la tendance des molécules à s'échapper d'une phase liquide pour engendrer une phase vapeur en équilibre thermodynamique [43].

C'est une fonction croissante de la température et spécifique de chaque corps. Dans notre cas, c'est la tension de vapeur Reid (TVR), mesurée à 37.8°C, qui est recherchée.

IV.1.3 - Test de la corrosion à la lame de cuivre

C'est un procédé qui permet la détermination de l'action corrosive des produits pétroliers liquides sur le cuivre en effectuant une comparaison entre une lame de cuivre qui a subi une corrosion accélérée à une série de lames de référence [45].

IV.1.4 - Détermination du pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur libérée par combustion de l'unité de volume ou de poids d'un combustible. Le bilan thermique de la réaction, établi pour un combustible pris à 15°C et les produits de la combustion gazeux à la même température, donne le pouvoir calorifique

inférieur (PCI) alors que, si l'on condense la vapeur d'eau dans les fumées à 15°C, on obtient le pouvoir calorifique supérieur (PCS). La différence entre ces deux valeurs représente la chaleur de condensation de l'eau à 15°C, soit 588 kcal/kg d'eau [45].

IV.1.5 - Détermination de l'indice d'octane « recherche » (NOR) des essences

L'indice d'octane d'un carburant est déterminé en comparant sa tendance à la détonation avec celle d'un mélange de référence d'indice d'octane connu, à l'aide d'un moteur conventionnel tournant à 600 tours/mn dans les conditions de fonctionnement normalisé [77].

IV.2 - Campagne de mesure des émissions automobile :

La campagne de mesure des émissions a été réalisée via la méthode du mini CVS, méthode et montage expérimental utilisée précédemment dans les mêmes conditions dans une étude portant sur les véhicules utilitaires légers [5, 9], toutefois le montage a été réadapté [78], pour pouvoir être embarqué sur les véhicules particuliers.

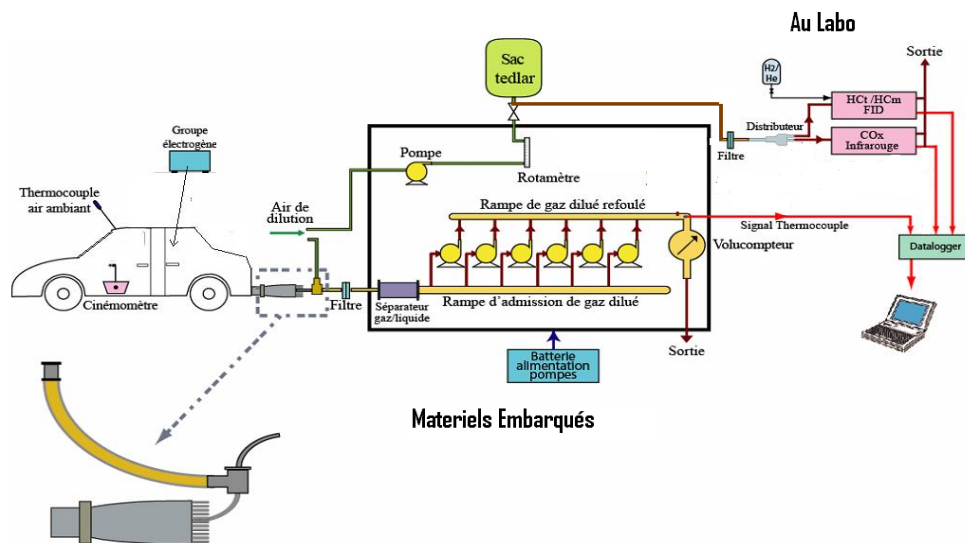


Figure 18 : Schéma du montage expérimental de prélèvement et d'analyses.

Enregistrement des données cinématiques :

Des prélèvements des gaz d'échappement en circulation réelle (mesure en embarquée) sur des circuits simulant des parcours urbain, routier et autoroutier situés dans la ville de Blida et sa périphérie ont été réalisés. Ces circuits ont été soigneusement testés et étudiés par M. Boughedaoui et S. Chikhi, chercheurs du laboratoire LSTE. Ils ont notamment, élaborés des cycles de conduites qui peuvent être considérés comme étant assez représentatifs des grandes villes algériennes. Nous reproduisons ci-après dans les grandes lignes, leurs caractéristiques

Le cinémomètre utilisée est un appareil de type DRS-6/1aa de marque BS2 Multidata GmbH à effet Doppler avec une gamme de mesure de 0 à 200 km/h. La résolution est de 3,8829 mm par pulsation fonctionnant à une fréquence de 24,125 GHz. La précision du cinémomètre est de 0,1 km/h (voir figure 19)



Figure 19 : Cinémomètre installé accroché à la portière d'une voiture.



Figure 20 : Cinémomètre installé à l'avant droit d'une Hyundai Accent.

L'enregistrement se fait via un DATALOGGER (enregistreur munie de cartes d'acquisitions des données) de marque Royal Tek type DTL 1232 (voir figure 21)



Figure 21 : DATALOGGER sur le siège arrière d'une Hyundai Accent.

Collecte des gaz d'échappement :

Les gaz d'échappement sont collectés via un tunnel de dilution formé d'un embout sous forme de cône attaché au pot d'échappement ; l'embout est formé de 112 tubes identiques (voir figure 22) dont un seul est utilisé pour prélever une fraction connue des gaz d'échappement.



Figure 22 : embout formé de 112 tubes.

Les gaz émis par le véhicule sont donc dilués avec de l'air ambiant filtré (rapport de dilution de l'ordre de 1/8), afin d'obtenir un débit d'air-gaz constant : en effet un ensemble de huit pompes permet de collecter en continu.

La collecte des gaz se fait dans des sacs TEDLAR d'une capacité de 70 litres (voir figure 23)



Figure 23: Sac TEDLAR et autres matériels embarqués à l'arrière d'un véhicule.

Analyse des échantillons :**a) Mesure de CO et CO₂ :**

L'analyse du CO et du CO₂ est effectuée avec un appareil de marque COSMA-Environnement SA, type Cristal 300 (voir figure 24) dont la précision est de 1,5% sur la pleine échelle avec un temps de réponse de 1s. Le débit du gaz passant dans la cellule de mesure est de 30l/h. Le zéro de l'appareil est réglé avec l'air reconstitué d'une pureté de 99,95%.

L'appareil est étalonné au début de chaque mesure avec des gaz étalons d'air liquide. La teneur de CO est de 1,03% avec une incertitude absolue de 0,02% dans la gamme haute teneur et avec un gaz étalon de 140ppm pour la basse teneur. La teneur du gaz étalon du CO₂ est de 1,48% avec une incertitude absolue de 0,03%.

b) Mesure de HC :

L'analyse des HC est effectuée par détection à ionisation de flamme (FID), avec un appareil de marque Cosma-Environnement SA, type Graphite 750 (voir figure 24). L'appareil est étalonné au début de chaque mesure avec le gaz méthane (CH₄) de teneur de 1009 ppm avec une incertitude absolue de 20ppm et relative de 2% d'air liquide. La teneur en oxygène dans le gaz étalon est de 19.4 ppm avec une incertitude absolue de 0.04ppm. Les gammes de mesure utilisées sont de 1000 ppm et 100 ppm.



Figure 24 : Matériels d'analyses (Crystal 300 à droite et Graphite 750 à gauche)

Véhicules étudiés :

Les véhicules utilisés sont :

HYUNDAI ACCENT – GLS 2004 : 133 520 km au compteur avant utilisation, moteur dédiée essence super (voir figure 25).



Figure 25 : Hyundai Accent équipé avec le système mini-CVS.

RENAULT MEGANE 2003: 167 388 km au compteur avant utilisation, moteur dédiée essence sans plomb.



Figure 26 : Renault Mégane avec le système mini-CVS.

Circuits empruntés :

Les essais ont été réalisés dans la ville de Blida en juin 2009 sur différents types de circuit.

Le circuit urbain d'une longueur de 3,2 km a été choisi de telle manière à représenter les artères et les rues de la ville de Blida les plus fréquentées (voir figure 27) et correspondant à une vitesse moyenne de 15 km/h.

Les circuits routier et autoroutier sont respectivement d'une longueur de 5,7 km et 11,3 km (figures 28 et 29) et correspondant à des vitesses moyennes de 28 et 70 Km/h.



Figure 27 : Vue aérienne du circuit urbain.



Figure 28 : Vue aérienne du circuit routier.

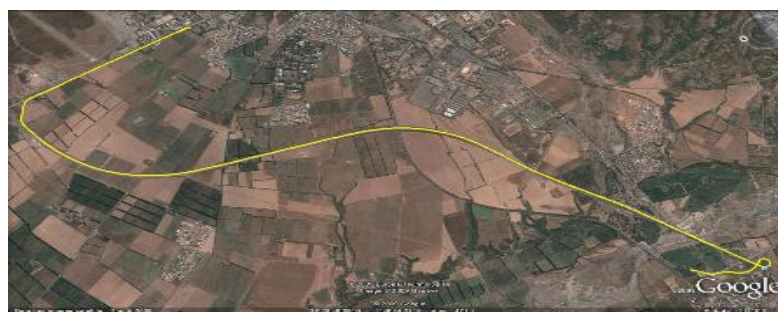


Figure 29 : Vue aérienne du circuit autoroutier.

IV.3 - Calcul de la masse des émissions polluantes :

La méthode de calcul des émissions unitaires est donnée en annexe 2.

Chapitre V

Résultats et Interprétations :

V.1- Caractérisation du biocarburant :

V.1.1- Analyse de l'éthanol pur :

L'éthanol utilisé dans tous les mélanges est de l'éthanol absolu (99.8%), ces propriétés physico-chimiques sont décrites dans le tableau suivant (Tableau 12):

Tableau 12: Propriétés physico-chimique de l'éthanol utilisé pour les mélanges au carburant.

Caractéristique	les exigences de la Norme	méthode d'essai	unités	Limites		Ethanol
				Min	Max	
teneur en éthanol+alcools supérieurs saturés	NF 15376:2007	CE/2870/2000-Méthode I, Annexe II, méthode B	%(m/m)	98,7		99,8
teneur en mono-alcools supérieurs saturés (C3-C5)	NF 15376:2007	CE/2870/2000-Méthode III,	%(m/m)		2	-
teneur en méthanol	NF 15376:2007	CE/2870/2000-Méthode III,	%(m/m)		1	max 0,1
Teneur en eau	NF 15376:2007	EN 15489	%(m/m)		0,3	max 0,2
teneur en chlorures minéraux	NF 15376:2007	EN 15489 ou EN 15482	%(m/m)		20	-
teneur en cuivre	NF 15376:2007	EN 15488	%(m/m)		0,1	-
acidité totale (exprimée en teneur en acide acétique)	NF 15376:2007		%(m/m)		0,007	max 0,001
apparence	NF 15376:2007	inspection visuelle		clair et limpide		-
teneur en phosphore	NF 15376:2007	EN 15487	mg/l		0,5	-
teneur en produits non volatils	NF 15376:2007		mg/100 ml		10	max 0,01
teneur en soufre	NF 15376:2007	ASTM D2622	mg/kg		10	-
Masse volumique	NF 15376:2007	ASTM				790.2
TVR		ASTM 5191	bar			0,12
Test de la lame de cuivre		ASTM				1a
Viscosité à 20 °C		ASTM	scet			1,529
Teneur en plomb (g/l)		ASTM				-

V.1.2 - Analyse des essences et de leurs mélanges avec l'éthanol :

Dans un premier temps, nous avons vérifié la conformité des valeurs mesurées pour chaque paramètre sur les essences et leurs mélanges (voir les tableaux 12, 13 et 14) par rapport aux spécifications concernant les essences normales, super et sans plomb.

Puis dans un second temps, nous avons examiné l'évolution de chaque paramètre en fonction du pourcentage d'éthanol en mélange avec l'essence dans les proportions de 5%, 7.5%, 10% et 15%.

Tableau 13: mélange essence normal – éthanol

Normes Algérienne				Ethanol - Essence				
Caractéristique	unité	min	max	Ess. Normal	5%	7,5%	10%	15%
Densité à 15°C		0,710	0,765	0,741	0,742	0,745	0,746	0,747
TVR (été)	Kpa		65,0	59,7	64,4	64,8	64,9	63,8
Pouvoir Calorifique	MJ/Kg	-	-	43,02	42,94	42,81	42,72	42,05
Teneur en soufre	%pds		0,0100	0,0002	0,0002	0,0001	0,0006	0,0001
Teneur en plomb	g/l		0,400	0,239	0,232	0,218	0,198	0,205
Indice d'octane (NOR)		89,00		91,39	91,65	93,14	94,12	94,68
Corrosion à la lame de cuivre	Cotation		1b	1a	1a	1a	1a	1b

Tableau 14 : mélange essence sans plomb – éthanol

Normes Algérienne				Ethanol - Essence SP				
Caractéristique	unité	min	max	Ess. SP	5%	7,5%	10%	15%
Densité à 15°C		0,725	0,780	0,767	0,777	0,772	0,775	0,779
TVR (été)	Kpa		65,0	57,7	60,7	61,4	62,0	62,5
Pouvoir Calorifique	MJ/Kg	-	-	42,00	41,88	41,78	41,23	41,11
Teneur en soufre	%pds		0,0100	0,0004	0,0009	0,0005	0,0005	0,0005
Teneur en plomb	g/l		0,013	0,004	0,002	0,002	0,004	0,001
Indice d'octane (NOR)		89,00		95,01	95,29	95,39	95,53	96,54
Corrosion à la lame de cuivre	Cotation		1a	1a	1a	1a	1a	1a

Tableau 15 : mélange essence super – éthanol

Normes Algérienne				Ethanol - Essence Super				
Caractéristique	unité	min	max	Ess. Super	5%	7,5%	10%	15%
Densité à 15°C		0,725	0,780	0,765	0,766	0,764	0,765	0,767
TVR (été)	Kpa		65,0	58,8	64,1	64,7	64,3	64,2
Pouvoir Calorifique	MJ/Kg	-	-	42,48	42,42	42,34	42,29	42,16
Teneur en soufre	%pds		0,0100	0,0014	0,0007	0,0010	0,0008	0,0011
Teneur en plomb	g/l		0,400	0,256	0,262	0,245	0,251	0,232
Indice d'octane (NOR)		96,00		96,00	96,23	96,73	96,92	97,04
Corrosion à la lame de cuivre	Cotation		1a	1a	1a	1a	1a	1b

Notons que dans l'ensemble, tous les mélanges éthanol-essences sont conformes aux spécifications et normes Algériennes.

V.1.3 – Interprétations des analyses :

a) Evolution de la densité

La figure N°30, résume l'évolution de la densité des carburants étudiés en fonction du taux d'éthanol.

Il en résulte que la densité supérieure de l'éthanol par rapport aux essences élève légèrement celle des différents mélanges. Ce qui influera négativement sur la richesse du mélange, et peut se traduire par un manque de puissance accompagner d'une baisse de consommation du mélange par rapport aux essences purs, ou en revanche d'une augmentation de la consommation pour des puissances équivalentes.

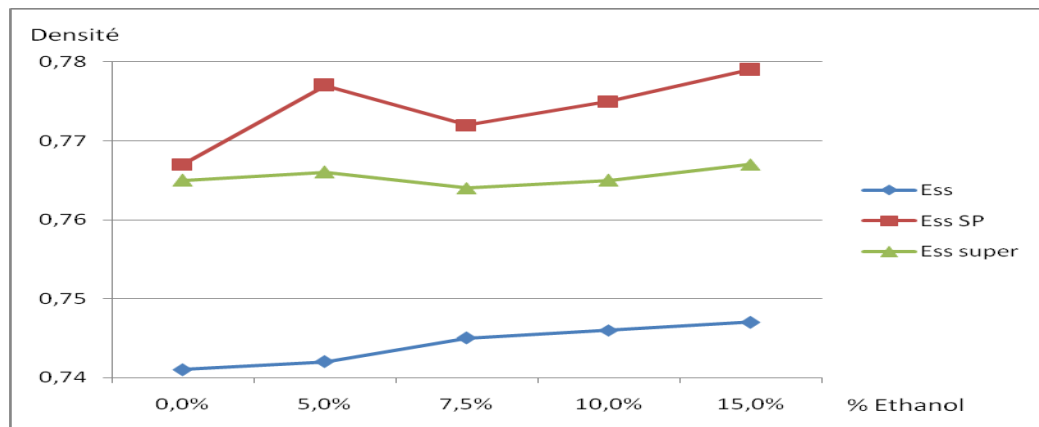


Figure 30: evolution de la densité des mélanges en fonction du pourcentage d'éthanol.

b) Evolution de la TVR

La figure N°31, résume l'évolution de la TVR en fonction du taux d'éthanol.

La probabilité de formations de bouchon de vapeurs dans les moteurs par les différents mélanges est très réduite du faite que ces derniers respectent la spécification donnée par la norme algérienne en matière de TVR.

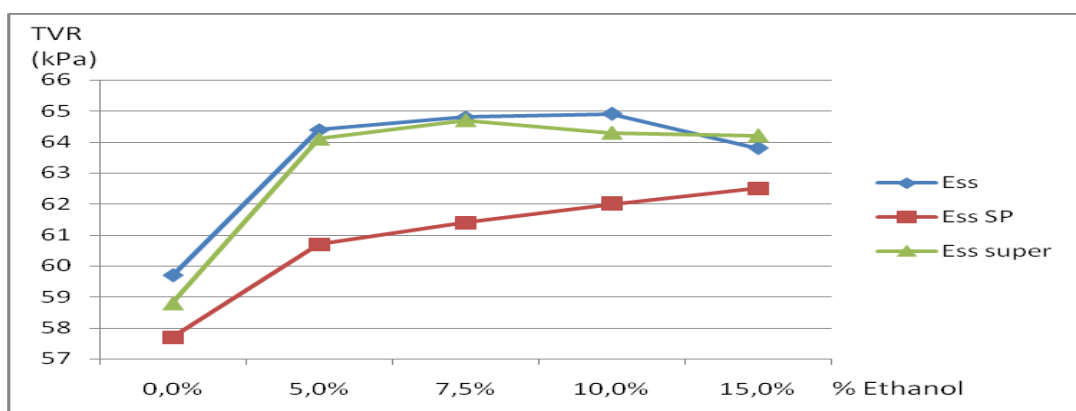


Figure 31: evolution de la TVR des mélanges en fonction du pourcentage d'éthanol.

c) Evolution du NOR (Indice d'octane) :

La figure N°32, résume l'évolution de l'indice d'octane en fonction du taux d'éthanol.

L'augmentation de l'indice d'octane nous indique que les mélanges essences-éthanol ont des propriétés antidétonantes meilleures que les essences pures et de ce fait ont un rendement meilleur que celui de l'essence.

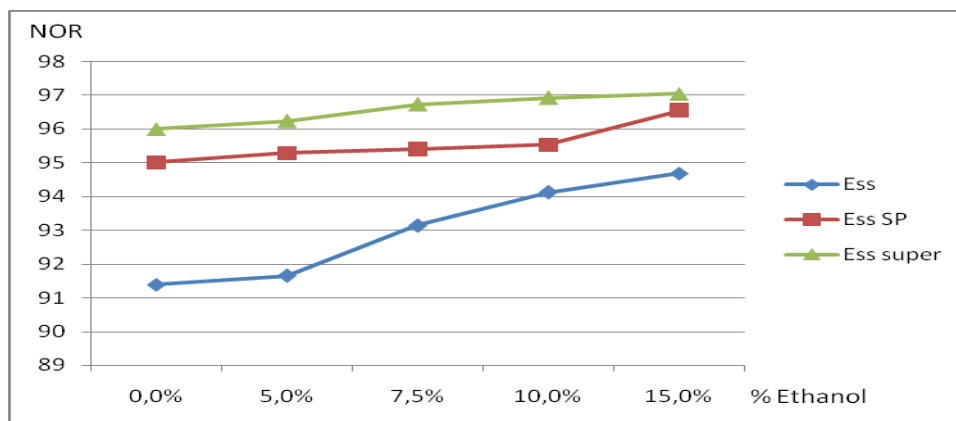


Figure 32: evolution de l'indice d'octane des mélanges en fonction du pourcentage d'éthanol.

d) Teste de la lame de cuivre :

Tout les carburants ont passé eu des résultats positives au test de la lame de cuivre, impliquant une corrosivité très limité des essences mélangés à l'éthanol jusqu'à 15%.

e) Evolution du pouvoir calorifique :

La figure N°33 résume l'évolution du pouvoir calorifique en fonction du taux d'éthanol.

La baisse légère du pouvoir calorifique des mélanges en fonction du pourcentage d'éthanol par rapport aux essences pures, se traduira par une augmentation de la consommation volumique en carburant lors de son utilisation.

