

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : Génie de l'environnement

Laboratoire des sciences et techniques de l'environnement



Thèse de Doctorat

Option : Génie de l'environnement

Présentée par :

CHIKHI Saâdane

Magister en Génie Chimique à l'USTHB

Intitulée

Emissions unitaires de polluants de véhicules légers en circulation réelle

Soutenue publiquement le 11 juin 2015

devant le jury composé de :

Mme Belhaneche	Naima	Professeur, ENP, Alger	Présidente
M. Kerbachi	Rabah	Professeur, ENP, Alger	Rapporteur
M. Joumard	Robert	Directeur de recherche, IFSTTAR, Lyon	Rapporteur
M. Ali Khodja	Hocine	Professeur, Univ. M. S. Mentouri, Constantine	Examineur
M. Aouabed	Ali	Professeur, Univ. S. Dahlab, Blida	Examineur
M. Moulai-Mostefa	Nadji	Professeur, Univ. Y. Fares, Médéa,	Examineur
M. Benaissa	Mohamed Lazhar	Docteur, ENST, Alger	Invité

ENP 2015

Dédicaces

À la mémoire de mes parents, pour l'éducation qu'ils m'ont donnée

À ma femme, qui m'a poussé sans relâche à terminer ce travail

À mes enfants Mohamed Hichem et Mériem

À toute ma famille

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé conjointement avec le Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, le Département de Génie des Procédés de l'Université de Blida et le Laboratoire Transport - Environnement de l'IFSTTAR (ex INRETS) de Bron (France).

J'adresse tout d'abord mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury de thèse présidé par Mme Pr. Belhaneche N. et composé de Pr. Ali-Khodja H., Pr. Aouabed A., Pr. Moulaï-Mostepha N. et Dr Benaïssa M.L. qui m'ont fait l'honneur d'accepter et de juger ce travail.

Je tiens à adresser toute ma reconnaissance à mon Directeur de thèse M. Rabah Kerbachi pour m'avoir activement et judicieusement conseillé lors de ce travail de recherche. Je tiens à le remercier pour sa bonne humeur et sa simplicité constantes.

J'exprime ma profonde reconnaissance à M. Robert Joumard, mon co-directeur de thèse qui m'a permis de mener ce travail à l'IFSTTAR dans les meilleures conditions. Son expérience et son sens de la communication sont autant de raisons pour lesquelles son encadrement fut extrêmement profitable.

Je tiens particulièrement à remercier mes amis et collègues notamment Ménouër Boughedaoui, Noredine Driassa et Djamel Touil, pour l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté inlassablement pour l'accomplissement de ce travail.

Je remercie également M. Michel André et Robert Vidon en retraite de l'INRETS, pour leurs apports, soutien logistique et scientifique et conseils.

Je ne saurais manifester ma gratitude à mon frère Lazhar, pour m'avoir réparé l'analyseur d'oxydes d'azote, sans lequel ce travail ne serait pas accompli à ce jour.

J'exprime ma reconnaissance envers ceux que je connais personnellement pour m'avoir prêté leurs véhicules pour mes expériences à savoir : Bentayeb Djamilia ; Abdelaziz Boutlelis ; Brahim Guedouar, Abderrahmane Belkacemi ; Boualem Damerdji ; Ahmed Boucherit ; Slim Ouzzane ; Ghoul Ahmed et Noredine de la cafétéria.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude aux personnes que je n'ai pas citées ici et qui m'ont aidé, encouragé, soutenu ou tout simplement supporté tout au long de mon travail de thèse

Saâdane CHIKHI

ملخص

قياس الانبعاث الوجودي للملوثات الهوائية (CO، HC، NO_x وCO₂) أجري على 17 مركبة، خفيفة، نفعية في حركة المرور الحقيقي. هذه العينة ممثلة للمركبات الجزائرية الخفيفة من حيث نوعية الوقود (البنزين، الديزل وغاز البترول المسال) ونوعية التكنولوجيا (نظام الحقن والتحكم في الانبعاثات). التصميم التجريبي المستخدم هو تقنية أخذ الغاز المنبعث بتدفق ثابت. لهذا رُكب جهاز أخذ العينات (المعايرة) (mini-CVS) من الغازات المنبعثة مع أجهزة التحليل على متن مركبة تحت شروط مختلفة حقيقية. تم تحديد متوسط الانبعاث الوجودي للملوثات الهوائية وفقا لمختلف طبقات السرعة المتوسطة للمركبات. تمت مقارنة النتائج مع قاعدة المعطيات الأوروبية للمركبات الخفيفة (Artemis).