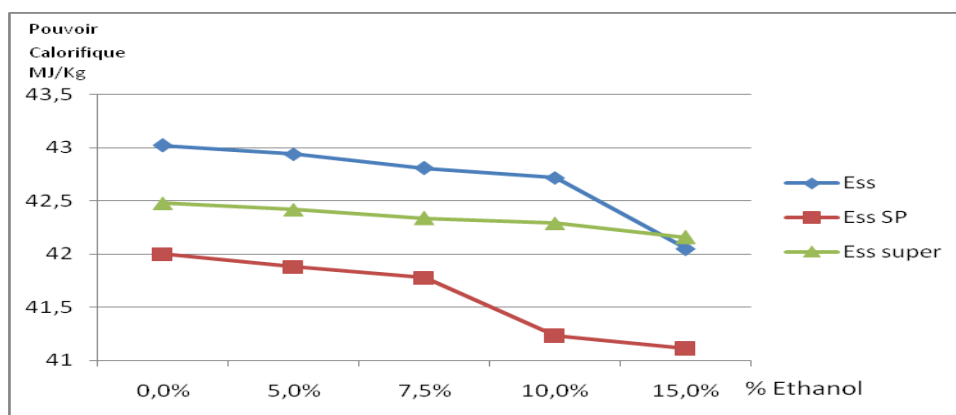


Figure 33: evolution du pouvoir calorifique en fonction du pourcentage d'éthanol.

V.1.4 – Conclusion :

Certaines propriétés de l'éthanol présentent des améliorations intéressantes pour l'utilisation de ce produit comme carburant notamment l'augmentation sensible de l'indice d'octane qui peut se traduire théoriquement par une meilleure combustion que les essences pures et de ce fait une réduction sensible des émissions en CO₂.

Par contre, d'autres propriétés, telle que l'augmentation de 8 à 10 % de la TVR des mélanges par rapport aux essences pures mais qui reste à un niveau acceptable par rapport aux normes algériennes, peut toutefois sous certaines conditions climatiques (froid extrêmes) provoquer des problèmes de démarrage.

Aussi, il faut noter que la baisse du pouvoir calorifique des mélange de 1 à 2 % en moyenne influera sur la consommation volumique en carburant causant une augmentation de cette dernière, constaté notamment lors d'une étude précédente sur l'ajout d'éthanol à l'essence [79].

Il est aussi constaté que les résultats obtenus rejoignent sensiblement ceux d'études précédentes portant sur la caractérisation d'un biocarburant constitué d'essence (normal, super et sans plomb) et de différentes concentrations d'éthanol, allant de 2% jusqu'à 10% en volume [60, 63 et 80].

V.2- Mesure des émissions :

V.2.1 - Données cinématiques :

Les graphes suivant caractérisent des exemples d'essai type de chaque circuit emprunté en urbain, routier et autoroutier lors de la campagne de mesure pour chacun des deux véhicules, utilisait lors de la campagne.

Pour la Hyundai Accent :

Circuit urbain : Il simule une circulation urbaine après démarrage du moteur à chaud, un parcours de 3,2 km est effectué à une vitesse moyenne de 18,33 km/h pendant 633 s (figure 34)

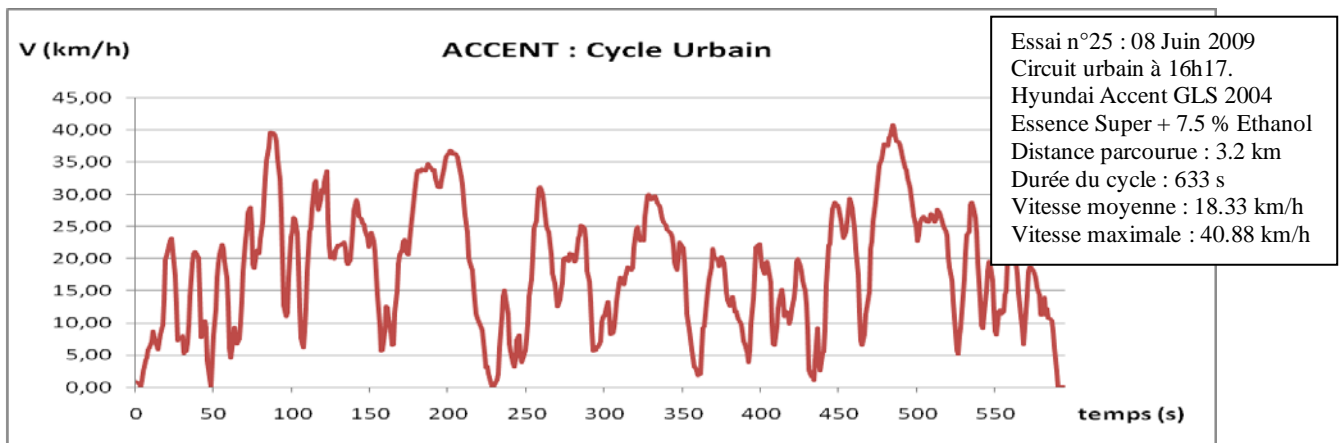


Figure 34 : Cycle urbain réalisée avec l'accent .

Circuit routier : Il simule une circulation routière après démarrage du moteur à chaud, le parcours de 5,7 km est effectué à une vitesse moyenne de 18,33 km/h pendant 761 secondes (figure 35).

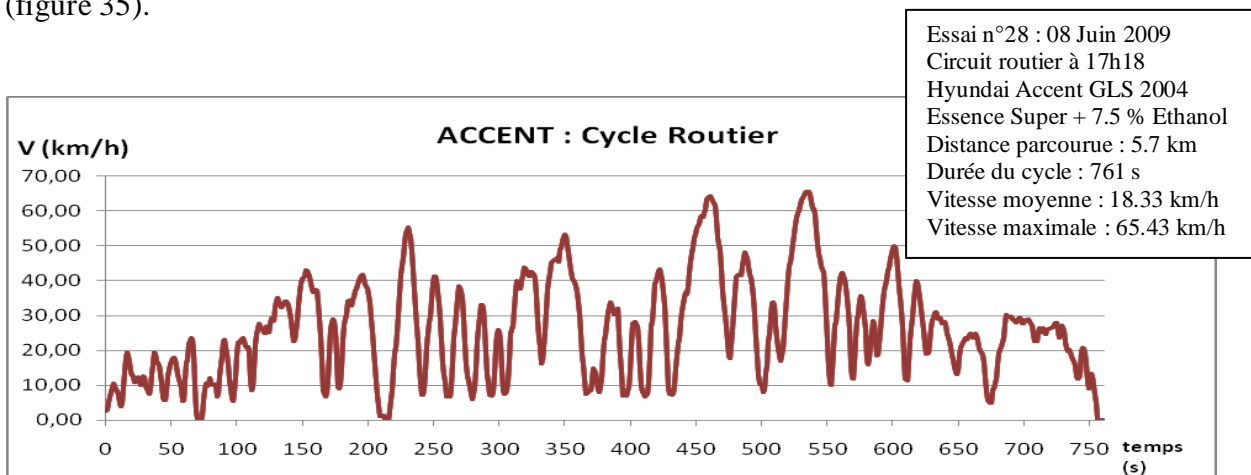


Figure 35 : Cycle routier réalisée avec l'accent .

Circuit autoroutier : Il simule une circulation auto routière après démarrage du moteur à chaud, le parcours de 11,3 km est effectué à une vitesse moyenne de 66,64 km/h pendant 605 secondes (figure 36)

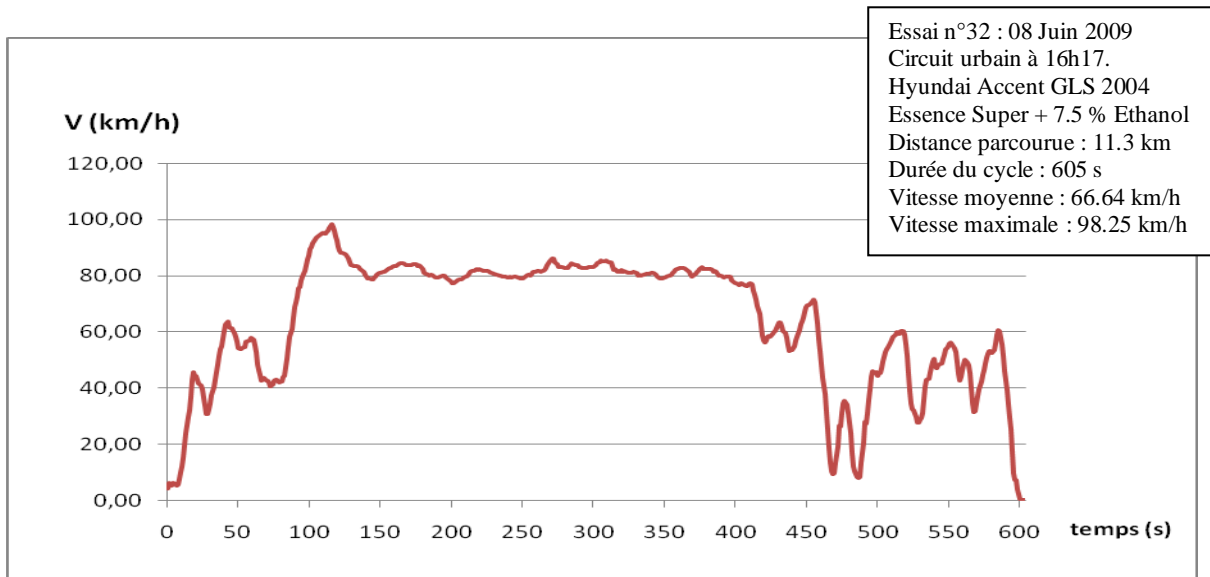


Figure 36 : Cycle autoroutier réalisée avec l'accent .

Pour la Renault Mégane :

Circuit urbain : Il simule une circulation urbaine après démarrage du moteur à chaud, un parcours de 3,2 km est effectué à une vitesse moyenne de 17,64 km/h pendant 653 secondes (figure 37)

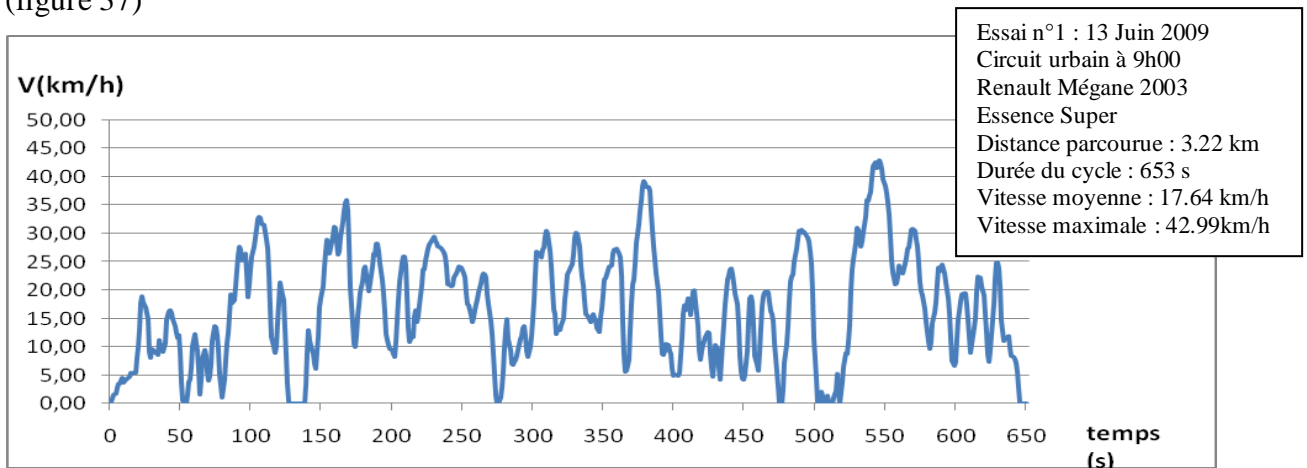


Figure 37 : Cycle urbain réalisée avec la mégane.

Circuit routier : Il simule une circulation routière après démarrage du moteur à chaud, le parcours de 5,7 km est effectué à une vitesse moyenne de 17,64 km/h pendant 796 secondes (figure 38).

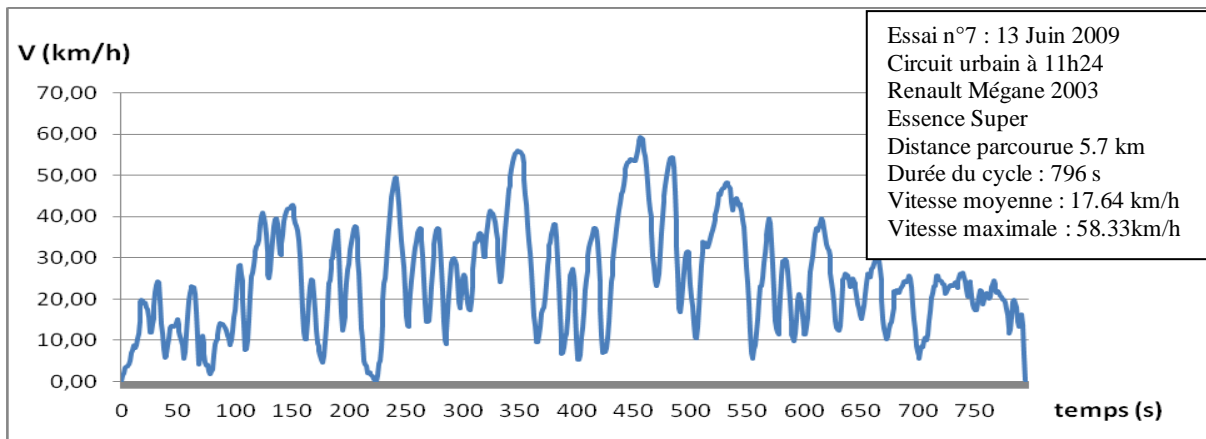


Figure 38 : Cycle routier réalisée avec la mégane .

Circuit autoroutier : Il simule une circulation auto routière après démarrage du moteur à chaud, le parcours de 11,3 km est effectué à une vitesse moyenne de 58,95 km/h pendant 661 secondes (figure 39)

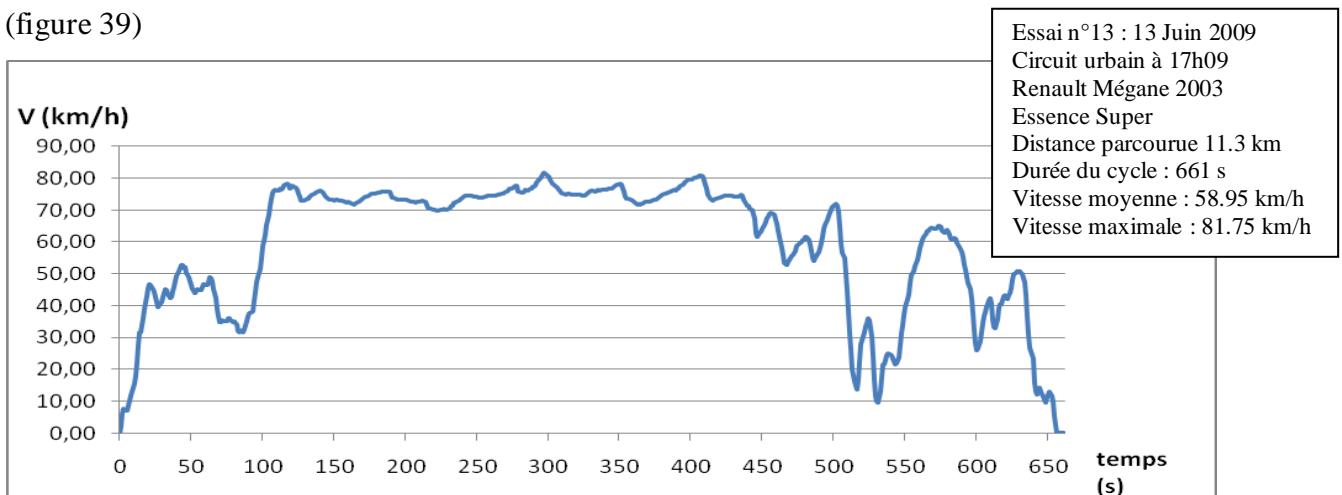


Figure 39 : Cycle autoroutier réalisée avec la mégane .

En Conclusion :

Les différents cycles cinématiques obtenues lors des différents essais pour chaque type de circuits (urbain, routier et autoroutier), avec certaine tolérance, sont très ressemblants, avec des vitesses moyennes et des durées de cycle très proches, mais certaines différences sont dues notamment à la réalité du terrain. En effet, les fluctuations réelles du trafic routier de par sa densité changeante, ainsi qu'à la conduite propre du véhicule (fluctuation dans la manière de conduire : fatigue ou autres de la part du conducteur, vu le nombre d'essai par jours, qu'on soit en début ou en fin de journée).

Mais globalement, la réitération démontrée de ces cycles, nous permet de pouvoir comparer sur des bases solides, les différentes émissions dans les différents cycles entre les deux véhicules.

V.2.2 - Emissions unitaires :

Dans cette partie, nous présentons les résultats des émissions unitaires mesurées en circulation réelle à l'aide d'un mini-CVS embarquée sur différents types de circuits et pour différents carburants pour les deux véhicules.

V.2.2.1 – En utilisant la RENAULT MEGANE :

La mesure des émissions du véhicule échantillon a été réalisée sur la base de trois essais en moyenne pour chaque type de voie (urbain, routier et autoroutier) avec plusieurs essais pour chaque carburant utilisé (essence super, essence sans plomb et leur mélange à l'éthanol avec divers pourcentages) pendant environ 10 min pour chaque essai.

L'ensemble des résultats d'émission unitaires sont présentés en unité de masse par unité de distance parcourue (g/km), ces résultats sont résumés dans les tableaux 15 et 16 comme suit :

a) Traitement des données par cycle de conduite :

a.1) Cycle urbain :

Les tableaux 16 et 17 résument les résultats obtenus lors des essais en cycle urbain de la Mégane.

Tableau 16 : Résultats des essais en cycle urbain de la Mégane en Essence sans plomb et mélanges Essence Sans plomb-Ethanol.

	Essence Sans Plomb			Es. S/P + 5% Ethanol			Es. S/P + 10% Ethanol			Es. S/P + 15% Ethanol		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Essai 9	Essai 10	Essai 11	Essai 12
HC (ppm)	140	115	96	145	148	132	158	131	176	116	88	105
CO (ppm)	199	249	241	249	195	175	348	338	417	147	113	180
CO₂ (%)	1,083	1,117	0,962	1,372	1,135	1,188	1,288	1,072	1,338	1,108	1,151	1,006
Durée essai (s)	723	729	829	734	620	602	700	720	649	623	635	766
Vitesse moy (km/h)	15,93	15,80	13,90	15,69	18,58	19,14	16,46	16,00	17,75	18,49	18,14	15,04
Volume (m3)	0,451	0,461	0,527	0,478	0,396	0,385	0,401	0,513	0,422	0,415	0,393	0,509
Température ambiante moyenne	29,5	33,8	34,2	35,1	36,2	34,0	34,5	38,2	39,7	37,0	36,4	36,4

Tableau 17: Résultats des essais en cycle urbain de la Mégane en Essence Super et mélanges Essence Super-Ethanol.

	Essence Super			Es. S + 10% Ethanol			Es. S + 15% Ethanol	
	Essai 13	Essai 14	Essai 15	Essai 16	Essai 17	Essai 18	Essai 19	Essai 20
HC (ppm)	135	118	115	136	128	141	144	148
CO (ppm)	174	206	216	216	229	191	185	213
CO₂ (%)	0,999	0,858	1,004	1,076	1,200	1,112	1,084	1,094
Durée essai (s)	653	838	606	719	561	609	695	686
Vitesse moy (km/h)	17,64	13,75	19,01	16,02	20,53	18,92	16,58	16,79
Volume (m3)	0,426	0,563	0,410	0,473	0,373	0,408	0,453	0,439
Température ambiante moyenne	29,1	34,0	34,5	40,2	42,0	41,6	38,2	36,5

En faisant la moyenne des essais, et en calculant les émissions unitaires tel que décrit dans l'annexe 2, on obtient les résultats représentés dans le tableau suivant:

Tableau 18: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle Urbain pour la Mégane.

Carburant	Vmoy (km/h)	CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)
Essence Super	16,800	284,573	2,875	1,324
Essence Sans Plomb	15,210	329,061	3,630	1,294
SP + 5%	17,803	323,513	2,539	1,444
SP + 10%	16,737	311,564	2,388	1,286
SP + 15%	17,223	305,816	1,765	1,030
ES + 10%	18,490	298,321	2,744	1,285
ES + 15%	16,685	312,337	2,724	1,507

Du dernier tableau, on peut déduire les figures suivantes (voir les figures 40 à 42):

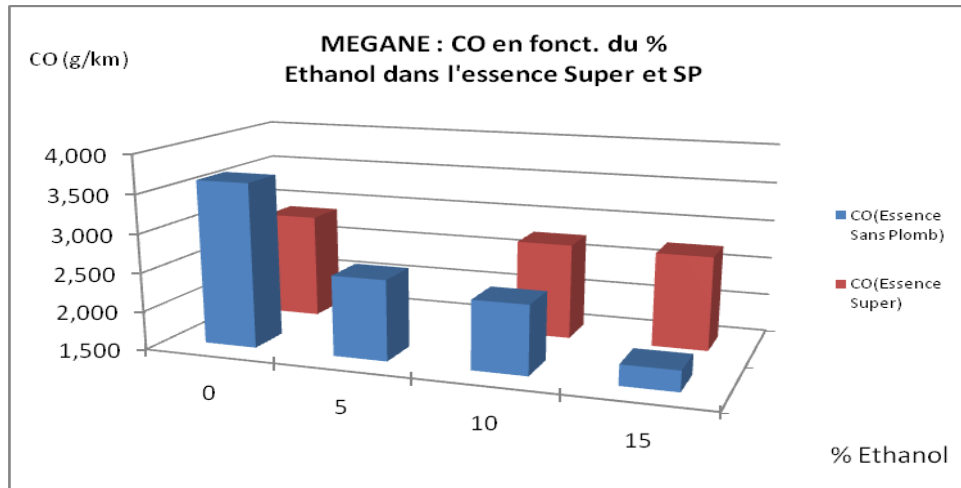


Figure 40: Evolution d'émission unitaire CO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en urbain.

En constate que l'éthanol mélangé à l'essence sans plomb réduit considerablement les emissions en monoxyde de carbone, et cela peut etre due au fait de l'amélioration de l'indice d'octane constaté lors de la caracterisation des carburants.

En revanche le mélange à l'essence super ne parait pas apporter grand chose, si ce n'est une diminution très légère des emissions.

La norme algérienne, qui introduit une valeur de 2.5 g/km pour le monoxyde de carbone est largement dépassés par les emissions issues des deux carburant (essence sans plomb et super) sans addition d'éthanol, cela peut s'expliquer par le fait que le vehicule était dédié essence sans plomb, mais son fonctionnement sur une longue durée avec de l'essence super, aurait endommager sont pot catalytique, ce qui influrait fortement sur ses emissions en monoxyde de carbone.

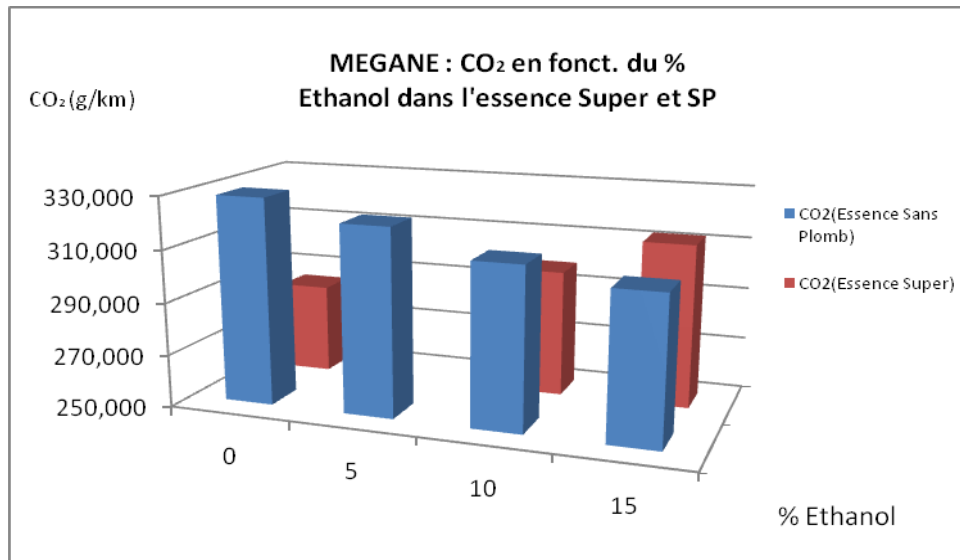


Figure 41: Evolution de d’émission unitaire CO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d’ethanol dans l’essence super et sans plomb, pour la mégane en urbain.

L’effet d’amélioration de l’indice d’octane sur l’essence sans plomb est la aussi très visible, de par la diminution des émissions en CO₂.

Par contre, l’essence super réagit très mal à l’addition d’ethanol, ses émissions en CO₂ ont meme presque doublé avec une addition de de 15% d’ethanol.

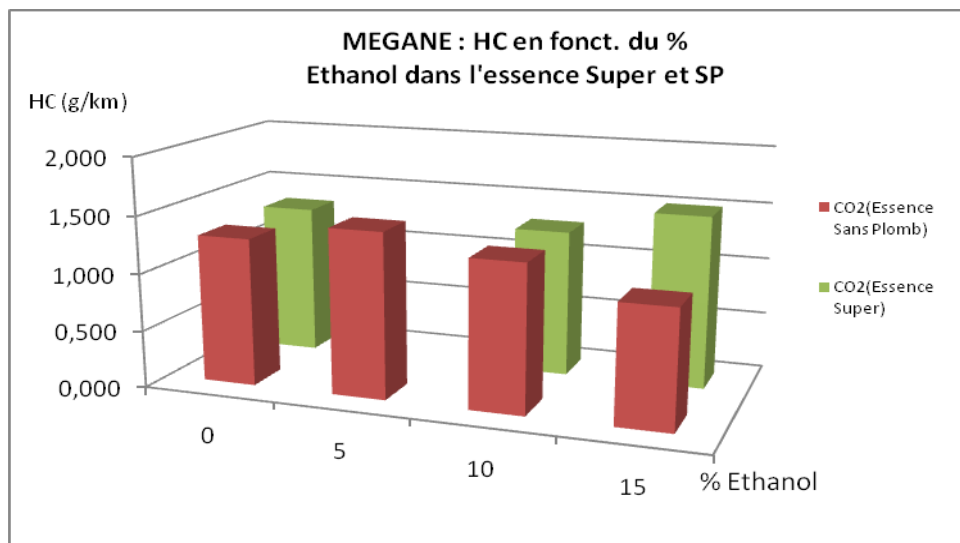


Figure 42: Evolution d’émission unitaire HC (g/km) en fonction du pourcentage d’ethanol dans l’essence super et sans plomb, pour la mégane en urbain.

La tendance de l’évolution des émissions en HC totaux n’est pas evidente à determiner , en peut seulement noter que tout les carburants respectent la norme algérienne en vigueur.

a.2) Cycle routier :

Les tableaux 19 et 20 résument les résultats obtenus lors des essais en cycle routier de la Mégane.

Tableau 19 : Résultats des essais en cycle routier de la Mégane en Essence sans plomb et mélanges Essence Sans plomb-Ethanol.

	Essence Sans Plomb		Es. S/P + 5% Ethanol		Es. S/P + 10% Ethanol		Es. S/P + 15% Ethanol	
	Essai 21	Essai 22	Essai 23	Essai 24	Essai 25	Essai 26	Essai 27	Essai 28
HC (ppm)	162	159	160	183	151	159	234	152
CO (ppm)	231	292	271	269	236	261	193	189
CO₂ (%)	1,551	1,614	1,769	2,186	1,593	1,682	1,456	1,301
Durée essai (s)	737	712	784	707	787	781	664	811
Vitesse moy (km/h)	27,84	28,82	26,17	29,02	26,07	26,27	30,90	25,30
Volume (m3)	0,487	0,461	0,507	0,367	0,483	0,449	0,430	0,542
Température ambiante moyenne	38,4	39,7	37,2	35,8	36,2	37,0	31,5	33,3

Tableau 20: Résultats des essais en cycle routier de la Mégane en Essence Super et mélanges Essence Super-Ethanol.

	Essence Super			Es. S + 10% Ethanol		Es. S + 15% Ethanol	
	Essai 29	Essai 30	Essai 31	Essai 32	Essai 33	Essai 34	Essai 35
HC (ppm)	127	202	130	172	149	196	162
CO (ppm)	224	213	216	272	256	245	158
CO₂ (%)	1,349	1,287	1,422	1,307	1,640	1,519	1,428
Durée essai (s)	749	774	729	814	700	742	753
Vitesse moy (km/h)	27,40	26,51	28,15	25,21	29,31	27,65	27,25
Volume (m3)	0,504	0,511	0,498	0,547	0,457	0,485	0,491
Température ambiante moyenne	36,9	39,6	40,0	39,4	41,0	35,2	34,6

En calculant les moyennes des essais, et en déduisant les émissions unitaires tel que décrit dans l'annexe 2, on obtient les résultats représentés dans le tableau suivant:

Tableau 21: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle routier pour la Mégane.

	V(moy)	CO ₂	CO	HC
Essence Sans Plomb	28,33	272,66	2,2830	0,9806
Es. S/P + 5% Ethanol	27,60	317,2188	2,2636	0,9786
Es. S/P + 10% Ethanol	26,17	282,3979	2,1455	0,9445
Es. S/P + 15% Ethanol	28,10	245,9598	1,5573	1,2134
Essence Super	27,35	246,4390	1,9015	0,9920
Es. S + 10% Ethanol	27,26	264,4603	2,4495	1,0405
Es. S + 15% Ethanol	27,45	264,3763	1,6800	1,1458

De ce tableau, on peut déduire les figures suivantes (les figures de 43 à 45) :

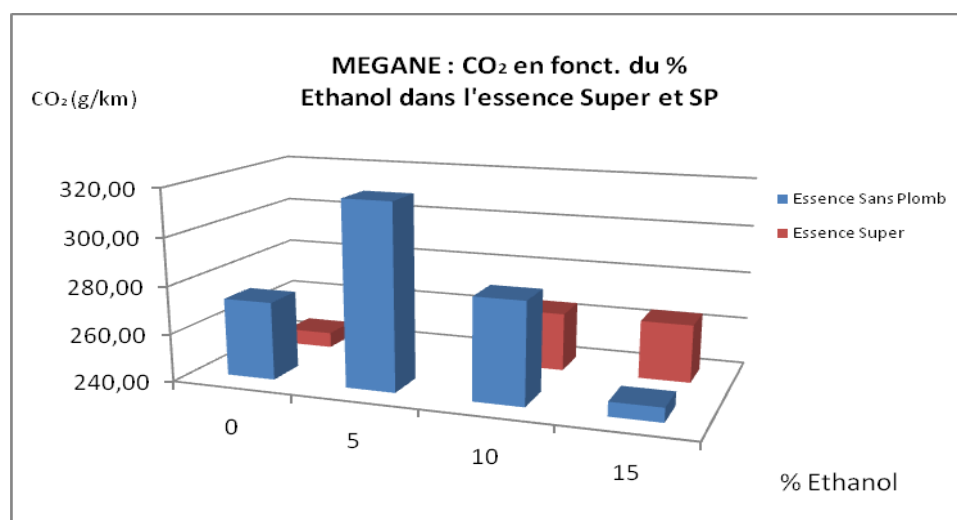


Figure 43: Evolution d'émission unitaire CO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en routier.

Tel qu'il a été démontré auparavant, malgré quelque fluctuations, pour l'essence sans plomb l'addition d'éthanol réduit considérablement les émissions CO₂, ce qui est tout à fait à l'opposé pour l'essence super.

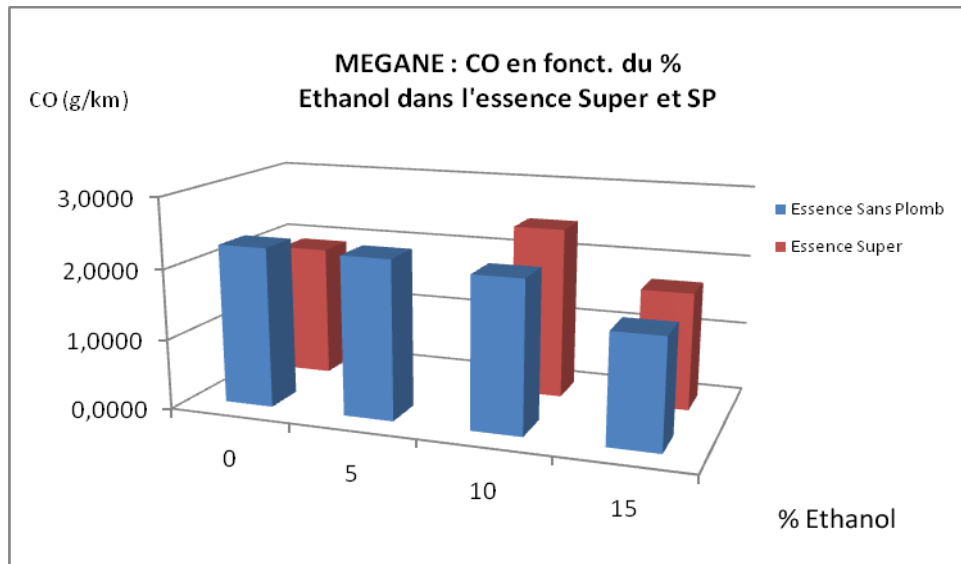


Figure 44 : Evolution d'émission unitaire CO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en routier

Les mélanges d'éthanol aux deux essences n'ont pas apporter grand chose, si ce n'est une diminution très légère des émissions.

En revanche on peut remarquer qu'en cycle routier contrairement à l'urbain, les émissions des carburants pure (essence sans plomb et super) respectent la norme algérienne.

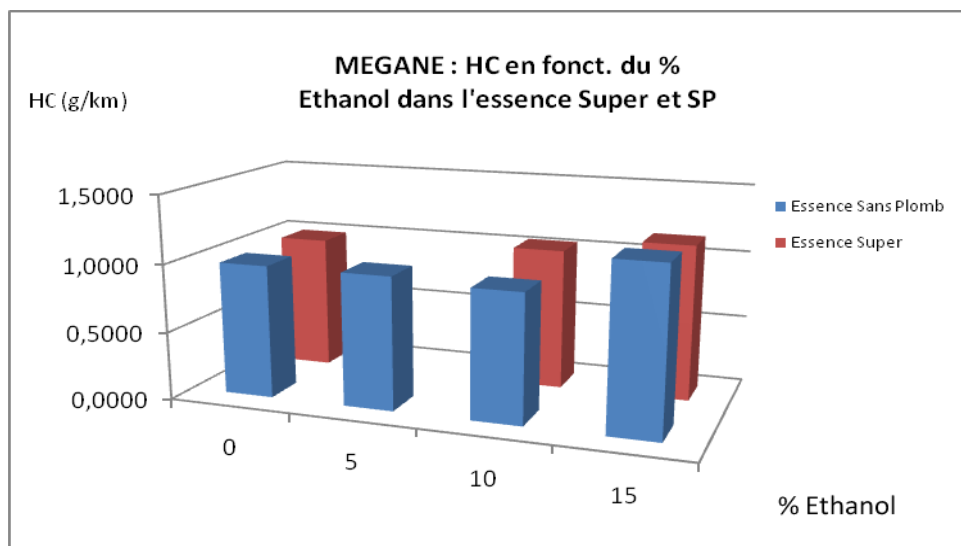


Figure 45: Evolution d'émission unitaire HC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en routier.

Une augmentation légère des HC est remarquée dans tous les carburants mélanges par rapports aux essences pures, sans toutefois dépasser la norme algérienne.

a.3) Cycle Autoroutier :

Les tableaux 22 et 23 résument les résultats obtenus lors des essais en cycle autoroutier de la Mégane.

Tableau 22 : Résultats des essais en cycle urbain de la Mégane en Essence sans plomb et mélanges Essence Sans plomb-Ethanol.

	Essence Super			Es. S + 10% Ethanol			Es. S + 15% Ethanol	
	Essai 36	Essai 37	Essai 38	Essai 39	Essai 40	Essai 41	Essai 42	Essai 43
HCt (ppm)	125	114	109	138	131	154	162	146
CO (ppm)	84	90	94	91	97	178	121	59
CO ₂ (%)	2,185	2,285	2,188	2,245	1,947	2,31	2,205	2,37
Durée essai (s)	660	610	651	683	707	681	647	585
Vitesse moy (km/h)	61,636364	66,688525	62,488479	59,560761	57,538897	59,735683	62,874807	69,538462
Volume (m3)	0,429	0,392	0,398	0,452	0,464	0,447	0,417	0,384
Température ambiante moyenne	39,3	35,5	32,7	37,2	38	38,5	37,2	36,5

Tableau 23: Résultats des essais en cycle urbain de la Mégane en Essence Super et mélanges Essence Super-Ethanol.

	Essence Sans Plomb			Es. S/P + 5% Ethanol			Es. S/P + 10% Ethanol			Es. S/P + 15% Ethanol		
	Essai 44	Essai 45	Essai 46	Essai 47	Essai 48	Essai 49	Essai 50	Essai 51	Essai 52	Essai 53	Essai 54	Essai 55
HC (ppm)	140	133	188	112	122	158	137	138	138	148	130	158
CO (ppm)	94	84	156	51	68	93	113	62	101	73	70	131
CO ₂ (%)	2,052	2,235	3,92	2,31	2,35	2,43	2,206	2,249	2,37	2,54	2,229	2,72
Durée essai (s)	655	616	610	658	636	614	665	557	666	613	630	677
Vitesse moy (km/h)	62,11	66,04	66,69	61,82	63,96	66,25	61,17	73,03	61,08	66,36	64,57	60,09
Volume (m3)	0,422	0,394	0,381	0,426	0,426	0,39	0,423	0,422	0,429	0,401	0,4	0,388
Température ambiante moyenne	38,8	40	41,6	39,1	37,8	37,5	32,2	33	34,6	42,6	42,3	41,7

En moyennant les essais, et en calculant les émissions unitaires tel que décrit dans l'annexe 2, on obtient les résultats représentés dans le tableau suivant:

Tableau 24: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle Autoroutier pour la Mégane.

	V(moy)	CO ₂	CO	HC
Essence Sans Plomb	64,947	200,554	0,325	0,408
Es. S/P + 5% Ethanol	64,100	181,395	0,131	0,359
Es. S/P + 10% Ethanol	65,093	181,637	0,249	0,396
Es. S/P + 15% Ethanol	63,673	179,755	0,224	0,377
Essence Super	63,607	168,939	0,222	0,317
Es. S + 10% Ethanol	58,947	182,433	0,420	0,428
Es. S + 15% Ethanol	66,205	170,646	0,228	0,416

De ce tableau, on peut déduire les figures suivantes (figures 46 à 48) :

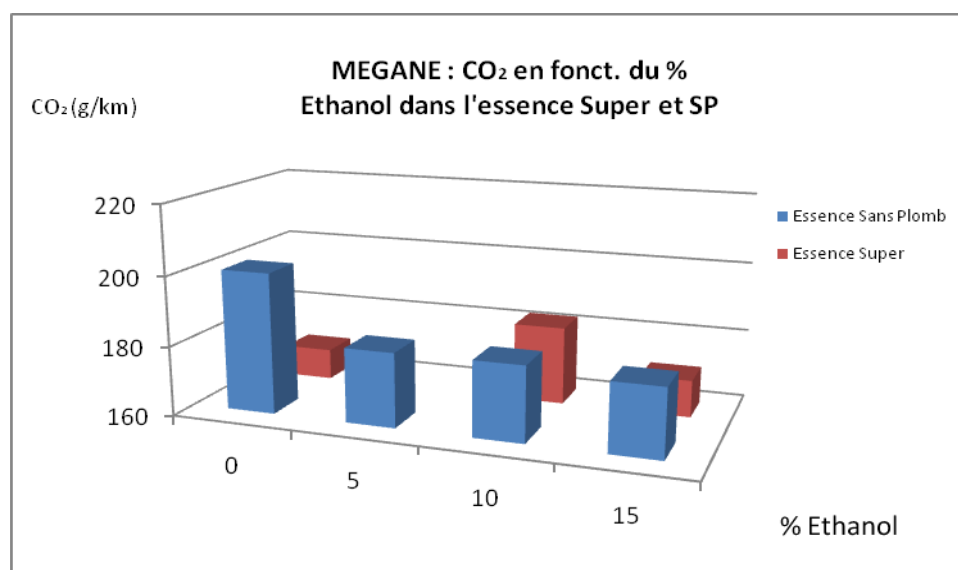


Figure 46: Evolution d'émission unitaire CO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super et sans plomb, pour la mégane en autoroutier.

Contrairement, au cycle routier et urbain, l'addition d'éthanol aux super n'a pas un effet dégradant en matière d'émission CO₂, en revanche, l'évolution de l'essence sans plomb vers des émissions moins chargées en CO₂ est sans conteste.

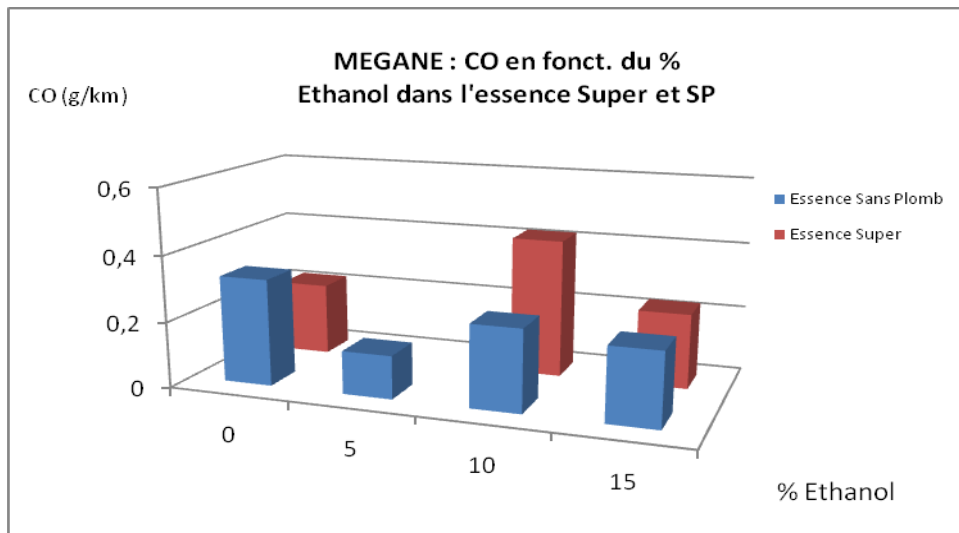


Figure 47: Evolution d’émission unitaire CO (g/km) en fonction du pourcentage d’ethanol dans l’essence super et sans plomb, pour la mégane en autoroutier.