وقد بينت مدى تأثير تكنولوجيا حقن غاز البترول المسال على الانبعاث الوجودي للملوثات الهوائية. وبالتالي، قد تبين باستثناء أكسيد النيتروجين أن مركبات غاز البترول المسال الغير المصفحة أكثر فعالية في الحد من الانبعاث الوجودي للملوثات الهوائية مقارنة مع مركبات البنزين الغير المصفحة

وعلاوة على ذلك، المركبات الغير المصفحة تنبعث منها مستويات عالية من CO، THC و NO_x، حتى بالنسبة للمركبات الذين تقل أعمارهم عن سنة واحدة. وتباع هذه المركبات في العديد من البلدان النامية حيث معايير الانبعاثات غائبة تماما أو بدأت للتو مع اليورو 2 و يورو 3 ولكن من الصعب تطبيقها.

وأخيرا، فإن تطبيق معايير انبعاث الملوثات في البلدان النامية من خلال إدخال تقنيات التحكم في التلوث، هو خطوة هامة في الحد من انبعاثات المركبات.

الكلمة المفتاح:

عامل الانبعاث الوجودي، ووقود، ملوثات، النظام المحمول (mini-CVS) المركبات الخفيفة، Artemis، الجزائر.

Abstract

The emission measurement of regulated pollutants emitted by road transportation (CO, THC, NO_x and CO₂) was conducted on 17 personal cars in real traffic. This sample is representative of the Algerian light vehicles in terms of fuel quality (gasoline, diesel and LPG) and technology (injection system and emission control).

Experimental methodology for measuring unit emissions in real traffic conditions is based on the use of an on-board gas sampler called mini-CVS (Constant Volume sampling), with an instrumentation to measure kinematics, gas temperature, pressure, moisture. The samples of the exhaust gas collected in Tedlar bags are analyzed in a laboratory at the end of each test.

The average unit emissions regulated pollutants are determined by different average speed classes for different fuels and vehicle technologies. The results are compared with the Artemis european database of light vehicles.

The tests revealed the effect of the LPG injection technology on unit emissions. Thus, compared with gasoline vehicles uncatalyzed, multipoint sequential injection of LPG vehicle uncatalyzed, has proven to be most effective in the reduction of all pollutants, except for NO_x, thus allowing without catalyst, to be as efficient as catalyzed vehicles Euro 1 and Euro 2 standards.

Moreover, the uncatalyzed gasoline vehicles emit high levels of CO, THC and NO_x, even for vehicles aged less than one year. These vehicles are sold in many developing countries where emission standards are totally absent or are just starting with Euro 2 and Euro 3, but rarely enforced.

Finally, the application of emission standards of pollutants in developing countries, by introducing pollution control technology is an important step in reducing vehicle emissions.

Key words:

Unit emission factor, fuel, pollutants, on board system (mini-CVS), Light Vehicles, Artemis, Algeria.

Résumé :

Des mesures d'émissions unitaires de polluants règlementés (CO, HCT, NO_x et CO₂) en circulation réelle ont été effectuées sur 17 véhicules légers appartenant à des particuliers. Cet échantillon est représentatif du parc algérien de véhicules légers en termes de types de carburation (essence, diesel et GPL) et de technologie (type d'injection et système de dépollution).

La méthodologie expérimentale de mesure des émissions unitaires en conditions réelles de circulation est basée sur l'utilisation d'un échantillonneur de gaz appelé mini-CVS (Constant Volume sampling) embarqué à bord d'un véhicule. Une instrumentation annexe est mise en place pour les mesures de cinématique, température et humidité. Les échantillons de gaz d'échappement récoltés dans des sacs Tedlar sont analysés en laboratoire à la fin de chaque essai.

Les émissions unitaires moyennes des polluants règlementés sont déterminées en fonction des différentes classes de vitesse moyenne pour différents carburants et technologies des véhicules. Les résultats sont comparés avec la base de données européenne Artemis des véhicules légers.

Les tests effectués ont révélé l'effet de la technologie d'injection GPL sur les émissions unitaires. Ainsi, en comparaison avec les véhicules à essence non catalysés, l'injection séquentielle multipoint des véhicules GPL non catalysés s'est révélée être la plus efficace dans la réduction de l'ensemble des polluants, à l'exception des NO_x, permettant ainsi sans catalyseur de rivaliser avec ceux catalysés de la norme Euro 1 et Euro 2.

Par ailleurs, les véhicules à essence non catalysés émettent des niveaux élevés de CO, HCT et NO_x, même pour les véhicules âgés de moins d'un an. Ces véhicules restent vendus dans de nombreux pays en développement où les normes d'émission sont totalement absentes ou commencent tout juste avec les normes Euro 2 et Euro 3, à peine mises en œuvre ou appliquées.

Enfin, l'application des normes d'émission de polluants dans les pays en développement par l'introduction de technologies de dépollution est une étape importante dans la réduction des émissions polluantes des véhicules.

Mots clés :

Facteur d'émission unitaire, carburant, polluants, système embarqué (mini-CVS), véhicules légers, Artemis, Algérie.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Marché du GPL de quelques pays en 2010 (WLPGA, 2012).....	30
Tableau I.2 : Comparaison de quelques caractéristiques du GPL.....	32
Tableau I.3 : Caractéristiques physico-chimiques des carburants	32
Tableau II.1 : Limites d'émissions de l'UE pour les véhicules particuliers	45
Tableau III.1 : Caractéristiques et classification de l'échantillon de véhicules testés.....	54
Tableau III.2 : Base de données véhicules par norme standard d'émission	54
Tableau III.3 : Résultats des artères les plus fréquentées de la commune de Blida.....	59
Tableau III.4: Concentrations et pureté des gaz d'étalonnage	66
Tableau III. 5 : Répartition des essais effectués sur l'échantillon de véhicules	75
Tableau IV.1 : Paramètres cinématiques des circuits de test effectués.....	81
Tableau IV.2 : Facteurs d'émissions moyens des véhicules	97
Tableau IV.3 : Caractéristiques cinématiques des fluctuations de la vitesse de consigne.....	98
Tableau IV.4 : Indicateurs de maintenance de l'échantillon de véhicules.....	105
Tableau IV.5 : Surémission des polluants CO et HCT du véhicule Chevrolet Cruze catalysé par rapport aux véhicules Toyota Yaris non catalysé et Renault Symbol catalysé.....	106

Liste des figures

Figure I.1 : Evolution des concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre au cours des deux millénaires passés (IHEST 2012).....	9
Figure I.2 : Emissions mondiales de CO ₂ issues de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) et de production de ciment (Friedlingstein, Andrew et al. 2014)	10
Figure I.3 : Consommation mondiale d'énergie en 2012 par secteur d'activité.....	10
Figure I.4 : Évolution des émissions mondiales de CO ₂ par mode de transport.....	11
Figure I.5 : Ventes mondiales d'automobiles et indicateur avancé (Gomez 2015).	14
Figure I.6 : Perspectives des ventes internationales automobiles (Gomez 2015).....	15
Figure I.7 : Parc automobile des principaux pays équipés (Freysenet 2013).....	15
Figure I.8 : Parc automobile des principaux pays d'Afrique (Freysenet 2013).....	16
Figure I.9 : Taux de motorisation dans les pays développés et émergents en 2012.	16
Figure I.10 : Répartition du parc de véhicules GPL dans le monde (WLPGA 2012).....	17
Figure I.11 : Evolution des nouvelles immatriculations des véhicules de tourisme	
en Algérie pour la période 1982 à 2012 (Sources ONS).....	18
Figure I.12 : Evolution du parc de véhicules légers par type de carburant.....	20
Figure I.13 : Système de conversion GPL de 1 ^{ère} génération contrôlé mécaniquement	21
Figure I.14 : Système de conversion GPL de 3 ^{ème} génération à injection séquentielle.	23
Figure I.15 : Répartition par secteur de la consommation finale d'énergie	
en Algérie pour l'année 2010 (Medener 2014).....	26
Figure I.16 : Evolution de la consommation des différents carburants routiers en Algérie	27
Figure I.17 : Ventes de GPLc et leurs équivalents essences économisés en tonnes	29
Figure I.18 : Coûts de fonctionnement d'un VP en fonction de la distance parcourue.....	30
Figure II.1 : Schéma du dispositif d'échantillonnage à volume constant (CVS).....	35
Figure II.2 : Cycle de conduite américain FTP 75	36
Figure II.3: Exemple de cycle de test WLTC de classe 2 (ICTT 2013)	37
Figure II.4: Schéma montrant un système de mesure par télé-détection en opération.....	39
Figure II.5: Ancien PEMS embarqué à bord d'un véhicule léger (Lenaers, 1997)	40
Figure II.6: Modèles récents de PEMS	41
Figure II.7 : Comparaison des émissions du cycle NEDC et sur route.....	
pour différentes normes de véhicules (Weiss et al., 2012)	43
Figure II.8 : Comparaison des normes d'émission des voitures particulières	
dans l'Union Européenne, les Etats Unis et le Japon (Selles 2005)	45
Figure II.9: Principales étapes de construction de cycles de conduite (André 2004).	47
Figure II.10: Structure typique de conditions de circulation réelles observées	
dans les 3 cycles Artemis urbain, rural et autoroutier (André 2004)	48
Figure II.11: Variation des émissions de NO _x selon la norme Euro	
pour les véhicules essence de la base Artemis (Joumard, André et al. 2007).....	49
Figure II.12: Variabilité des cycles de conduite répartis en 15 typologies de circulation (a) et variations correspondantes des émissions de NO _x des véhicules Essence (Euro 0) (b)	50
Figure III.1 : Circuit des mesures cinématiques en pente sur la route de Chréa (Blida)	55