Les resultats obtenues en autoroutier pour l’essence sans plomb sont similaires aux resultats obtenues lors des deux cycles précédents :

- Diminution des emissions en CO avec l’addition d’ethanol.
- Un effet nul voir parfois dégradant de l’ethanol sur l’essence super.

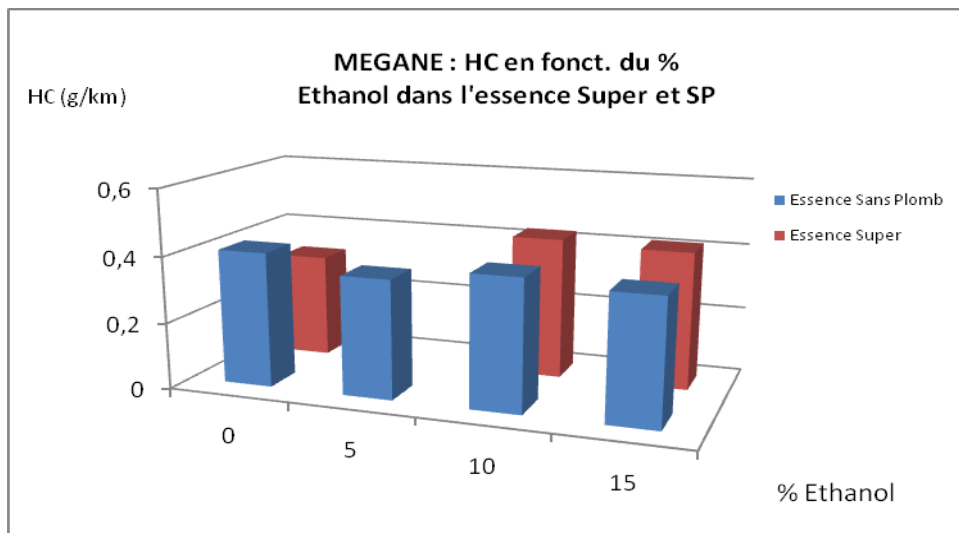


Figure 48: Evolution d’émission unitaire HC (g/km) en fonction du pourcentage d’ethanol dans l’essence super et sans plomb, pour la mégane en autoroutier.

Les émissions en HC n’évoluent peu ou pas, mais dans l’ensemble on est bien au-dessous de la norme algérienne qui stipule 1.2 g/km.

b) Comparaison entre les cycles :

b.1) Essence super :

Par cycle de conduite :

Les résultats obtenus sont résumés dans les figures suivantes (voir figures 49-51) :

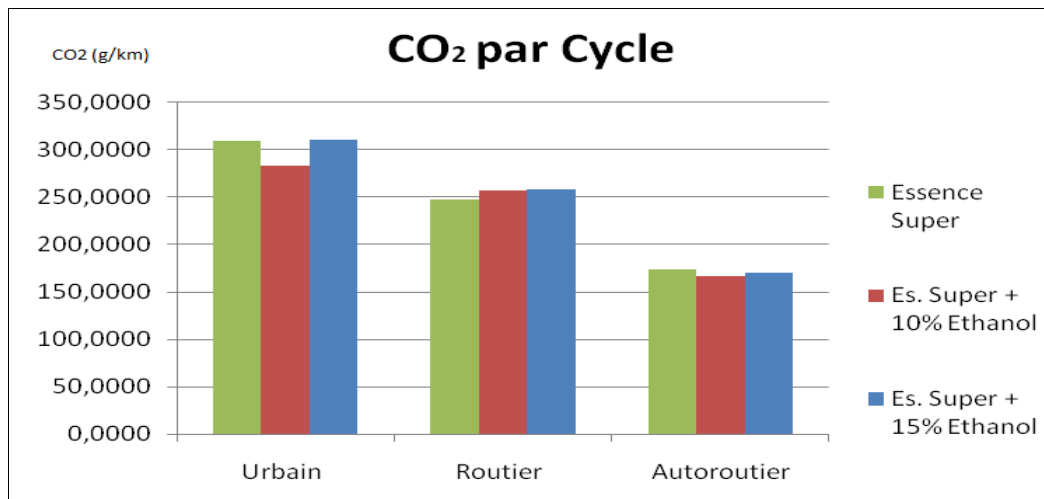


Figure 49 : Evolution d'émission unitaire HC (g/km) par cycle de conduite.

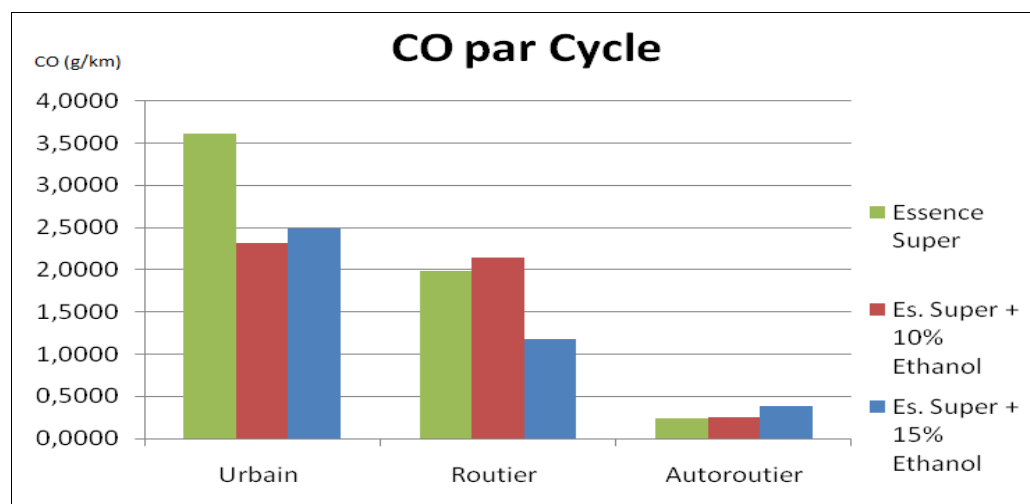


Figure 50: Evolution d'émission unitaire CO (g/km) par cycle de conduite.

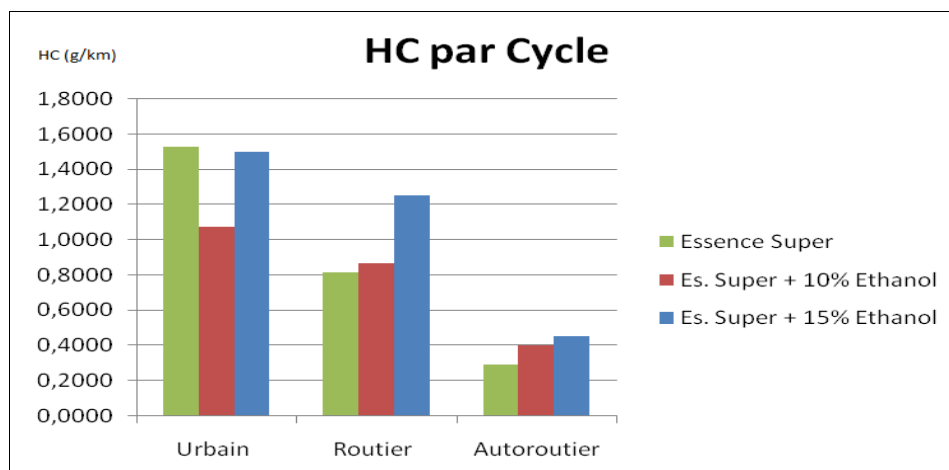


Figure 51: Evolution d'émission unitaire HC (g/km) par cycle de conduite.

L'addition d'éthanol à l'essence super, d'après les résultats obtenus (voir figure 18-20), n'améliore guère les performances de ce dernier, cela pourtant est à l'opposé des expérimentations faites sur les mélanges qui montrent que l'indice d'octane du mélange est supérieure à celui de l'essence super pure, et de ce fait les mélanges présenteraient une meilleure combustion, cette contradiction peut s'expliquer par une thèse faite auparavant sur les mélanges essences et produit oxygénés [80], qui avance que l'addition d'éthanol à l'essence super augmenterait bel et bien son indice d'octane mais en revanche diluerait le plomb contenu dans ce dernier, mais qui élèverait aussi les teneurs en aromatiques contenu dans l'essence super, ce qui se traduit par des taux d'émissions en HC totaux plus élevés en moyenne qu'émis par une essence pure.

En fonction de la vitesse de conduite :

Les résultats obtenus sont résumés dans les figures suivantes (voir les figures 52-54) :

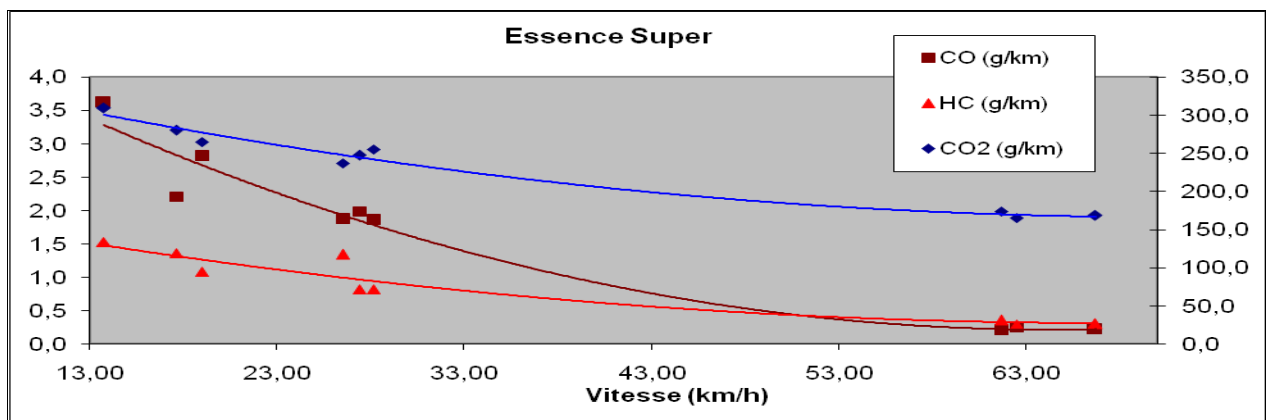


Figure 52: Evolution d'émission unitaire de l'essence super en fonction de la vitesse.

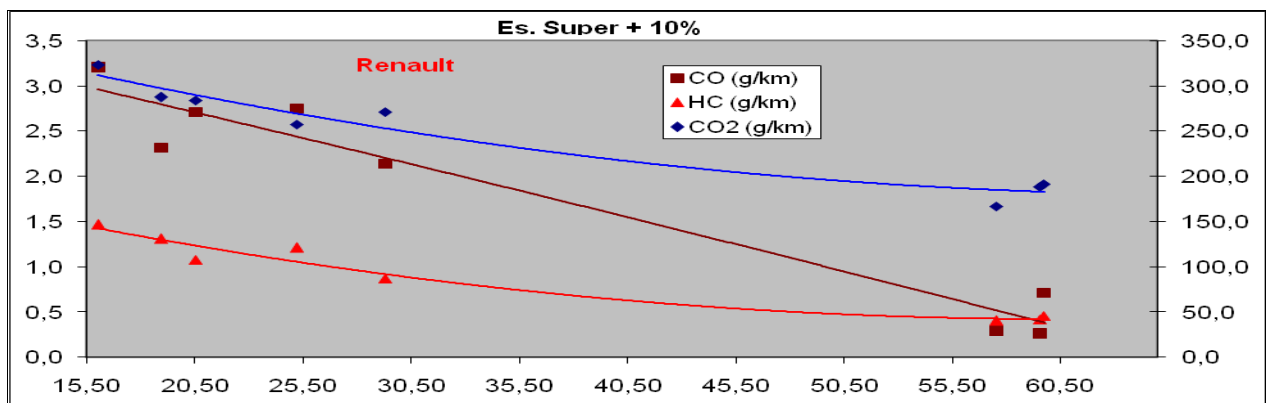


Figure 53: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 10 % d'éthanol en fonction de la vitesse.

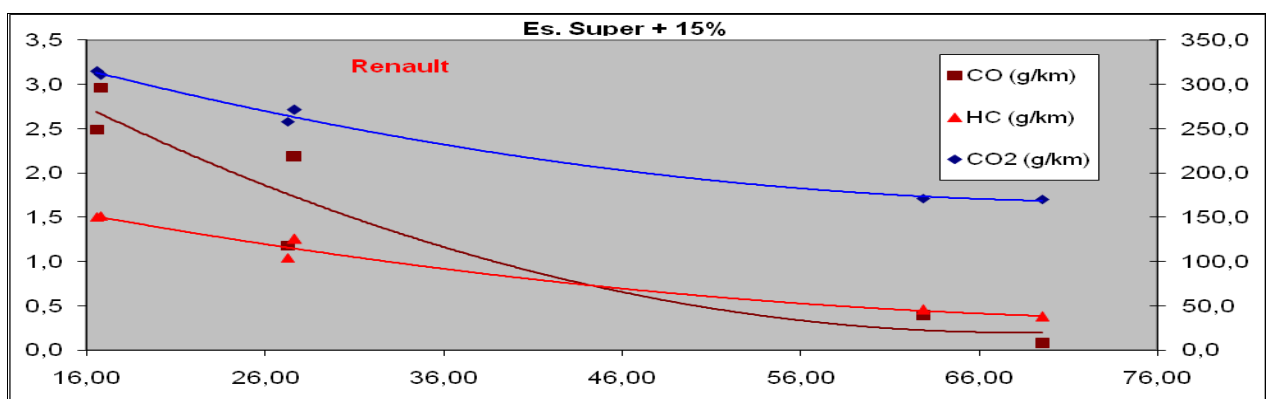


Figure 54: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 15 % d'éthanol en fonction de la vitesse.

En constate que les émissions unitaires de l'essence super et de ces différents mélanges à l'éthanol, à moins de 13 km/h (cycle urbain), dépassent largement la norme algérienne en vigueur, cela dit, plus la vitesse augmente plus les émissions diminuent considérablement, jusqu'à descendre en dessous de la norme, pour des vitesses moyennes dépassant les 40 km/h (cycle autoroutier).

Les trois graphes (voir figures 52-54) montrent dans l'ensemble une évolution similaire des émissions, l'apport de l'éthanol est quasiment nul voir même par fois ayant un effet inverse (augmente les émissions), cela peut se traduire à ce que l'addition de produits oxygénés à l'essence réagit mal avec la présence de plomb [80].

b.2) essence sans plomb :

Par cycle de conduite :

Les résultats obtenus sont résumés dans les figures suivantes (voir les figures 55-57) :

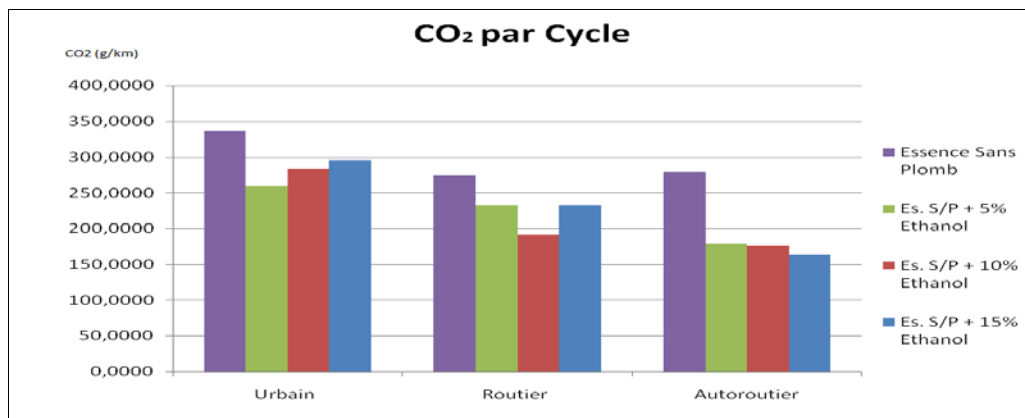


Figure 55: Evolution d'émission unitaire CO₂ (g/km) par cycle de conduite.

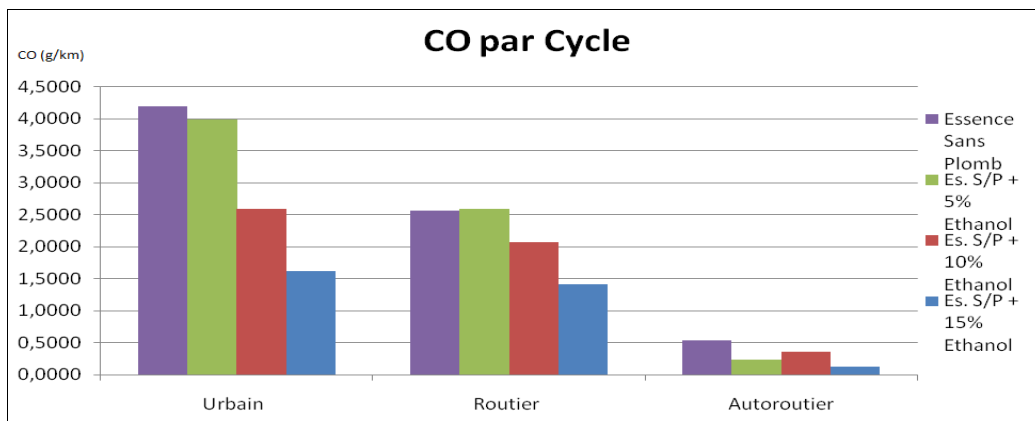


Figure 56: Evolution d'émission unitaire CO (g/km) par cycle de conduite.

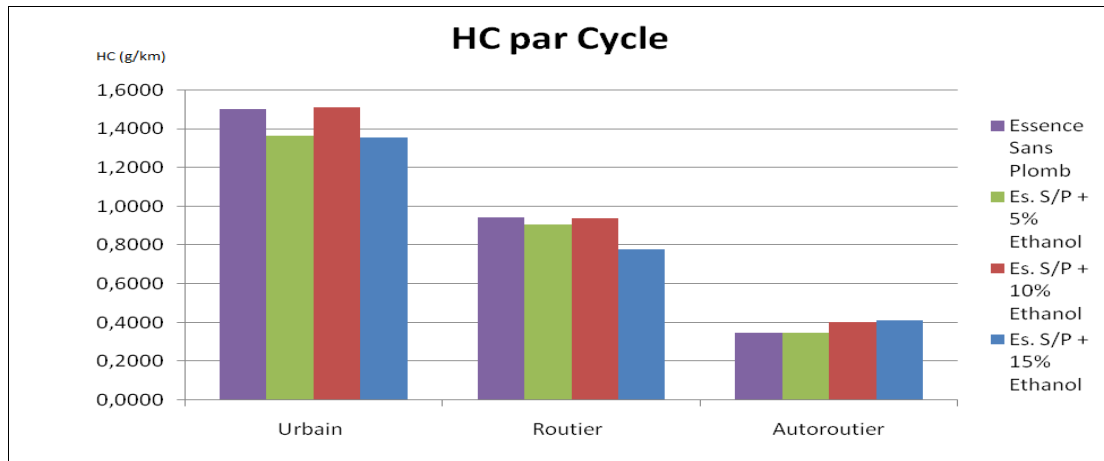


Figure 57: Evolution d’émission unitaire HC (g/km) par cycle de conduite.

L’addition d’ethanol à l’essence sans plomb semble améliorer considérablement les performances de ce dernier, en effet la combustion des mélanges d’essences sans plomb émettent moins de CO et HC totaux dans l’ensemble (voir figures 55-57).

En fonction de la vitesse :

Les résultats obtenus sont résumés dans les figures suivantes (voir figures 58-61) :

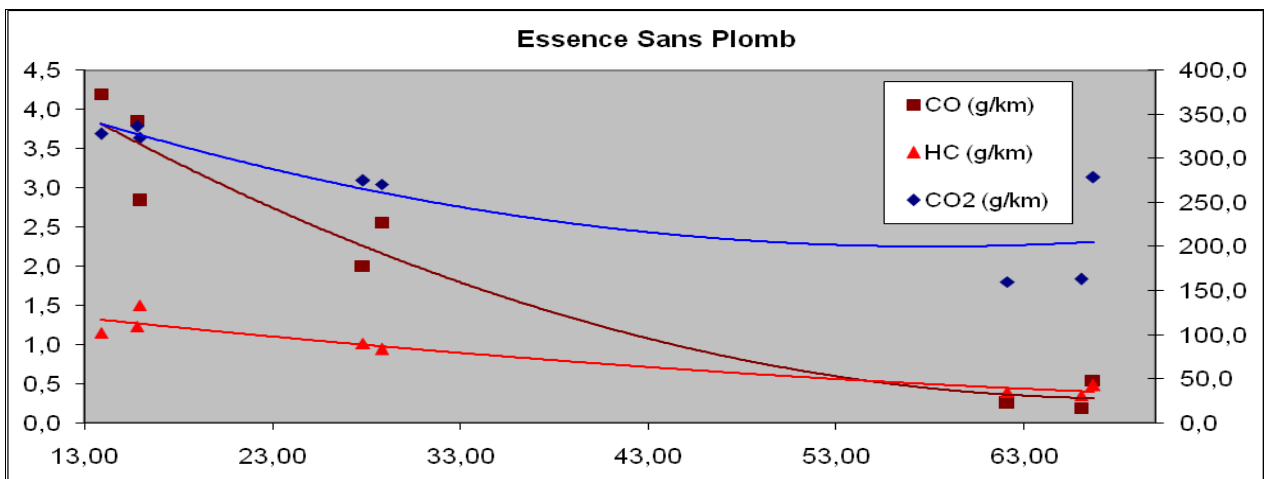


Figure 58: Evolution d’émission unitaire d’essence sans plomb en fonction de la vitesse.