Figure III.2 : Principe de mesure de la vitesse par effet Doppler (Boughedaoui 2007)	56
Figure III.3: Cinémomètre à effet Doppler Type DRS-6/1aa BS2 Multidata.....	57
Figure III.4 :Interface PC Logwin.....	57
Figure III.5 : Bluetooth GPS RBT-2300.....	57
Figure III.6 : Ensemble des trajets de 75 véhicules suivis dans la commune de Blida.....	59
Figure III.7: Les 3 circuits urbains adoptés pour la mesure sur route (2,7 ; 3,1 et 2,4 km).....	60
Figure III.8: Les 2 circuits suburbains adoptés pour la mesure sur route (4.2 km)	61
Figure III.9: Les 2 circuits autoroutiers adoptés pour la mesure sur route (7.9 et 11 km).....	61
Figure III.10 : Schéma du montage expérimental de prélèvement embarqué sur véhicule	63
Figure III.11 : Etat de la stabilité du débit total du mini-CVS en fonction du temps	64
Figure III.12: Schéma du circuit des gaz prélevés par mini CVS.....	67
Figure III.13 : Photos de véhicules équipés et laboratoire d'analyse pour la campagne de mesure des émissions	74
Figure IV.1 : Mesure des vitesses et altitude par GPS et cinémomètre	80
Figure IV.2 : Répartition des vitesses moyennes enregistrées entre les trois types de voies de circulation pour les essais chronologiques effectués.	81
Figure IV.3 : Histogramme d'identification des classes de vitesses à partir de la courbe de fréquence cumulée des vitesses moyennes enregistrées.....	82
Figure IV.4 : Résultats d'émission des tests de ralenti à chaud des véhicules essence, Diesel et GPL. .	85
Figure IV.5 : Emissions de CO (a), HCT (b), NOx (c) et CO ₂ (d) des véhicules essence et GPL non catalysés, avec courbes de régression.....	90
Figure IV.6 : Emissions unitaires des véhicules catalysés, avec courbes de régression.....	92
Figure IV.7 : Comparaison avec le modèle Artemis des émissions de CO (a), des émissions de HCT des véhicules catalysés (b) et GPL (c) et émissions de NOx (d) pour l'ensemble des carburants et technologies.....	94
Figure IV.8 : Emissions de CO ₂ des différentes catégories de véhicules	96
Figure IV.9 : Exemple de fluctuations des vitesses lors des prélèvements d'échantillons du véhicule Optra à vitesses stabilisées.....	98
Figure IV.10: Comparaison des émissions réalisées en circulation réelle et à vitesses stabilisées pour le véhicule Optra non catalysé	100
Figure IV.11: Comparaison des émissions réalisées en circulation réelle et à vitesses stabilisées pour le véhicule Symbol catalysé.....	101
Figure IV.12 : Emissions de CO ₂ de la série de véhicules AVEO à essence.....	103

Liste des sigles et abréviations

AIE :	Agence Internationale de l'Énergie
ARTEMIS :	Assessment & Reliability of Transport Emission Modelling and Inventory Systems
Cal ULEV:	California Ultra Low Emission vehicle
COPERT :	Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport
CORINAIR :	CORe INventory of AIR emissions
COV:	Composés Organiques Volatils
CVS :	Constant Volume Sampling
ECU :	Electronic Control Unit
EMFAC :	EMission FACtors
ENACTA :	Entreprise nationale de Contrôle Technique Vehicules
ENST :	Ecole Nationale Supérieure de Technologie
FE :	Facteur d'Emission
FID :	Flame Ionization Detector
FOREMOVE :	Model developed for Forecasts of Motor Vehicle Emissions
FTP:	Federal Test Procedure cycle
GES :	Gas à Effet de Serre
GIEC :	Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat
GPL :	Gaz de Pétrole Liquifié
GPLc :	Gaz de Pétrole Liquifié carburant
GNC :	Gaz Naturel Comprimé
HBEFA :	Handbook of Emission Factors
INRETS :	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, France
INSP :	Institut National de Santé Public
IPCC :	Intergovernmental Panel of Climate Change
ICTT:	The International Council on Clean Transportation
IFSTTAR :	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
JORADP :	Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire
Mini-CVS :	Mini Constant Volume Sampler
MOBILE :	Mobile Source Emission Factor Model
MOVES :	Motor Vehicle Emission Simulator
Naftal :	Société nationale de commercialisation de carburant
NEDC :	New European Driving Cycle
ONS :	Office National de Statistiques
OMM :	Organisation Mondiale de la Météorologie
PHEM :	Passenger car and Heavy-duty Emission Model
PIB :	Produit Intérieur Brut
PTE :	Plomb Tetra Ethyl
SFTP:	Special Federal Test Procedure cycle
SCR:	Selective catalytic reduction
TC :	Transport en Commun
TRL :	Transport Research Laboratory
UE :	Union Européenne
TVC :	Société de Transport de Voyageurs du Centre
TWC :	Three Way Catalyst
VP :	Véhicule Particulier
VUL :	Véhicule Utilitaire Léger
WLTP :	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