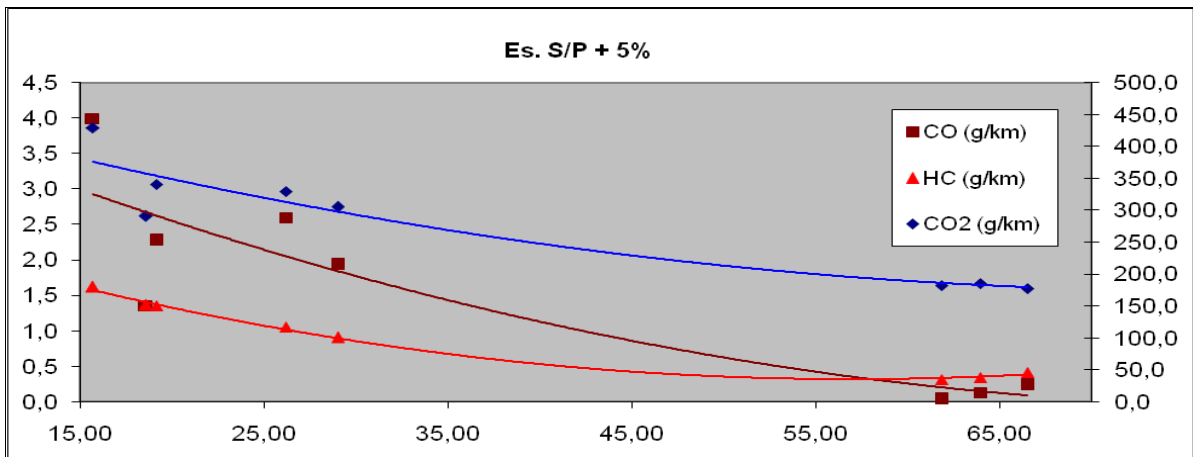


Figure 59: Evolution d'émission unitaire d'essence sans plomb + 5% d'ethanol en fonction de la vitesse.

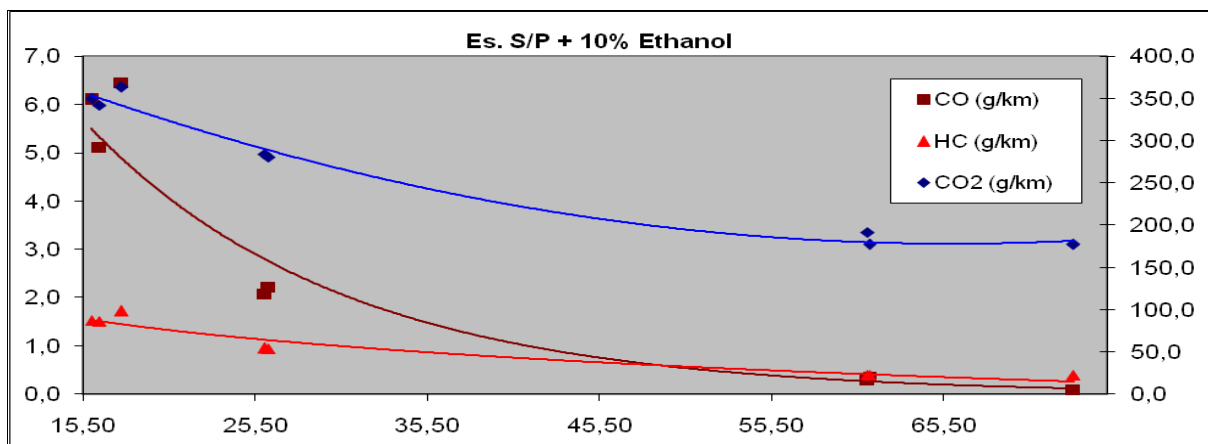


Figure 60: Evolution d'émission unitaire d'essence sans plomb + 10% d'ethanol en fonction de la vitesse.

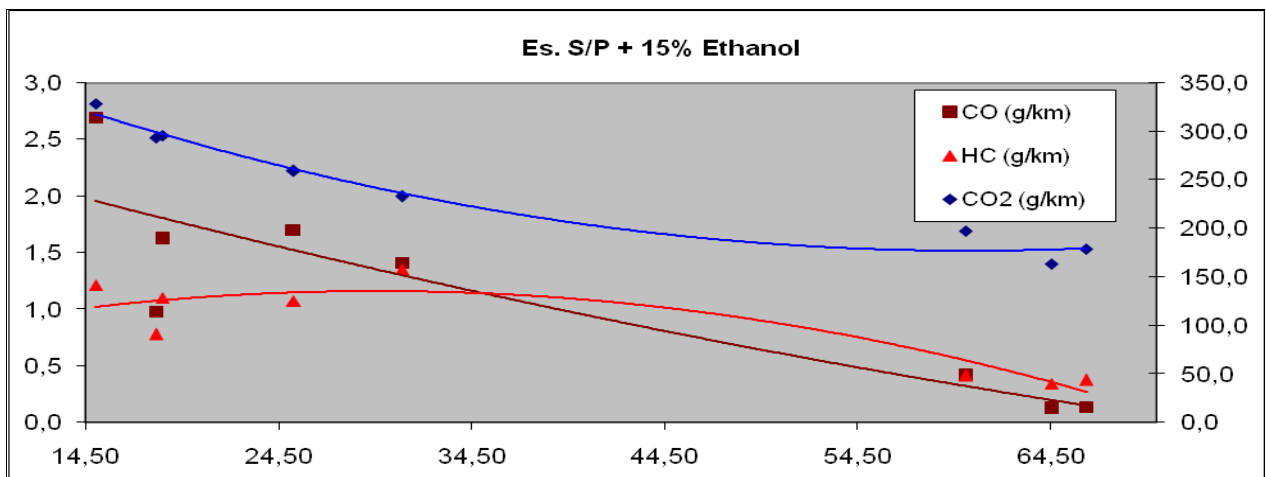


Figure 61 : Evolution d'émission unitaire d'essence sans plomb + 15% d'ethanol en fonction de la vitesse.

De même que pour l'essence super, l'essence sans plomb et ces différents mélanges à l'éthanol, à moins de 13 km/h (cycle urbain), présentent des émissions qui dépassent largement la norme algérienne en vigueur, cela dit, plus la vitesse augmente plus les émissions diminuent considérablement, jusqu'à descendre en dessous de la norme, pour des vitesses moyennes dépassant les 40 km/h (cycle autoroutier).

V.2.2.2 – En utilisant la Hyundai Accent :

La mesure des émissions du véhicule échantillon a été réalisée sur la base de trois essais en moyenne pour chaque type de voie (urbain, routier et autoroutier) avec plusieurs essais pour chaque carburant utilisé (essence super et ses mélanges à l'éthanol avec divers pourcentages) pendant environ 10 min pour chaque essai.

L'ensemble des résultats d'émission unitaires sont présentés en unité de masse par unité de distance parcourue (g/km), ces résultats sont résumés comme suit :

a) Traitement des données par cycle de conduite :

a.1) Cycle urbain :

Le tableau 25 résume les résultats obtenus lors des essais en cycle urbain de l'accent.

Tableau 25 : Résultats des essais en cycle urbain de l'accent avec l'essence super et ses mélanges en éthanol.

	Essence Super			Es. S + 5% Ethanol			Es. S + 7,5% Ethanol			Es. S + 10% Ethanol		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Essai 9	Essai 10	Essai 11	Essai 12
HCm (ppm)	7,5	7,2	6,6	8,9	8,2	7,2	29,7	50,7	24,4	12,5	15,2	7,8
HCt (ppm)	285	261	288	422	326	349	718	734	485	507	447	380
CO (ppm)	1379	1272	1137	1436	1413	1253	1900	2640	1840	1164	1481	853
CO₂ (%)	0,818	0,733	0,789	1,008	0,915	0,855	0,939	0,735	0,779	0,987	0,922	0,846
Durée essai (s)	725	842	771	670	661	676	593	595	651	615	593	611
Vitesse moy (km/h)	15,89	13,68	14,94	17,19	17,43	17,04	19,43	19,36	17,70	18,73	19,43	18,85
Vitesse moy (km/h) Datalogger	14,63	12,93	14,07	16,93	16,51	16,08	18,39	18,33	17,09	17,68	18,33	17,83
Température ambiante moyenne	26,5	26,3	25,5	24,6	25,3	26,0	27,8	27,6	27,7	25,2	25,4	26,2

En faisant la moyenne des essais, et en calculant les émissions unitaires tel que décrit dans l'annexe 2, on obtient les résultats représentés dans le tableau 26 :

Tableau 26: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle urbain pour l'Accent.

	Vmoy	CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)
Essence Super	14,837	270,553	28,100	3,625
Es. S + 5% Ethanol	15,270	266,134	27,322	3,926
Es. S + 7,5% Ethanol	16,520	254,620	25,217	4,824
Es. S + 10% Ethanol	17,220	228,432	23,425	6,042

Du dernier tableau, on peut déduire les figures suivantes (voir les figures 40 à 42):

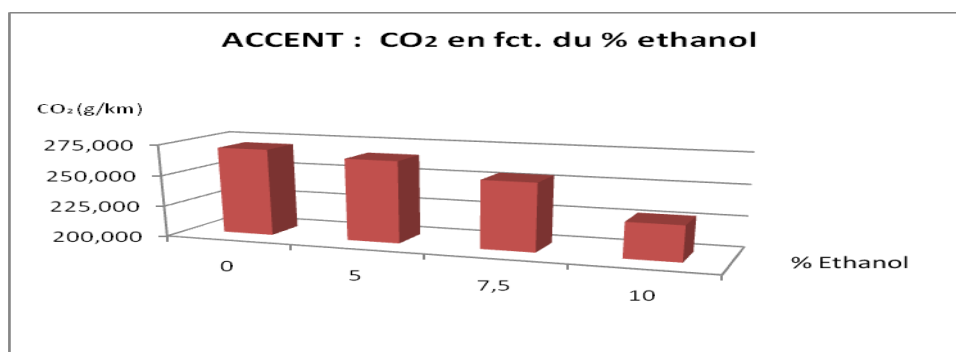


Figure 62: Evolution d'émission unitaire CO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en urbain.

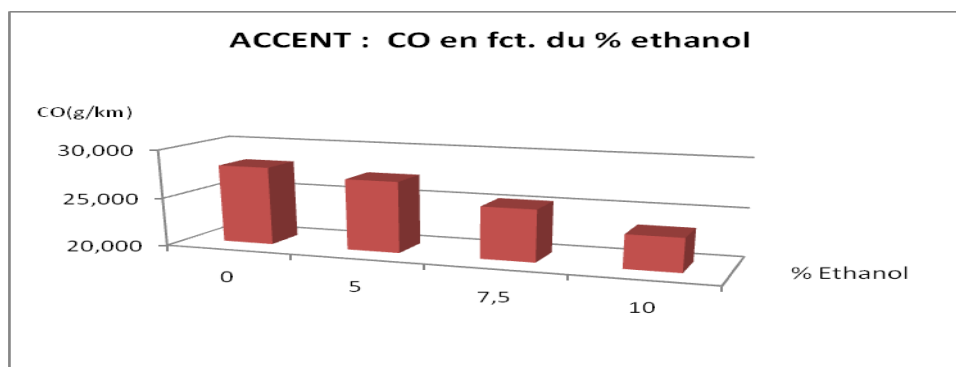


Figure 63: Evolution d'émission unitaire CO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en urbain.

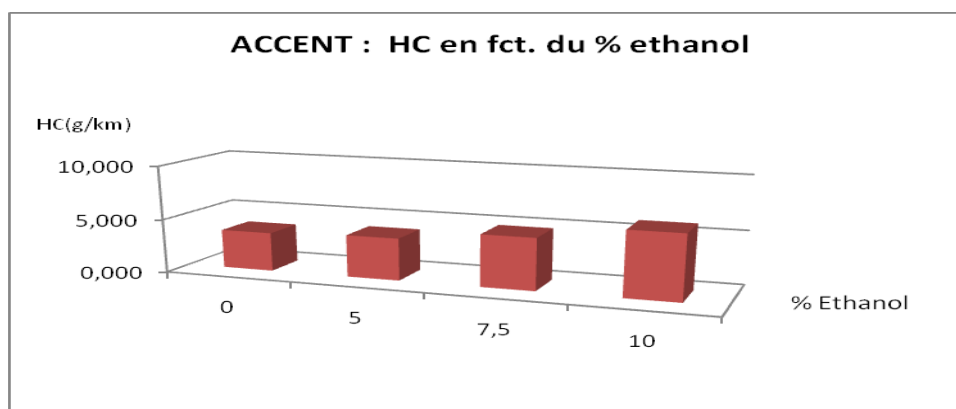


Figure 64: Evolution d'émission unitaire HC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en urbain.

Pour ce qui est du CO₂ et du CO, l'addition d'éthanol ne semble avoir qu'un léger effet sur leur émissions, de par l'augmentation de l'indice d'octane, la combustion s'améliore, mais en revanche les teneurs en HC totaux en augmenté fortement, ce qui va dans le sens des résultats trouvé précédemment.

Il est à noter que les émissions en CO et HC sont largement au dessus de la norme algérienne en vigueur.

a.2) cycle routier :

Le tableau 27 résume les résultats obtenus lors des essais en cycle routier de l'accent.

Tableau 27 : Résultats des essais en cycle routier de l'accent avec l'essence super et ses mélanges en éthanol.

	Es. Super		Es. S + 5% Ethanol			Es. S + 7,5% Ethanol			Es. S + 10% Ethanol		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Essai 9	Essai 10	Essai 11
HCm (ppm)	6,0	6,9	7,8	7,6	7,6	8,1	10,9	11,8	9,2	10,2	13,2
HCt (ppm)	362	471	408	449	342	380	376	389	398	442	503
CO (ppm)	961	1040	1084	1153	1204	980	1182	989	850	893	1015
CO₂ (%)	0,959	0,999	1,113	1,115	0,963	1,132	1,063	1,246	0,978	1,024	1,198
Durée essai (s)	798	837	778	766	974	710	762	701	790	783	719
Vitesse moy (km/h)	25,7	24,5	26,4	26,8	21,1	28,9	26,9	29,3	26,0	26,2	28,5
Volume (m3)	0,519	0,533	0,516	0,516	0,654	0,473	0,505	0,463	0,526	0,518	0,473

En faisant la moyenne des essais, et en calculant les émissions unitaires tel que décrit dans l'annexe 2, on obtient les résultats représentés dans le tableau 28:

Tableau 28: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle routier pour l'Accent.

	Vmoy (km/h)	CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)
Es. Super	25,100	223,169	12,324	3,068
Es. S + 5% Ethanol	24,767	219,182	11,003	3,044
Es. S + 7,5% Ethanol	25,600	214,061	10,221	2,897
Es. S + 10% Ethanol	25,633	209,679	9,278	2,709

Les résultats obtenus nous ont permis d'aboutir aux graphes suivants (voir les figures 65-67) :

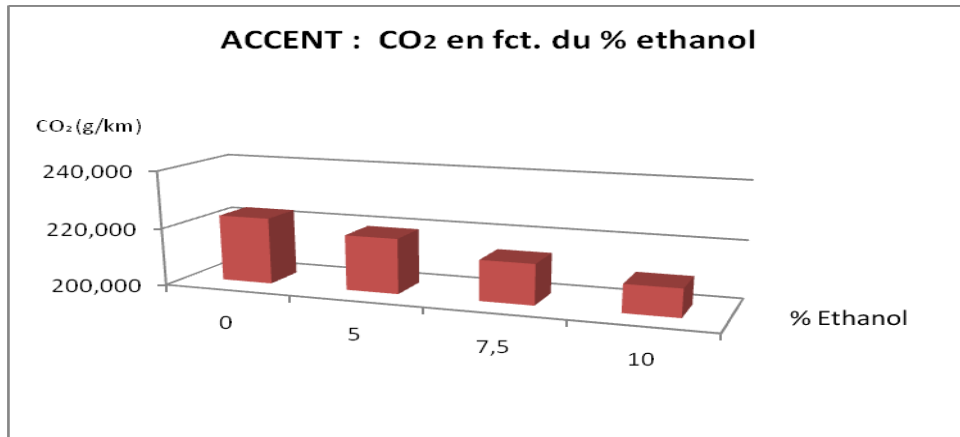


Figure 65: Evolution d'émission unitaire CO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en routier.

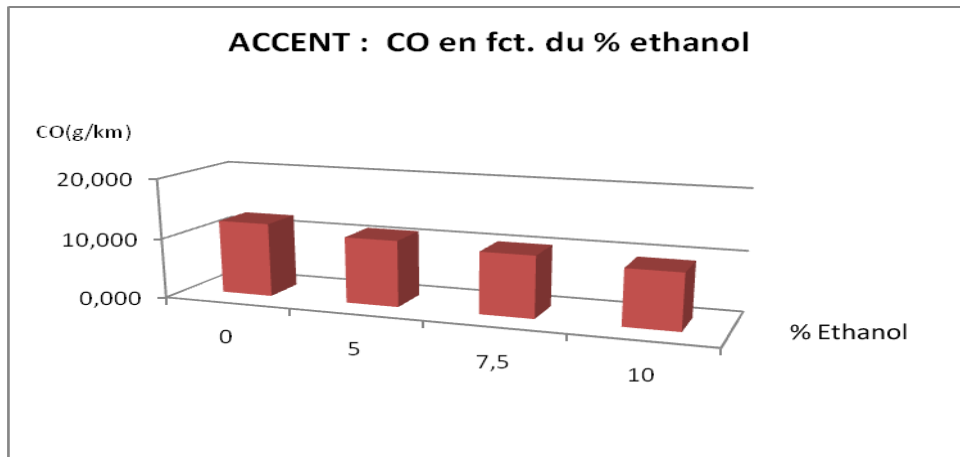


Figure 66: Evolution d'émission unitaire CO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en routier.

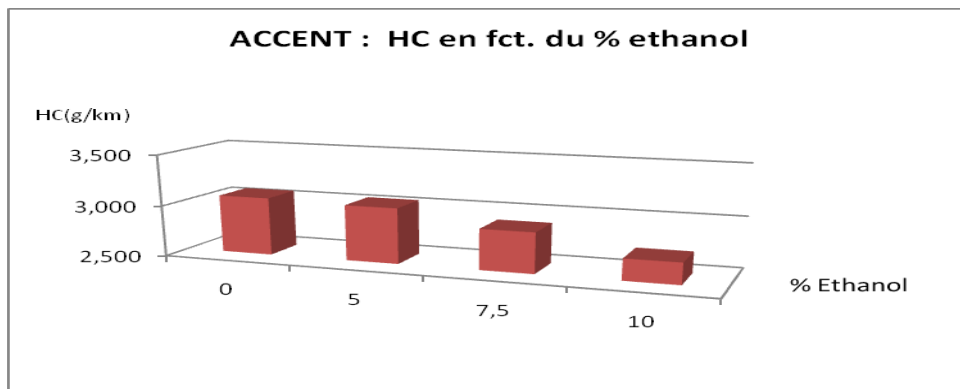


Figure 67: Evolution d'émission unitaire HC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en routier.

En cycle routier comme en urbain, l'addition d'éthanol à l'essence ne semble guère bénéfique en terme d'émission CO et HC, mais une légère amélioration de la combustion est à signaler.

a.3) cycle autoroutier :

Le tableau 29 résume les résultats obtenus lors des essais en cycle autoroutier de l'accent.

Tableau 29 : Résultats des essais en cycle autoroutier de l'accent avec l'essence super et ses mélanges en éthanol.

	Es. Super		Es. S + 5% Ethanol			Es. S + 7,5% Ethanol			Es. S + 10% Ethanol		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Essai 9	Essai 10	Essai 11
HCm (ppm)	12,8	11,8	13,8	12,2	13,8	9,8	14,1	9,2	14,4	12,1	18,5
HCt (ppm)	485	423	484	441	480	364	445	388	418	399	493
CO (ppm)	2250	1970	1810	1860	1940	1461	1920	1198	1509	1478	1570
CO₂ (%)	2,242	2,041	2,310	2,124	2,320	1,850	2,284	1,948	1,740	1,601	1,944
Durée essai (s)	533	525	528	551	540	635	529	605	708	702	627
Vitesse moy (km/h)	75,65	76,80	76,36	73,18	74,67	63,50	76,22	66,64	56,95	57,44	64,31
Volume (m3)	0,339	0,333	0,340	0,362	0,352	0,409	0,331	0,380	0,470	0,449	0,406
Température ambiante moyenne	27,7	27,2	30,6	30,7	29,7	25,8	25,2	23,1	29,0	29,0	28,4

En faisant la moyenne des essais, et en calculant les émissions unitaires tel que décrit dans l'annexe 2, on obtient les résultats représentés dans le tableau 30:

Tableau 30: Emissions unitaires en fonction de la vitesse et du carburant utilisé en cycle autoroutier pour l'Accent.