SOMMAIRE

Dédicaces	i
Remerciements	ii
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>Résumé</i> :	<i>iv</i>
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des sigles et abréviations	viii
SOMMAIRE	1
Introduction générale	4
Chapitre I : Pollution de l'air par les véhicules	7
<i>I.1. Les émissions de polluants et leurs impacts sur la pollution de l'air</i>	<i>7</i>
I.1.1. Définition de la pollution atmosphérique.....	7
I.1.1.1. La pollution locale	7
I.1.1.2. La pollution régionale.....	7
I.1.1.3. La pollution globale.....	7
I.1.2. Sources d'émission des polluants atmosphériques.....	8
I.1.2.1. Les sources naturelles	8
I.1.2.2. Les sources anthropiques	8
I.1.3. Etat de la pollution de l'air en Algérie	11
<i>I.2. Parc automobile et motorisation</i>	<i>13</i>
I.2.1. Dans le monde.....	14
I.2.1.1. Parc de véhicules	14
I.2.1.2. Motorisation.....	16
I.2.1.3. Parc de véhicules GPL.....	17
I.2.2. Parc automobile algérien.....	17
I.2.2.1. Analyse socio-économique	17
I.2.2.2. Répartition du parc de véhicules par type de carburant	19
I.2.3. Technologies de conversion des véhicules au GPL	20
I.2.3.1. Systèmes de 1 ^{ère} génération	20
I.2.3.2. Systèmes de 2 ^{ème} génération	21
I.2.3.3. Systèmes de 3 ^{ème} génération	22
I.2.3.4. Systèmes de 4 ^{ème} génération	24
I.2.3.5. Systèmes de 5 ^{ème} génération	25
<i>I.3. Consommation de carburants en Algérie</i>	<i>26</i>
I.3.1. Problématique	26
I.3.2. Marché du GPL carburant.....	28
I.3.3. Caractéristiques des carburants consommés en Algérie.....	31
<i>I.4. Conclusion</i>	<i>33</i>

Chapitre II : Emissions unitaires de polluants	34
<i>II.1. Techniques de mesure</i>	34
II.1.1. Mesures en conditions contrôlées	35
II.1.1.1. Banc d'essais dynamométrique	35
II.1.1.2. Cycle de conduite	36
II.1.2. Mesures en circulation réelle	38
II.1.2.1. Mesures par télédétection	38
II.1.2.2. Mesures des émissions en embarqué	39
<i>II.2. Emissions unitaires</i>	43
II.2.1. Problématique des normes d'émissions en Algérie	44
II.2.2. Normes d'émission	44
II.2.2.1. Normes d'émission en vigueur	44
II.2.2.2. Evolution des normes d'émissions européennes	45
II.2.3. Emissions réelles de véhicules en circulation	46
II.2.3.1. Base de données ARTEMIS	46
II.2.3.2. Cycles de conduite ARTEMIS	46
II.2.3.3. Facteurs d'émission de polluants d'ARTEMIS	48
II.2.3.4. Entretien maintenance des véhicules	50
<i>II.3. Conclusion</i>	52
Chapitre III : Méthodologie expérimentale	53
<i>III.1. Echantillon de véhicules testés</i>	53
<i>III.2. Mesures de cinématique.....</i>	55
III.2.1. Mesures par cinémomètre.....	56
III.2.2. Mesures par GPS.....	57
<i>III.3. Choix des circuits de mesure</i>	58
<i>III.4. Dispositif de prélèvement des échantillons.....</i>	61
III.4.1. Principe de fonctionnement du mini-CVS.....	62
III.4.2. Alimentation électrique	64
<i>III.5. Analyse des polluants.....</i>	64
III.5.1 Analyse des oxydes de carbone	64
III.5.2 Analyse des oxydes d'azote.....	65
III.5.3 Analyse des hydrocarbures.....	66
III.5.4. Etalonnage des appareils	66
<i>III.6. Méthode de calcul des émissions</i>	67
<i>III.7. Campagne de mesures</i>	70
III.7.1. Répartition des essais	71
III.7.2. Mesure des émissions	72
III.7.2.1. Mesures au ralenti	72
III.7.2.2. Mesure en circulation sur route.....	73
III.7.2.3. Mesures à vitesse stabilisée.....	73
<i>III.8. Traitement des données</i>	76
III.8.1. Calcul du facteur d'émission moyen par classe de vitesse	76
III.8.2. Calcul des fonctions d'émission des véhicules de la base Artemis	77
III.8.3. Calcul du facteur d'émission moyen par catégorie de véhicule.....	77
Chapitre IV – Emissions unitaires de polluants issus du trafic routier léger	79

<i>IV.1 Cinématiques observées</i>	79
IV.1.1. Validation des mesures cinématiques par GPS	80
IV.1.2. Caractérisation de la cinématique des circuits.....	80
IV.1.3. Classes de vitesses.....	81
IV.1.4. Conclusion.....	82
<i>IV.2– Emissions unitaires des véhicules testés</i>	83
IV.2.1. Emissions au ralenti	83
IV.2.1.1. Ralenti à chaud.....	83
IV.2.1.2. Excès d'émission des HCT.....	86
IV.2.1.3. Conclusion	87
IV.2.2. Résultats des mesures d'émission en circulation réelle.....	87
IV.2.2.1. Véhicules non catalysés	87
IV.2.2.2. Véhicules catalysés	88
IV.2.3. Résultats et discussions des émissions moyennées par classe de vitesse	91
IV.2.3.1. Emissions des véhicules essence et Diesel.....	91
IV.2.3.2. Emissions des véhicules GPL	93
IV.2.3.3. Comparaison des émissions par catégorie de véhicules.....	96
IV.2.4. Emissions à vitesse stabilisée.....	97
IV.2.5. Normes d'émission	102
IV.2.6. Maintenance véhicules	104
IV.2.7. Conclusion.....	106
Conclusion générale	108
Bibliographie	111
Annexes	118

Introduction générale

De nos jours, nous vivons une nouvelle ère baptisée par les scientifiques "Anthropocène". Ce terme a été formulé pour la première fois en 2000 par le Prix Nobel de Chimie Paul Crutzen¹, désignant une nouvelle ère géologique où l'influence des activités humaines ou anthropiques sur le système terrestre est prédominante.

En réalité l'équilibre de l'écosphère terrestre a commencé à être bousculé depuis les années 1850 au début de la révolution industrielle. C'est la combustion du charbon qui constituait à cette époque la principale source anthropique de gaz à effet de serre, ensuite vinrent le pétrole et le gaz. Ainsi, depuis cette date à ce jour, la concentration atmosphérique globale en CO₂ à pratiquement doublé passant de 227 ppm en 1750 au record de 400 ppm en 2014. Concrètement, selon l'étude de Friedlingstein (Friedlingstein, Andrew et al. 2014), les projections pour l'année 2014 des émissions mondiales de dioxyde de carbone, en hausse de 2,5% par rapport à 2013, devraient atteindre un niveau record à 40 milliards de tonnes. Les émissions cumulées de CO₂ dans l'atmosphère atteindront alors, un niveau record de 2000 milliards de tonnes, record jamais atteint depuis 1870. La part des transports tous modes confondus dans l'effet de serre ne cesse de croître pour atteindre les 23% dont 40% sont attribués aux transports automobiles.

La pollution atmosphérique, qui est essentiellement liée à la dynamique des transports routiers au regard de la forte croissance des parcs automobiles dans les pays en développement, est devenue un problème important de santé publique dans la plupart des villes du monde de ces pays. Les niveaux de pollution dans des mégapoles comme Bangkok, Le Caire, Delhi, Mexico et Pékin depuis ces dernières années sont supérieurs à ceux de n'importe quelle ville dans les pays industrialisés.

Selon l'Institut national de santé publique (INSP), la plupart des maladies respiratoires peuvent être induites ou modulées par la pollution atmosphérique. Les projections sur la situation épidémiologique en Algérie en 2010 prévoient que chaque année 10 à 12 millions d'Algériens auront à consulter pour des maladies respiratoires liées à la pollution atmosphérique. En 2010, on dénombre 300 000 Algériens atteints de pneumonie, 700 000 asthmatiques, 250 000 bronchites chroniques, et 3600 atteints de cancer bronchique primitif

¹- Paul Crutzen de l'Institut Allemand Max-Planck de Chimie : Prix Nobel de chimie de 1995, obtenu avec Mario J. Molina et Frank Sherwood Rowland, pour leurs travaux sur la chimie de l'atmosphère, particulièrement en ce qui concerne la formation et la décomposition de l'ozone stratosphérique.

(Maatoug, Ait Hammou et al. 2011). La pollution liée au trafic automobile est le principal facteur de la pollution urbaine et affecte la plupart des grandes agglomérations (Alger, Oran, Constantine et Annaba), qui constituent des zones à risque, indique-t-on de même source. Le secteur des transports occupe en Algérie le 1^{er} rang en termes d'émissions des polluants atmosphériques avec 51%, suivi de l'industrie avec 47%. Selon l'INSP, l'effet de la pollution de l'air sur la santé publique est de loin le plus important par rapport aux effets des autres milieux en termes de dépense dans notre pays, soit 0,94% du PIB (Maatoug, Ait Hammou et al. 2011).