	V _{moy} (km/h)	CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)
Es. Super	76,225	139,972	8,725	1,090
Es. S + 5% Ethanol	74,737	151,963	7,964	1,160
Es. S + 7,5% Ethanol	68,787	146,961	6,913	1,063
Es. S + 10% Ethanol	59,567	148,810	8,105	1,360

Les résultats obtenus nous ont permis d'aboutir aux graphes suivants (voir figure 68-70) :

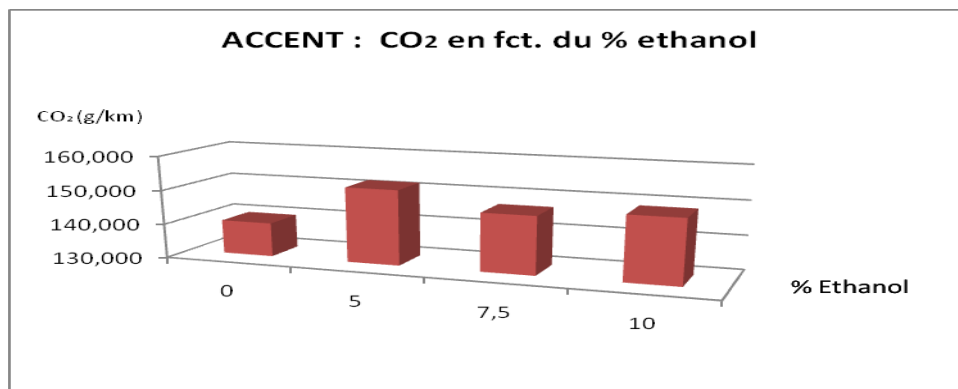


Figure 68: Evolution d'émission unitaire mCO₂ (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en autoroutier.

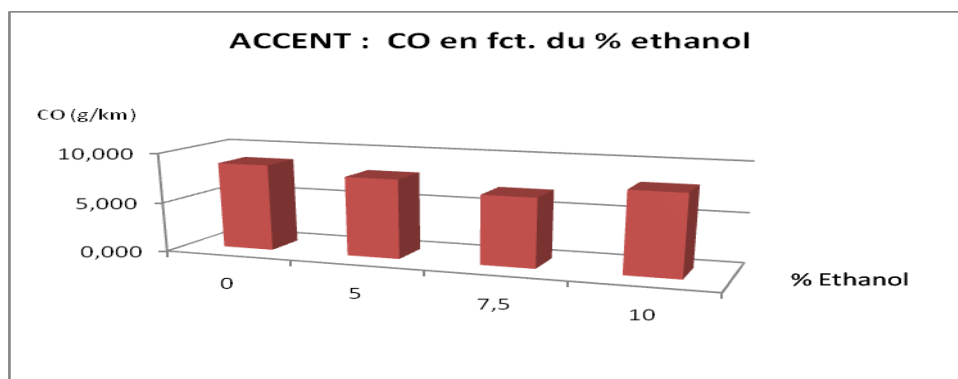


Figure 69: Evolution d'émission unitaire mCO (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en autoroutier.

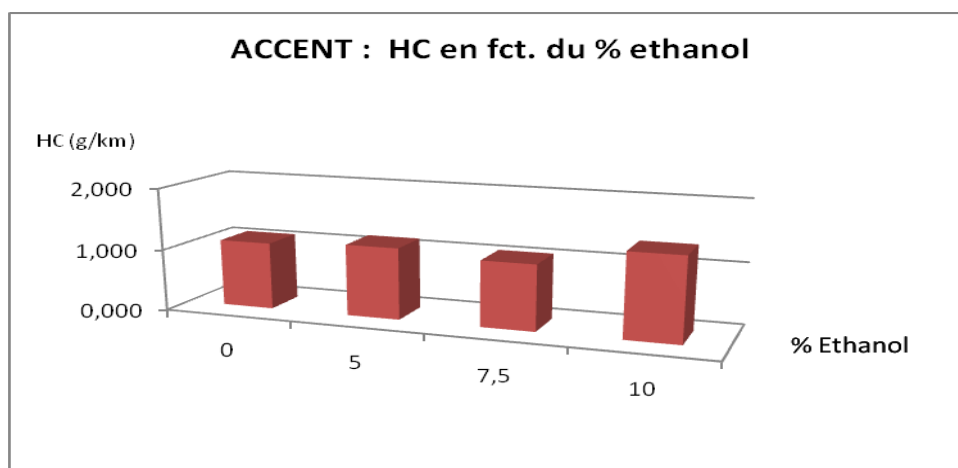


Figure 70: Evolution d'émission unitaire mHC (g/km) en fonction du pourcentage d'éthanol dans l'essence super pour l'Accent en autoroutier.

L'addition d'éthanol semble avoir un caractère même dégradant sur les émissions en CO₂, CO et HC en autoroutier, cela stipule que le moteur de l'accent ait une meilleure combustion en essence super qu'en mélange.

a) par cycle de conduite :

Les résultats obtenus sont résumés dans les figures suivantes (voir figures 71-73) :

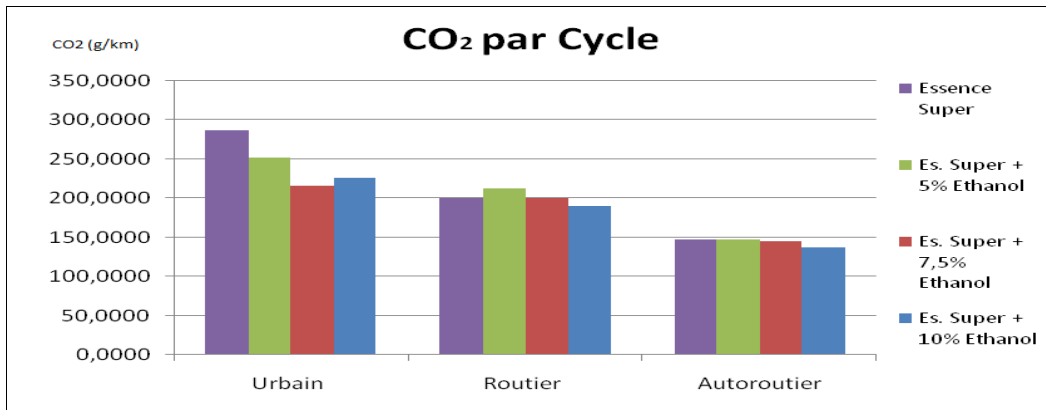


Figure 71: Evolution d'émission unitaire CO₂ (g/km) par cycle de conduite.

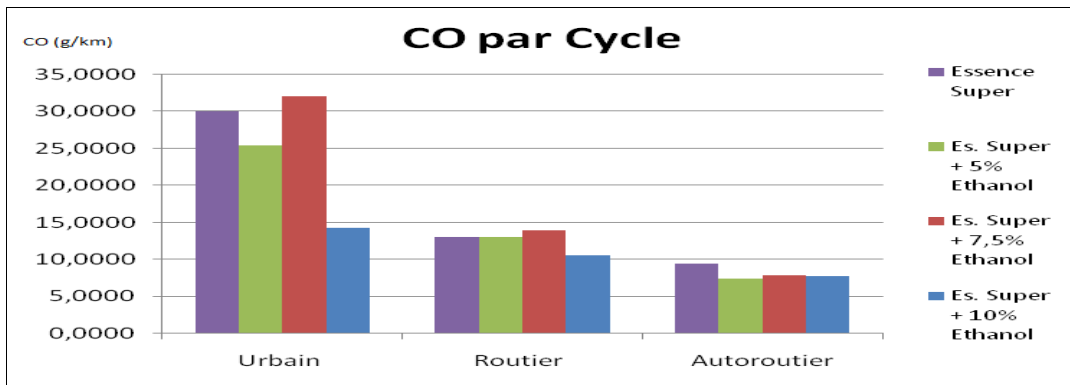


Figure 72: Evolution d'émission unitaire CO (g/km) par cycle de conduite.

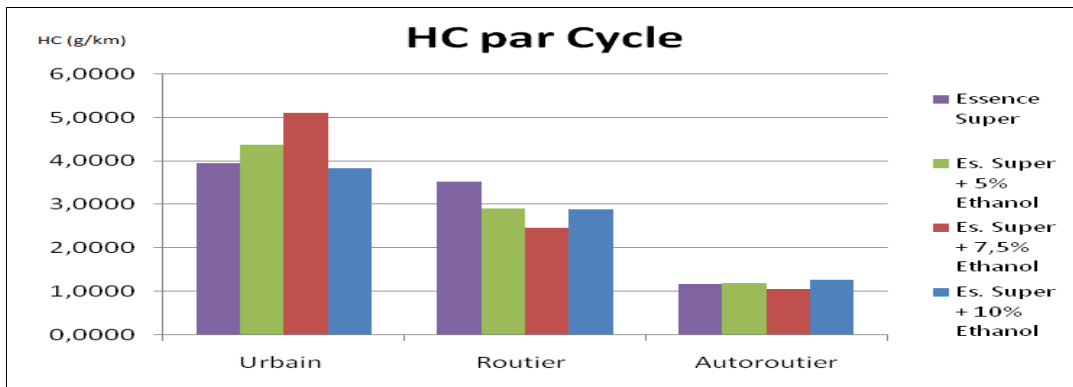


Figure 73: Evolution d'émission unitaire HC (g/km) par cycle de conduite.

En effet, malgré une diminution sensible des émissions par cycle de conduite, les teneurs restent en dessus des valeurs limites introduites par la norme algérienne (voir les figures 71-73).

Cela, ne peut s'expliquer que par le fait que l'Accent 2004, qui est un véhicule asiatique non catalysé, ne répond pas au départ déjà, aux normes d'émissions en vigueur.

b) en fonction de la vitesse:

Les résultats obtenus sont résumés dans les figures suivantes (voir figures 74-77) :

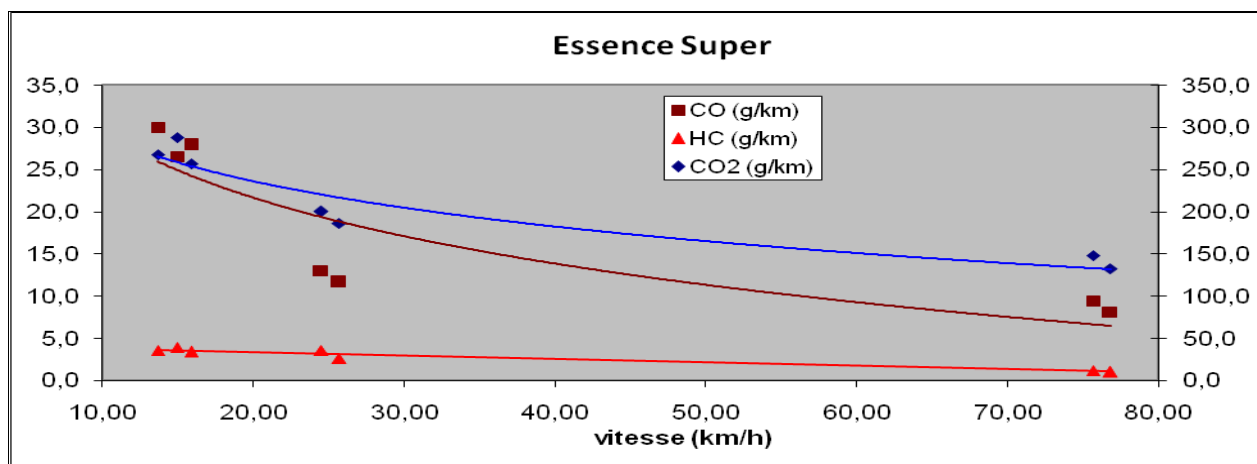


Figure 74: Evolution d'émission unitaire d'essence super en fonction de la vitesse.

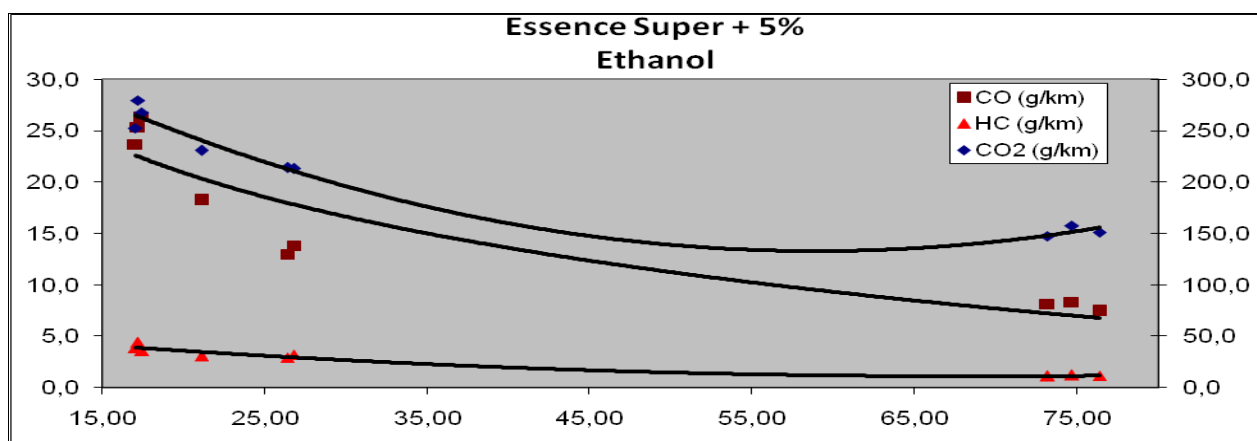


Figure 75: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 5 % d'éthanol en fonction de la vitesse.

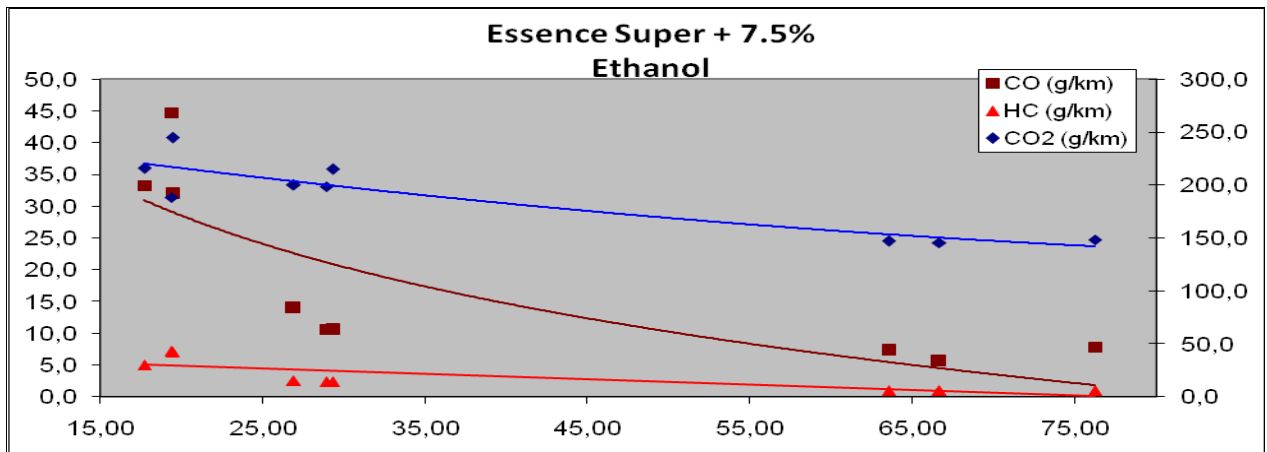


Figure 76: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 7.5% d'ethanol en fonction de la vitesse.

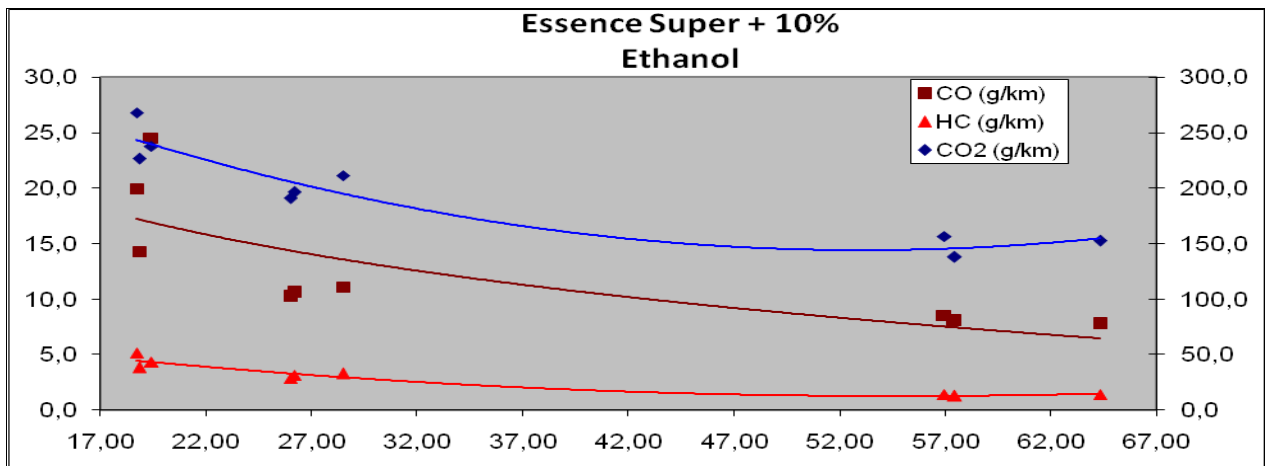


Figure 77: Evolution d'émission unitaire d'essence super + 10 % d'ethanol en fonction de la vitesse.

L'essence super et ces différents mélanges à l'éthanol, présentent des émissions très fortes qui dépassent largement la norme algérienne en vigueur, cela même à des vitesses plus élevées (voir les figures 74-77).

V.2.2.3 – Comparaison entre les deux véhicules :

Dés résultats obtenues précédemment, on peut déduire les graphiques suivants (voir les figures 78-83) qui nous permettront de pouvoir comparer les deux véhicules utilisé dans notre campagne.

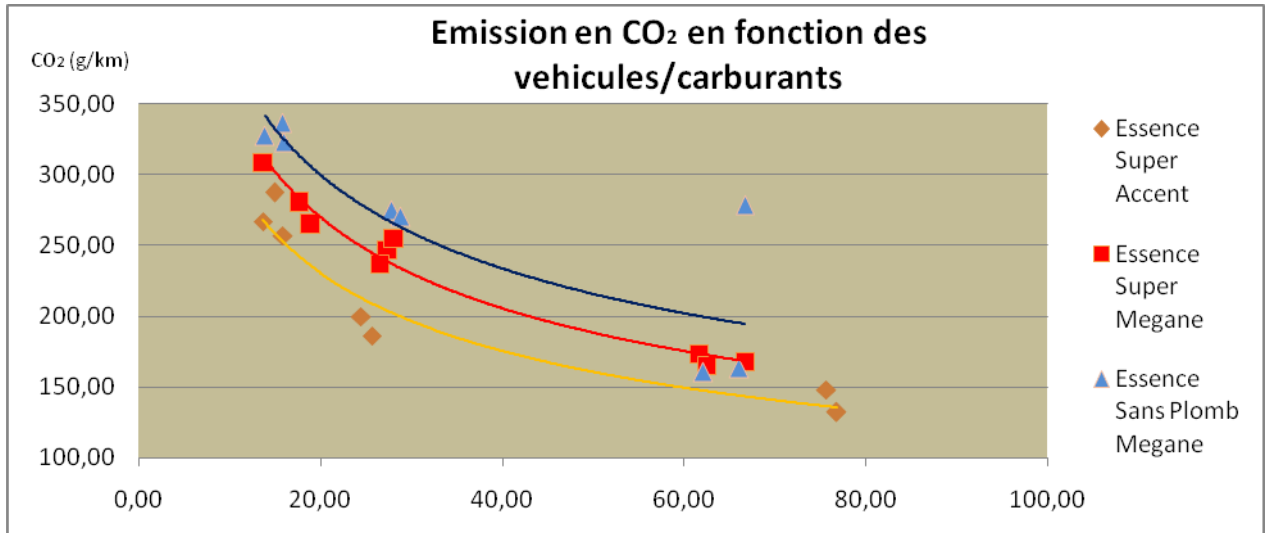


Figure 78: Evolution des émissions CO₂ pour les deux véhicules en Essence Super et S/P.

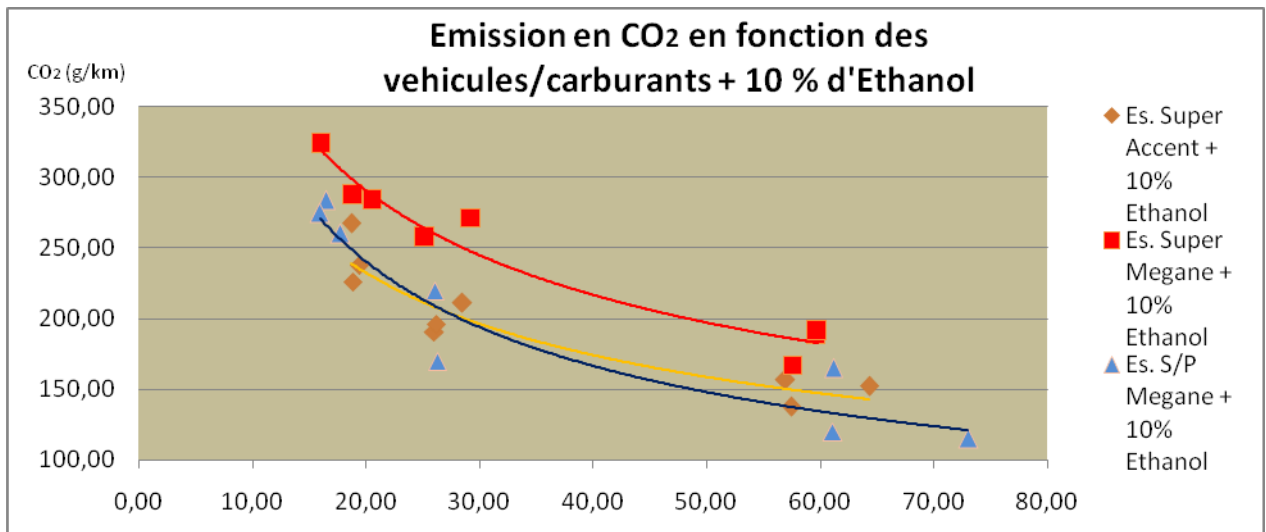


Figure 79: Evolution des émissions CO₂ pour les deux véhicules en Essence Super et S/P avec addition de 10% d'éthanol.

Globalement les émissions en CO₂ diminuent avec l'augmentation de la vitesse, à noter une amélioration et une diminution rapide lors de l'utilisation de la mégane avec l'essence sans plomb plus 10 % d'éthanol (voir figure 79).

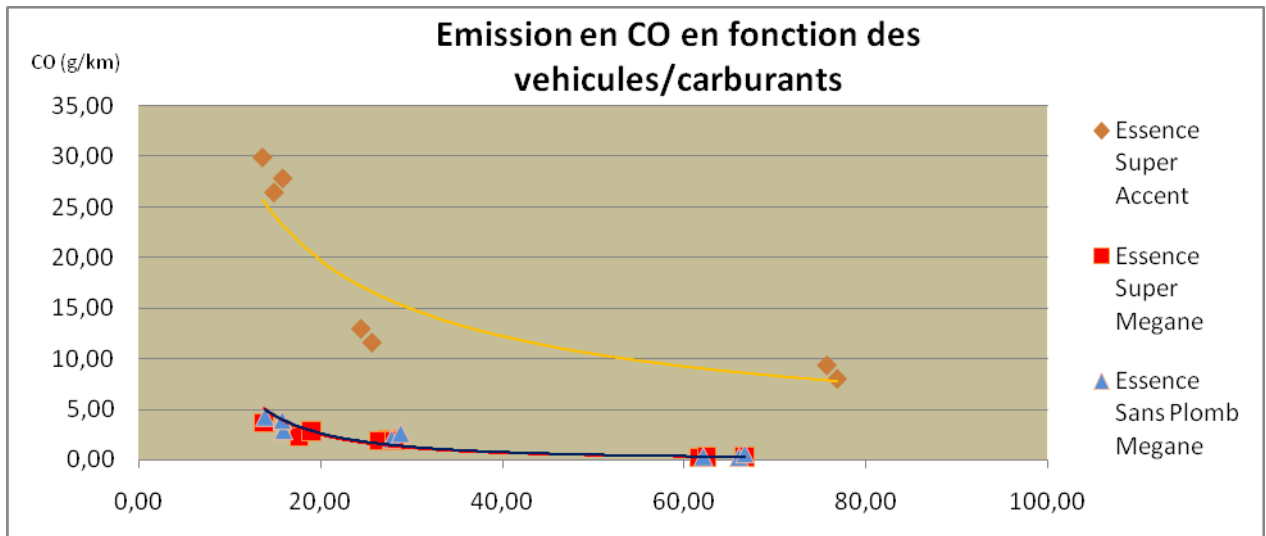


Figure 80: Evolution des emissions CO pour les deux véhicules en Essence Super et S/P.

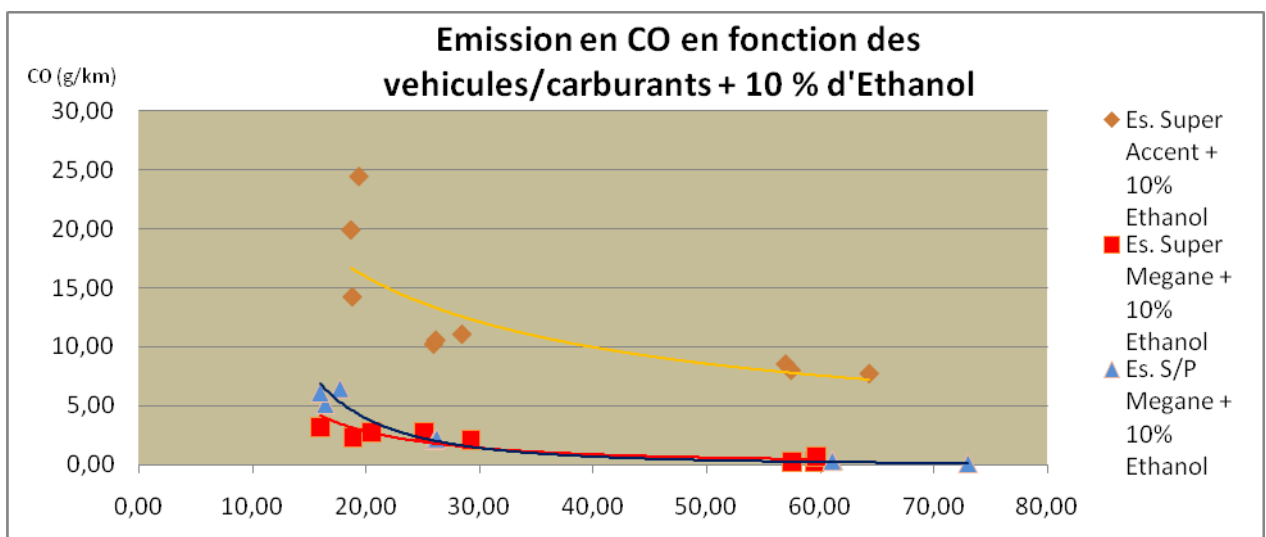


Figure 81: Evolution des emissions CO pour les deux véhicules en Essence Super et S/P avec addition de 10% d'ethanol.

En constate que l'Accent est de très loin plus polluantes en CO que la Mégane (voir figure 80-81), cette difference de taille ne peut s'expliquer que par la difference en technologie des moteurs, ajouter à cela, le fait que l'Accent ne soit pas un vehicule catalysé.

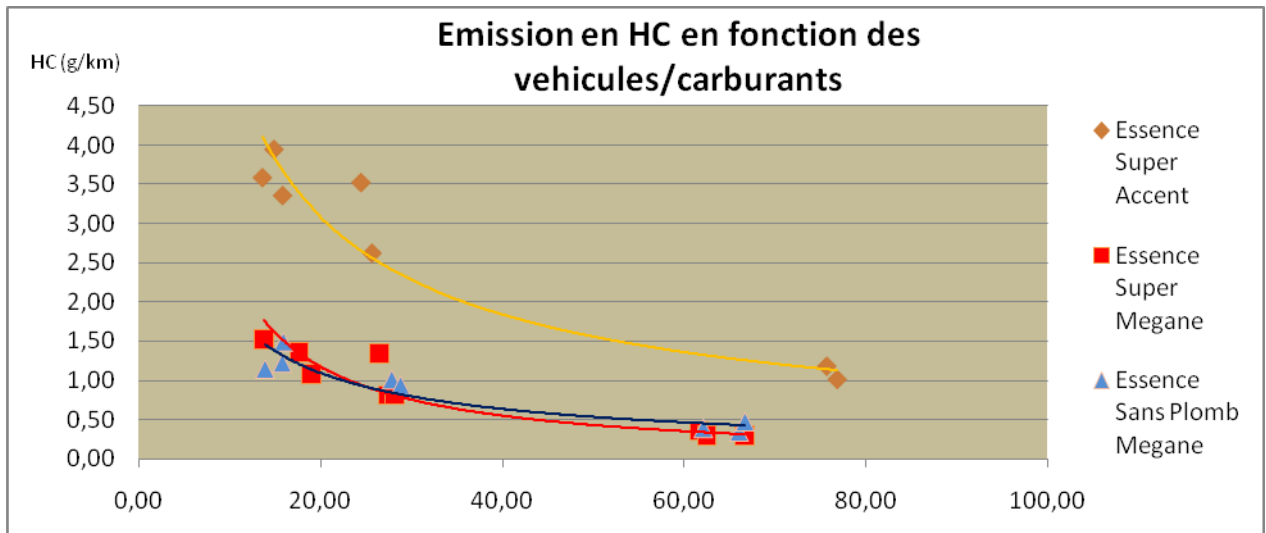


Figure 82: Evolution des emissions HC pour les deux véhicules en Essence Super et S/P.

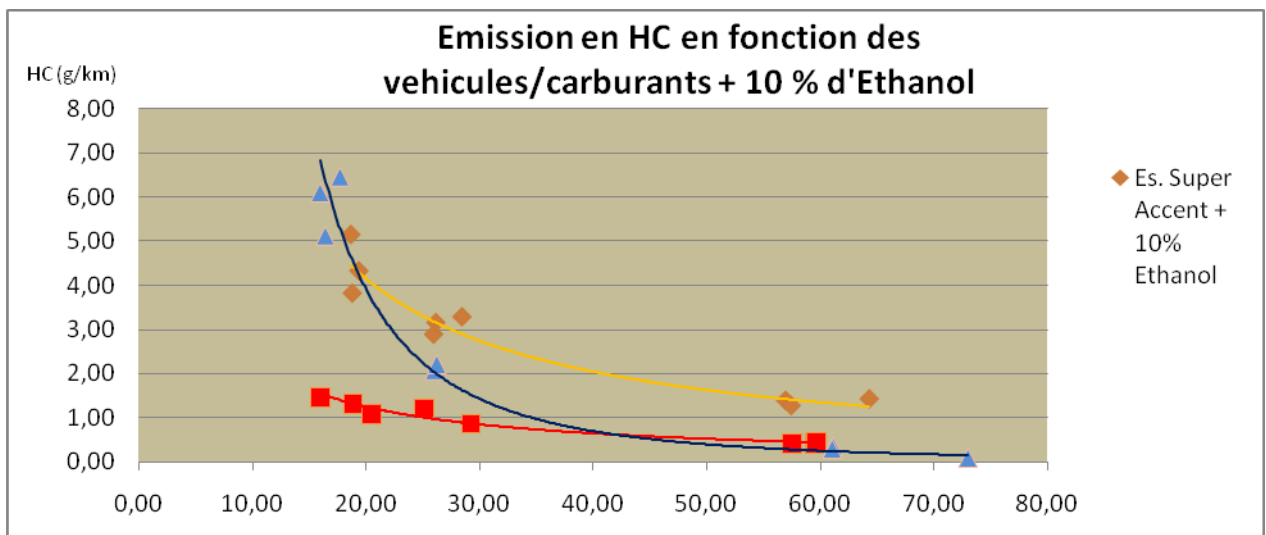


Figure 83: Evolution des emissions HC pour les deux véhicules en Essence Super et S/P avec addition de 10% d'ethanol.

De même que pour le CO, les émissions de l'Accent en HC totaux sont médiocre, par rapport à celles de la mégane qui, en moyenne, est en dessous des valeurs limites exigés par la norme Algérienne.

V.2.3 - Conclusion :

De part son amélioration de l'indice d'octane, l'éthanol est un additif bénéfique en termes de réduction d'émission en CO et HC pour les essences sans plomb, résultat notamment obtenu lors de nombreuses précédentes études [79 , 81 - 84].

Toutefois, cette caractéristique reste très mitigée, lorsqu'il s'agit d'essence super (plombée), en effet, la dilution du plomb entraînerait une augmentation des aromatiques dans le mélange globale, ce qui augmenterait de fait, les émissions en HC totaux, thèse notamment avancée par une étude précédente [80].

A noter aussi, la très nette différences en terme d'émission en CO et HC, entre un véhicule catalysé (Renault Megane) et un véhicule non-catalysé (Hyundai Accent), pourtant cette dernière ayant des émissions en CO₂ moindre, a émis de très forte teneurs en CO et HC, dépassant très largement les seuils limites imposés par la norme Algérienne en vigueur.

A noter aussi, que lors du cycle urbain, les deux véhicules utilisés, en émis des teneurs en CO et HC en dessus des valeurs limites autorisés par la norme Algérienne, cette dernière, toutefois, reste très floue quant à la manière de comparer ces valeurs limites aux valeurs émises réellement.

Dans sa globalité, l'addition de l'éthanol à l'essence sans plomb a eu des résultats satisfaisant, mais l'addition à l'essence super, a eu des résultats très mitigés : dans la majorité des cas, l'effet de l'éthanol est soit imperceptible, soit nul.

Conclusion Générale

Vue une demande mondiale de carburants, toujours en forte croissance alliée à une pollution atmosphérique grandissante qui est, sans conteste, un des problèmes majeur de notre époque, le besoin à développer des carburants alternatives et propres devient de plus en plus nécessaire.

C'est dans cette perspective, à la fois de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer notre dépendance vis-à-vis des hydrocarbures fossiles que les bioéthanol sujet de notre étude, ont été développé.

Ce travail, dans sa première partie, a abouti aux mêmes conclusions obtenues lors de précédentes études portant sur la caractérisation d'un bioéthanol [60,63 et 80], qui toutes, ont souligné que le mélange éthanol-essence à des proportions ne dépassant pas 10 à 15% en volume, présentent certaines propriétés intéressantes, en vue de son utilisation comme carburant automobile, notamment avec un haut indice d'octane qui engendrera une meilleure combustion et de ce fait ce traduira par une baisse sensible des émissions en CO₂, plus encore, elles s'accordent avec notre étude, sur que d'autres propriétés, telle que l'augmentation de la TVR, tout en restant au-dessus des seuils limites exigés par la norme algérienne, peuvent posées certains problèmes lors de l'utilisation dans des conditions climatiques extrêmes.

Dans la seconde partie de notre étude, lors des prélèvements en circulation réelles, nous nous sommes attelés tout d'abord, à démontrer la répétabilité et l'homogénéité entre les différents cycles de conduite, afin de nous assurer que la comparaison entre les résultats obtenues entre les différents véhicules, pouvait se faire en toute quiétude, ensuite nous avons analysés les données obtenues par un échantillonneur embarquée, où il a été constaté, que les véhicules catalysés émettaient en générale, moins d'émission polluante que les véhicule non catalysé, et cela, même en utilisant une essence plombé, cette différence est d'autant plus importante encore, lors que les efforts du pot catalytique sont conjugués avec un bioéthanol (E15).

En effet, de part son amélioration de l'indice d'octane, l'éthanol est un additif bénéfique en termes de réduction d'émission en CO et HC pour les essences sans plomb, caractéristique qui reste très mitigée, lorsqu'il s'agit d'essence super (plombée).

Les bioéthanol, donc, sont une solution d'appoint à l'essence sans plomb : en effet leur mode d'utilisation en mélange qui est leur point fort puisque, contrairement à d'autres carburants alternatifs (GNC, GPL), ils peuvent bénéficier des réseaux actuels de distribution de carburants et être utilisés sans adaptation particulière des véhicules à des mélanges ne dépassant pas 15%.

Aussi, la possibilité de leur production à partir des écarts de dattes en Algérie est effective, on peut dénombrer plusieurs études optimistes allant dans ce sens [61, 62], malgré que les investissements financiers dans ce secteur de production tarde à venir, leur futur production reste quasi assuré, tant les enjeux sont élevés.

Références bibliographiques

- [1] VALLERO D. A., Fundamentals of air pollution, Edition Academic Press, 2008.
- [2] KERBACHI R., BOUGHEDAOU M., OUCHER N., BITOUCHE A., BERKOUKI N. & JOUMARD R. "Pollution par les particules fines dans l'agglomération d'Alger" - Int. symp. Environment and Transport in different contexts. Ghardaïa, Algeria, 16-18 février 2009 Actes ENP ed., Alger, vol. 1, pp 48-60.
- [3] KERBACHI R., BOUGHEDAOU M., BOUNOUA, L., KEDDAM, M. : Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers. Atmos. Environ.40, 2006, 3995–4003.
- [4] KERBACHI R., BOUGHEDAOU M., JOUMARD R. : Etude de la pollution de l'air par les particules fines (PM-10, PM-2,5 et PM-1) et évaluation des métaux lourds qu'elles véhiculent en milieu urbain à Alger, 15^{ème} Colloque International Transport et Environnement, 12-14 juin 2006, Reims (France)
- [5] BOUGHEDAOU M., KERBACHI R., JOUMARD R.: On-Board emission measurement of high-loaded light duty vehicles in Algeria, Journal of the Air and Waste Management Association, Vol. 58, 2008, pp. 45-54
- [6] KERCHICH Y., KERBACHI R., KHATRAOUI H.: Ambient air levels of aromatic organic compounds BTEX in the urban area of Algiers. A. J. of Chem., Vol.23 N°1, 2010, pp. 323-330.
- [7] KERBACHI R., BOUMECHHOUR F., ARRAR J. ET BOUGHEDAOU M. : Pollution de l'air par les particules acides à Alger et influence de l'aérosol marin, Poll. Atm. N°204, 2009, pp. 453-459

Références bibliographiques

- [8] KERBACHI R. , Y. KERCHICH ET H. KHATRAOUI, Cartographie de la pollution de l'air par les BTEX dans le grand-Alger, Premier colloque francophone « Polluants organiques générés par l'agriculture et les transports, 25 – 27 octobre 2011, Agadir, Maroc
- [9] BOUGHEDAOU M., Thèse de Doctorat d'État, Étude des émissions polluantes issues du trafic routier en Algérie, ENP, Alger, 2007.
- [10] OFFICE NATIONALE des STATISTIQUES Algérienne, Site Web : www.ons.dz
- [11] JOUMARD R., PATUREL L., VIDON R., GUITTON J.-P., SABER A.-I. and COMBET E. (1990) : Emissions unitaires de polluants des véhicules légers. INRETS report, n° 116, Bron, France, 120 p.
- [12] DEGOBERT P., Origine des émissions au niveau moteur. Technique de l'ingénieur B2710, 1994.
- [13] DEGOBERT P., Automobiles and pollution. Edition technip, Paris, 1995.
- [14] AGARWAL S.K., Automobile and pollution, Edition Publishing, New Delhi, 1997.
- [15] WATKINS L.H., Air pollution from road vehicles. *NATO (CCMS) Conference on Air Pollution Modelling*. Crete, Greece, 1991.
- [16] DEGOBERT P., Automobile et pollution. Edition Technip, Paris, 1992.
- [17] AGARWAL S.K., Air Pollution, Publishing, New Delhi, 2009.
- [18] DELETRAZ G., Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne. Thèse de doctorat, université de Pau et pays de l'Adour, ADEME, décembre 2002.

Références bibliographiques

[19] WARK K., WARNER C. F., DAVIS W. T., Atmospheric Pollution : its origin and control, Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1998.

[20] MASCLLET P., Pollution atmosphérique: causes, conséquences, solution, perspectives. Ellipses édition, Paris, 2005.

[21] SAMBAT S., Inventaire des émissions de particules primaires. CITEPA, décembre 2001

[22] JOURMARD R. (ed.) (1999): COST 319 - Estimation of pollutant emissions from transport: Scientific state-of-the-art and network of European scientists. European Commission, DG Transport, n°EUR 18902, ISBN 92-828-6797-8, Luxembourg, 174 p.

[23] ELICHAGARAY C., La pollution atmosphérique, données générales sur les émissions et la physico-chimie des polluants de l'air, leurs effets, la réglementation. ADEME, 31 mars 2004.

[24] MARTIN J. et MAYSTER L. Y., « Santé et pollution de l'air », presse polytechniques Romandes, Suisse, 1998.

[25] BROCHARD D., PAIRON J.C., BIGNON J., « Aérosol et santé : Déposition et épuration des particules inhalées », Pollution atmosphérique, Avril Juin, pp178-182, 1999.

[26] AUSTIN J., BRIMBLECOMBE P. and STURGES W. : "Air pollution, science for 21st century", Elsevier, 2002.

[27] DOCKERY D.W., SPEIZER F.E., STRAM D.O., WARE J.J.H., SPENGLER J.D., FERRIS B.G. Jr., "Effects of inhalable particles on respiratory health of children", Am. Rev. Respir Dis, Environ Health Perspect, p104, May 1996.

[28] BRAUN- FAHLANDER C., GRASSNER M., GRIZE L., NEUVARONIER C., VUILLE J.C., WITHRICH B., "respiratory health and long term exposure to air pollutants in, suisse school children", Am. J. Respir. Crit. Care Med., Vol 155, No. 3, 03 1997, 1042-1049.

- [29] Pope et al., « Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults » , American Journal of. Respiratory Critical Care Medicine, vol. 151, 1995, p. 669 à 674.
- [30] DOCKERY D.W., SCHWARTZ J., SPENGLER J.D., « Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosols. » , Environmental Research Volume 59, Issue 2, December 1992, Pages 362-373.
- [31] JACOBSON M. Z., Atmospheric pollution : History, Science and Regulation, Edition Cambridge University, Cambridge, UK, 2002.
- [32] HESTER R. E., HARRISON R. M., Air pollution and health. Edition Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1998.
- [33] GURJAR B. R., MOLINA L. T., Air Pollution: Health and Environmental Impacts, CRC Press, Florida, USA. p. 696, 2010.
- [34] NICOLOPOULOU-STAMATI P., HENS L., HOWARD V., Environmental health impacts of transport and mobility, Edition Springer, New York, 2005.
- [35] EL YAMANI M., Pollution atmosphérique urbaine, Afsset, juin 2006.
- [36] HOLGATE S. T., Air pollution and health, Edition Academic Press, London, 1999.
- [37] ENVIRONNEMENT CANADA, Les particules de l'air ambiant - Vue d'ensemble, Québec, Février, 1998.
- [38] COURIEUX F., PERSON V, LE MOULLEC Y., « Connaissance atmosphérique en milieu urbain : représentativité biologique et difficultés météorologiques », Pollution atmosphérique, Janvier Mars, 1990, pp. 21-30.