Par ailleurs, dans le cadre de l'indissociable triptyque "parc de véhicules - consommation de carburant - pollution de l'air", on relèvera d'après les données récupérées auprès de NAFTAL, que la consommation nationale des carburants routiers en 2012, qui dépasse les 10 millions de tonnes par an, représente 15% de la totalité des revenus d'exportation (de l'ordre de 6 à 7 milliards de dollars US) des hydrocarbures liquides ou gazeux de l'Algérie. Les carburants routiers distribués sur le marché national comprennent par ordre de consommation : le gazole à hauteur de 75%, ensuite les 3 types d'essence (essence normale, essence super et essence sans plomb) pour environ 23% et le GPL dit "Sirghas" pour seulement 3% soit 300 000 tonnes. En terme relatif et compte tenu de la forte croissance du parc de véhicules ces dernières années, la part du GPL régresse, malgré tous ses avantages techniques et économiques que nous développerons plus loin et ce aussi, malgré la très grande disponibilité de ce produit par rapport aux autres carburants.

Les études d'émissions unitaires de véhicules réalisées en Algérie se limitent aux travaux de Boughedaoui (Boughedaoui et al., 2008) sur des polluants règlementés émis par des véhicules utilitaires légers en circulation réelle avec un système de mesure embarqué. Le présent travail vise à évaluer les émissions de véhicules légers en circulation réelle en Algérie roulant avec les trois carburants, essence, gazole et GPL, et à les comparer avec la base de données des véhicules d'Artemis. Ainsi, ce travail est consacré à la détermination expérimentale de facteurs d'émission unitaires de polluants de véhicules légers propres au contexte de l'Algérie en terme de parc de véhicules et de typologies de circulation, à partir de mesures en circulation. Les résultats obtenus serviront à l'élaboration de l'inventaire global des émissions de polluants issus du trafic routier à l'échelle nationale.

Ce document passera en revue au chapitre I des généralités sur la pollution atmosphérique. Nous présentons au chapitre II une revue bibliographique sur les études et méthodologies de détermination des facteurs d'émissions unitaires, principalement des études d'émissions faites

en circulation réelle. Une attention particulière sera consacrée aux véhicules roulant au GPL carburant. Dans le chapitre III, on abordera les méthodologies suivies pour la détermination des facteurs d'émission unitaires, qu'il s'agira de déterminer sur un échantillon de véhicules roulants avec les 3 carburants (essence, diesel et GPL) durant la campagne de mesure. Enfin on terminera par une exploitation et une discussion des résultats de mesure obtenus au chapitre IV.

Chapitre I : Pollution de l'air par les véhicules

I.1. Les émissions de polluants et leurs impacts sur la pollution de l'air

I.1.1. Définition de la pollution atmosphérique

L'OMS définit la pollution de l'air comme étant la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère (WHO 2015). Les conséquences d'une telle pollution ont un impact préjudiciable sur la santé humaine, les ressources biologiques et les écosystèmes et à plus grande échelle une l'influence sur les changements climatiques.

Les effets de la pollution atmosphérique interviennent spatialement à trois niveaux : local, régional et planétaire :

I.1.1.1. La pollution locale

Elle provient de sources de proximité comme les installations industrielles ou les véhicules dans les milieux urbanisés. Elle concerne essentiellement les polluants dits "primaires" comprenant l'oxyde de carbone, les oxydes d'azote, les poussières et les hydrocarbures. Cette pollution est distribuée très irrégulièrement variant ainsi d'une rue à l'autre, selon la topographie et des conditions météorologiques locales en particulier du vent.

I.1.1.2. La pollution régionale

Cette pollution qui peut s'étendre à une région d'une centaine de kilomètres, résulte non seulement des émissions de polluants primaires, mais aussi de phénomènes physico-chimiques plus ou moins complexes à l'origine de la formation dans l'atmosphère de polluants dits "secondaires" à partir des polluants primaires et notamment de l'ozone troposphérique par réaction photochimique.

I.1.1.3. La pollution globale

Elle peut être continentale ou planétaire. Les polluants responsables de la pollution à très grande échelle diffèrent de ceux cités précédemment. Ce sont notamment le CO₂ responsable à plus de 90% de l'effet de serre, et des composés chlorés tels que les chlorofluorocarbones (CFC) qui dégradent la couche d'ozone stratosphérique.

I.1.2. Sources d'émission des polluants atmosphériques

I.1.2.1. Les sources naturelles

Les principales sources naturelles de pollution proviennent de :

- l'activité volcanique : les émissions de CO₂ des volcans sont estimées à environ 300 Mt/an (Labalette and Trouvilliez 2008) loin derrière les émissions entropiques de CO₂ de 40 Gt/an (Friedlingstein, Andrew et al. 2014). Les émissions volcaniques de soufre (H₂S, SO₂) sont de l'ordre de 50 Mt de SO₂/an (Le Guern 1982). Les aérosols volcaniques, dont les gouttelettes mesurent typiquement entre 0,3 et 0,5 µm, se forment généralement par réaction du SO₂ avec l'eau contenue dans l'atmosphère.
- la foudre : qui représente la principale source d'émission d'oxydes d'azote dans la partie supérieure de la troposphère. Dans une dépêche de la NASA (NASA 2009), les estimations récentes d'émission de NO_x par la foudre restent imprécises avec un facteur 4 (entre 10 et 40%) de la production mondiale tous secteurs confondus.
- l'érosion éolienne : où annuellement, 400 millions de tonnes de poussières et d'aérosols sont émis dans l'atmosphère. A cela s'ajoutent environ un milliard de tonnes de particules minérales transportées dans l'atmosphère à partir des zones arides et semi-arides du globe, principalement le Sahara (Guerzoni and Molinaroli 1998).
- Enfin, on citera aussi les incendies de forêt et feux de brousse qui peuvent être à l'origine d'émissions atmosphériques de polluants.