- [39] SISLER J. F. «The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States. », *Atm. Env.*, Vol. 28, N° 5, p 851-862, 1994.
- [40] BOUGHEDAOU M., CHIKHI S., DRIASSA N., KERBACHI R. & JOUMARD R., 2009. « Caractérisation du parc de véhicule algérien et son usage » - *Affiche, Int. symp. Environment and Transport in different contexts. Ghardaïa, Algeria. Actes, ENP ed., Alger, vol. 2, pp 220-231.*
- [41] BOUGHEDAOU M., CHIKHI S., KERBACHI R., ANDRÉ M. & JOUMARD R. (1999): Car fleet characterization and kinematics used in Algeria. 8th Intern. Symp. Transport and air pollution, Graz, Austria, 31 May - 2 June, 1999, poster proceedings, section IX, p. 49-56.
- [42] IEA, Agence Internationale de l'Energie, Oil Market Report, 2007.
- [43] DURIER Y., « Caractéristiques des carburants et combustibles et leurs influence sur le fonctionnement des moteurs », Institut Français du Pétrole, édition TECHNIP, 1971.
- [44] WHITHIER P., « Le pétrole Raffinage et Génie Chimique », Institut Français du Pétrole, tome1,éd., Technip, Paris,1972.
- [45] GUIBET J.C., « Utilisation des produits organiques oxygénés comme carburants et combustibles dans les moteurs, Première partie : Aspects techniques de l'utilisation sur moteur », *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, Vol.36, N°5, Septembre- Octobre 1981
- [46] MOUFFOK A., « l'essence sans plomb et l'environnement, événement sur le marché national », NAFTAL, 1999.
- [47] SONATRACH Activités AVAL (ex-NAFTEC) : « Nouvelles spécifications des produits raffinés, procédés permettant de les atteindre », 2002.
- [48] NORME ALGERIENNE (NA 8108) - Produits pétroliers – Essences normale et super

- [49] NORME ALGERIENNE (NA 11042) - Produits pétroliers – Essences sans plomb 95
- [50] REIJNDERS L., HUIJBREGTS M., Biofuels for Road Transport: A seed wheel to perspective, Edition Springer, 2009, 176 p.
- [51] INSTITUT FRANÇAIS du PETROLE (IFP) PANORAMA 2007 : « Biocarburants. »
- [52] DE MARIGNAN A.L. - IFP, Tout savoir sur les biocarburants - Les perspectives et les recherches conduites à l'IFP, 2005.
- [53] MINISTERE de L'ENERGIE et de MINES Algérien, Potentiel en énergies renouvelables, Site web : http://www.mem-algeria.org/fr/enr/c_pot.htm
- [54] IEA, Agence Internationale de l'énergie, Biofuels for Transport: An International Perspective, 2004.
- [55] DRAPCHO C.M., NHUAN N.P., WALKER T.H, "Biofuels Engineering Process Technology", Edition McGraw Hill, 2008, 385 p.
- [56] POITRAT E., « Biocarburants », techniques de l'ingénieur BE 8 550, (1999).
- [57] SHAINÉ T.K., Biodiesel The Flexible Option. Renewable Biodiesel Fuels: The Flexible Option Conference. Sacramento, Californie. 25 septembre 2001.
- [58] CALLAUD V. – TOTAL, Mission biocarburants, 10 septembre 2007.
- [59] GARN M., "driving the market forward ", Biofuels international, September 2007, Volume 4, p 43.
- [60] DRIES A., projet de fin d'étude à l'USTHB d'Alger, biocarburants et perspective de développement du bioéthanol en Algérie, 2007.

- [61] KAIDI F., TOUZI A., « Production de bioalcool à partir des déchets de dattes », revue des énergies renouvelables du CDER d'Alger, Numéro Spécial « Biomasse », page 78, 2001.
- [62] BOULAL A., BENALI B., MOULAI M. et TOUZI A., Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS, Adrar, Algérie, Septembre 2010.
- [63] DIDDEREN I., DESTAIN J., THONART P., «Les biocarburants de secondes générations. », Les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique, 2008.
- [64] PRAKASH C., Utilisation dans les véhicules à essence de mélanges éthanol-essence contenant plus de 10 pour cent d'éthanol. Direction des systèmes de transport. Direction générale de la prévention de la pollution, ENVIRONNEMENT CANADA, p54, 1998.
- [65] PRICE WATERHOUSE COOPERS, « Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France », Etude Mandaté par l'ADEME, 2002.
- [66] PIMENTEL D., PATZEK T., Alternative Energy, Associated Press , Albany, New York, 2005.
- [67] SMITH C., "Manger ou rouler, il faut choisir !", L'Ecologiste n°18, p. 46
- [68] ASIF F., WEAVER C.S., WALSH M.P., World Bank Reports “ Air pollution from motor vehicles : Standards and Technologies for Controlling Emissions.”, Washington, D.C. ,1996, 226 p.
- [69] JOUMARD R., VIDON R., TASSEL P. (2001) Émissions unitaires de polluants des véhicules utilitaires légers. ADEME. Bron, France: INRETS, Rapport LTE0101, 71 p.
- [70] NOBUTAKA K., HORIBA inc : “On-board Engine Emission Measurement System - The OBS-1000 Series “, Kyoto, Japon, 2000.

Références bibliographiques

- [71] WEAVER C.S., BALAM-ALMANZA M.V., “Development of the ‘RAVEM’ Ride-Along Vehicle Emission Measurement System for Gaseous and Particulate Emissions”, SAE Paper 2001-01-3644.
- [72] DIRECTIVE EUROPEENNE 70/220/CEE du Conseil européen, du 20 mars 1970, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur.
- [73] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Certification Division: Office of Mobile Sources & Office of Air & Radiation, EPA 420-R-93-007, May 1993.
- [74] DECRET EXECUTIF Algérien N° 03-410 du 10 Ramadhan 1424 correspondant au 5 novembre 2003 fixant les seuils limites des émissions des fumées, des gaz toxiques et des bruits par les véhicules automobiles.
- [75] ADEME, information presse, Les normes Euro pour limiter les émissions de polluants des véhicules neufs, 15 mai 2007.
- [76] NAFTAL Aviation et Marine, Site web : <http://www.naftal-avm.dz/>
- [77] GUIBET J.-C., Carburants et moteurs (tome2). Edition Technip, Paris, 1997.
- [78] CHIKHI S., Rapport interne du LSTE et Communication personnelle, ENP, 2009
- [79] YUNG-CHEN Y., JIUN-HORNG T., HUNG-LUNG C., Effects of ethanol-blended gasoline on air pollutant emissions from motorcycle, Science of The Total Environment Volume 407, Issue 19, 15 September 2009, Pages 5257-5262
- [80] IBELAID K., thèse de magister, reformulation de super carburants par ajout de composés oxygènes, PGS Raffinage & Pétrochimie, ENP, mars 2005, Alger.

[81] GRAHAM L. A., BELISLE S.L., BAAS C-L., Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85, *Atmospheric Environment*, Volume 42, Issue 19 , Page(s) 4498-4516, 2010.

[82] POULOPOULOS S.G., SAMARAS D.P., PHILIPPOPOULOS C.J., Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels, *Renewable Energy* , Volume 33, Issue 7, July 2008, Pages 1469-1474

[83] BANG-QUAN H., JIAN-XIN W., JI-MING H., XIAO-GUANG Y., JIAN-HUA X., A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels, *Atmospheric Environment* 37, (2003), 949–957.

[84] XIAOBING P., YUJING M., JUAN Y., HONG H., Carbonyls emission from ethanol-blended gasoline and biodiesel-ethanol-diesel used in engines, *Atmospheric Environment*, Volume 42, Issue 6, February 2008, Pages 1349-1358

Annexe 1 :

Protocoles expérimentaux des analyses sur les mélanges éthanol/essence.

a) Mesure de densité :

- Appareils utilisés
- une éprouvette de 500ml
- un thermodensimètre à essences [700 - 800] g/L (voir figure 84)



Figure 84 : Thermodensimètre au laboratoire NAFTAL-AVM.

- Mode opératoire : Remplir l'éprouvette d'essence et y plonger le thermodensimètre en faisant attention à ce qu'il soit bien au centre de l'éprouvette.

b) Mesure de la tension de vapeur

- Appareillages
- Appareil de mesure de la TVR automatique Petrotest
- Une pompe à vide PHYWE double stage (ultimate vacuum : 1.5×10^{-4} mbar, pumping speed pneurop : $3.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 0.18 kW , 1350 min^{-1})
- Une seringue Hamilton de 0.5ml.
- Un thermomètre.

- Mode opératoire :

On commence d'abord par créer le vide dans l'enceinte de l'appareil à l'aide de la pompe.

La pression maximum tolérée au départ de cet essai est de 0.1 kPa et la température à l'intérieur de l'enceinte est de 37.8°C.

La température de la seringue et de l'essence à l'injection doit être comprise entre 0 et 4°C.

On injecte 3ml d'essence à travers une valve en caoutchouc, et l'appareil indique, une fois l'équilibre atteint, la valeur de la tension de vapeur.

c) Détermination du pouvoir calorifique

- Mode opératoire :

- pipeter 10ml d'aniline et 10 ml d'échantillon dans le tube puis l'équiper de la pompe et du thermomètre.

- Régler la vitesse du moteur de manière à obtenir un courant continu de mélange.

- Régler la tension de la lampe de manière à ce qu'elle fournisse juste assez de lumière pour que son filament soit visible au travers de la couche mince.

- Elever la température du mélange jusqu'à ce que le point d'aniline soit juste dépassé, ce qui est mis en évidence par une augmentation soudaine de la brillance du filament et par la disparition de l'opalescence de la couche mince.

- Régler la température du bain de telle sorte que le mélange se refroidisse.

- Noter comme point d'aniline la température à laquelle une seconde phase se forme, ce qui est mis en évidence par la réapparition de l'opalescence ou l'obscurcissement soudain du filament ou les deux phénomènes en même temps.

d) Détermination de l'indice d'octane « recherche » (NOR) des essences

- Réactifs et produits

- Iso-octane

- n-heptane

- C 80 (mélange à 80% d'iso-octane dans le n-heptane)

Ces réactifs sont utilisés comme bases de mélange pour les carburants d'encadrement.

- Appareillages :

Un moteur CFR est un moteur monocylindrique à quatre temps (admission – compression – explosion – échappement) à taux de compression variable muni de quatre cuves.

- Mode opératoire :

Après la mise en marche du moteur et la vérification de toutes les conditions opératoires (vitesse du moteur, niveau, température et pression d'huile moteur, niveau d'eau, etc.),

On mesure la pression atmosphérique et on note la correction à appliquer pour la lecture digitale du taux de compression.

On remplit une des cuve avec l'échantillon inconnu (la température de l'échantillon étant comprise entre 2 et 10°C) et on cherche sa richesse (cliquetis max) en faisant varier la hauteur de la cuve pour stabiliser l'aiguille de l'indicateur de cliquetis ; une fois cette valeur stabilisé on comprime le cylindre, on fixe le taux de compression et on se reporte au tableau 31, afin d'avoir l'indice d'octane de l'échantillon et ainsi l'encadrer avec deux carburants distants de 2 points d'octane de ce dernier. On relève les indications du « knockmeter » pour l'échantillon et les deux carburants d'encadrement par trois fois afin de définir exactement l'indice d'octane de l'échantillon. Cette détermination se fait par interpolation des moyennes des valeurs indiquées par le « knockmeter ».

Tableau 31 : Nombre d'octane recherché en fonction des valeurs du knockmeter.

Nombre d'octane recherché	Digital counter setting									
	661	663	664	666	667	668	669	670	671	672
85	661	663	664	666	667	668	669	670	671	672
86	673	674	675	677	678	680	681	682	683	684
87	685	687	688	689	691	692	694	695	697	698
88	699	700	701	702	704	705	706	708	709	711
89	712	713	715	716	718	719	721	722	723	725
90	726	728	729	730	732	733	735	736	737	739
91	740	742	743	744	746	747	749	750	752	753
92	756	757	759	760	761	763	765	766	767	768
93	770	772	774	776	778	780	781	783	784	785
94	787	789	791	793	795	797	799	801	802	804
95	805	807	809	811	812	814	816	818	820	822
96	824	826	828	830	832	835	837	839	841	843
97	845	847	849	852	854	856	858	860	862	864
98	867	870	873	875	877	880	883	885	888	891
99	893	895	898	900	903	906	909	912	915	917
100	919	924	925	928	932	936	939	940	944	949

e) Essai de corrosion à la lame de cuivre

Appareillages et produits (voir figure 85)

- une bombe
- lame de cuivre
- un tube à essai et - un bain d'eau pour la bombe
- un thermomètre
- un solvant de nettoyage
- du papier au carbure de silicium et poudre au carbure de silicium
- support de polissage
- coton absorbant
- des lames corrodées de référence
- chronomètre

Mode opératoire :

Sur un support de polissage, on nettoie la lame de cuivre avec de l'iso-octane (produit de nettoyage) à l'aide d'un papier et de carbure de silicium. On rince avec le solvant et on sèche.

On plonge la lame dans un tube à essai rempli d'essence et on introduit le tube dans une bombe. On immerge le tout dans un bain d'eau à 50°C pendant 3 h.

Une fois ce temps écoulé, après avoir retiré et refroidi la bombe, on rince la lame et on l'essuie. Il ne reste plus qu'à comparer la teinte de la lame à la série de lames standard de corrosion ASTM.

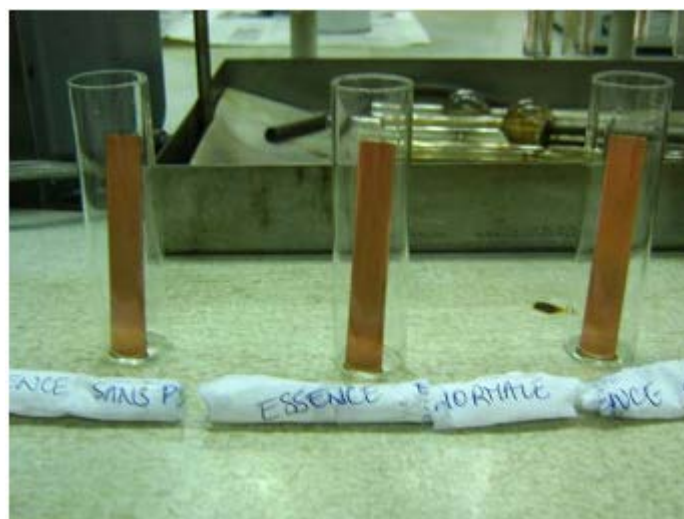
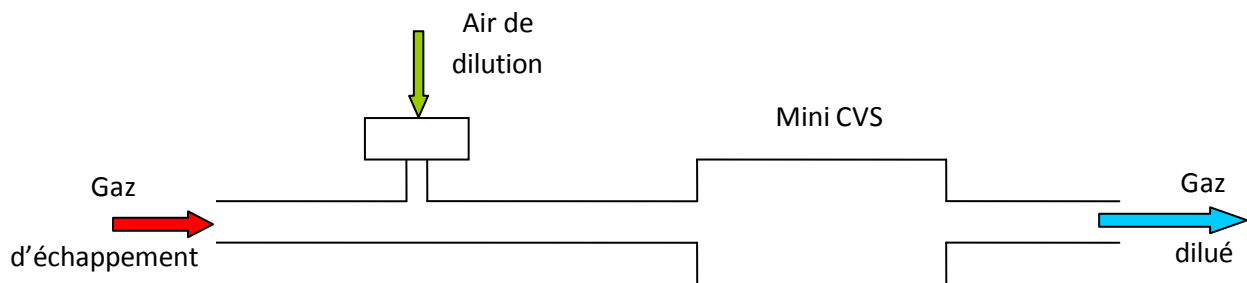


Figure 85 : Lames de cuivres lors des essais de corrosion.

Annexe 2 :

Méthode de calcul de la masse des émissions polluantes.



Nomenclature :

i : gaz polluant i**T** : température**a** : air dilution**P** : pression**e** : échappement ρ_i : masse volumique du polluant i V_i : volume gaz polluant i M_i : masse molaire du polluant i V_e : volume gaz d'échappement V_a : volume air de dilution**V** : volume total de mélange c_i^a : concentration volumique du polluant i dans l'air c_i : concentration volumique du polluant i dans le mélange

Indices :

o : Conditions normales de température et de pression ($T_o=273,15K$ et $P_o=101,3$ kPa)**1** : Conditions de T et P dans gaz d'échappement**2** : Conditions de T et P dans air de dilution**3** : Conditions de T et P dans mélange après prélèvement.

Equations :

Soit :

 m_i^e : masse de polluant i émise par le véhicule à l'échappement m_i^a : masse de polluant i introduite par l'adjonction d'air m_i : masse de polluant i contenue dans le mélange

alors :

$$m_i = m_i^e + m_i^a \quad \text{ou} \quad m_i^e = m_i - m_i^a$$

Par ailleurs on a :

$$m_i^a = \rho_i(T_2, P_2) \cdot V_i(T_2, P_2) = \rho_i(T_2, P_2) \cdot \frac{V_i(T_2, P_2)}{V_a(T_2, P_2)} \cdot V_a(T_2, P_2) = \rho_i(T_2, P_2) \cdot c_i^a \cdot V_a(T_2, P_2)$$

A remarquer que la concentration volumique du polluant i, est indépendante des conditions de température et de pression.

Le gaz polluant i étant très dilué aussi bien dans le mélange que dans l'air de dilution, on peut l'assimiler à un gaz parfait, soit :

$$\rho_i(P, T) = M_i \frac{P}{RT} \quad \text{d'où} \quad \rho_i(P_2, T_2) = \rho_i(P_o, T_o) \frac{T_o}{T_2} \frac{P_2}{P_o} = \rho_i(P_o, T_o) \frac{T_o}{T_2} \quad \text{avec } (P_2 \approx P_o)$$

Finalement on obtient:

$$m_i^a = \rho_i(T_o, P_o) \frac{T_o}{T_2} \cdot c_i^a \cdot V_a(T_2, P_2)$$

De la même manière on trouve pour masse totale contenue dans le mélange:

$$m_i = \rho_i(T_o, P_o) \frac{T_o}{T_3} \cdot c_i \cdot V(T_3, P_3)$$

En considérant que :

$$P_3 \approx P_2 \approx P_o \quad \text{et} \quad T_3 \approx T_2$$

Alors la masse de polluant émise à l'échappement devient :

$$m_i^e = \rho_i(T_o, P_o) \frac{T_o}{T_3} \cdot [c_i \cdot V(T_3) - c_i^a \cdot V_a(T_2)]$$

En posant :

$$K = \rho_i(T_o, P_o) \frac{T_o}{T_3} \quad \text{et sachant que } V_a(T_3) = V_a(T_2) \text{ puisque } T_3 = T_2 \text{ et } P_3 = P_2$$

Il vient que :

$$m_i^e = K \cdot V(T_3) \left[c_i - c_i^a \cdot \frac{V_a(T_3)}{V(T_3)} \right]$$

Le rapport $\frac{V_a}{V}$ (à même T et P) correspond à la relation de dilution entre les gaz d'échappement et l'air ambiant. Cette relation de dilution est déterminée à partir des concentrations de polluants mesurées, par l'intermédiaire d'un facteur de dilution moyen DF :

$$DF = \frac{V(T_3)}{V_e(T_3)} = \frac{13,4}{[c_{CO_2} + (c_{HC} + c_{CO}) \cdot 10^{-4}]}$$

avec : [CO₂] en % ; [HC] et [CO] en ppmv

l'indice *i* représentant les polluants CO₂, CO et HC.

D'où :

$$\frac{V_a(T_3)}{V(T_3)} = \frac{V(T_3) - V_e(T_3)}{V(T_3)} = 1 - \frac{1}{DF}$$

et finalement, la masse de polluant émise par le véhicule au cours d'un essai devient:

$$m_i^e = K \cdot V(T_3) \left[c_i - c_i^a \cdot \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \right]$$

où pratiquement :

- $V(T_3)$ représente le volume total de gaz d'échappement dilué comprenant celui mesuré par le volucompteur au cours de l'essai auquel il faudra ajouter le volume du gaz échantillon analysé (multiplication du débit de l'échantillon par le temps).
- c_i représente la concentration volumique du polluant *i* mesurée par l'analyseur correspondant exprimée en valeur absolue pour tous les polluants, exemple :
 valeur *Y* en % correspond à $Y \times 10^{-2}$
 et valeur *Z* en ppm correspond à $Z \times 10^{-6}$
 à l'exception du calcul du facteur de dilution DF où il faut exprimer les concentration en % pour CO₂ et en ppm pour HC et CO.
- c_i^a représente la concentration du polluant *i* mesurée dans l'air de dilution (air ambiant).
- DF : facteur de dilution calculé à l'aide des concentrations volumiques c_i par la formule ci-dessus.

La quantité de polluant émise ainsi calculée devra être à nouveau multipliée par les 112 tubes de l'embout, soit une masse totale de : $m_{i \text{ (totale)}}^e = 112 * m_i^e$