I.1.2.2. Les sources anthropiques

On appelle émissions atmosphériques anthropiques les émissions d'origine humaine. La majorité des activités humaines est à l'origine d'émissions directe ou indirecte de polluants.

On peut dire que la pollution anthropique a toujours existé depuis la préhistoire ou l'antiquité, où la pollution était encore faible et était principalement due au défrichement et à la destruction progressive de la végétation. Par la suite, avec l'apparition des villes, la pollution provenant du chauffage au bois a commencé par libérer des quantités de plus en plus importantes de CO₂. Cette pollution a commencé à prendre le pas sur la pollution naturelle avec l'avènement de la révolution industrielle avec l'apparition des machines qui utilisent de nouvelles sources d'énergie, comme le charbon, le pétrole et le gaz qui polluent encore plus et en plus grandes quantités.

Ainsi depuis le début de l'ère industrielle en 1850, la composition chimique de l'atmosphère a subi une évolution brutale (Figure I.1). La teneur en dioxyde de carbone, principal gaz à effet de serre, avait oscillé entre 180 ppm et 280 ppm au cours des 650 à 800 000 dernières années selon les mesures effectuées à partir des carottes de glace (Lüthi, Le Floch et al. 2008), puis a rapidement augmenté pour atteindre pour la première fois les 400 ppm en 2014 dans l'hémisphère Nord. Ce chiffre a été obtenu grâce au réseau VAG (Veille de l'Atmosphère Globale) de mesure planétaire composé de 130 stations dispersés dans le monde dans des endroits où l'activité humaine est pratiquement absente (WMO 2014). A ce rythme d'accroissement actuel, la teneur annuelle moyenne de l'atmosphère en CO₂ à l'échelle du globe devrait dépasser le seuil symbolique de 400 ppm en 2015 ou 2016.

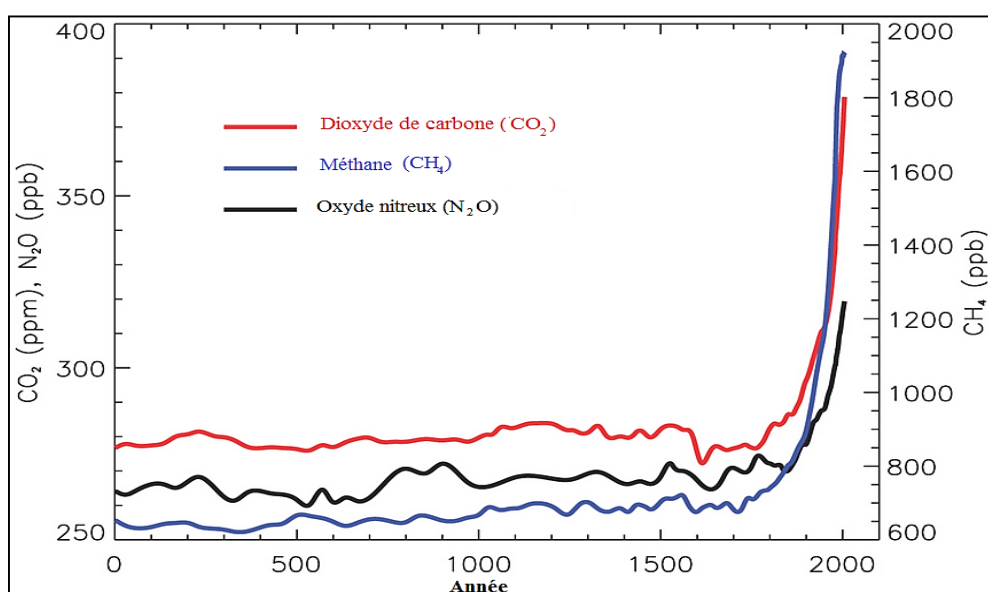


Figure I.1 : Evolution des concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre au cours des deux millénaires passés (IHEST 2012).

Ce seuil symbolique atteint en 2014 confirme une fois de plus, à l'instar des conclusions du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dans son cinquième rapport d'évaluation, que l'exploitation effrénée de combustibles fossiles et d'autres facteurs anthropiques sont responsables de l'augmentation continue des concentrations de gaz à effet de serre qui réchauffent notre planète (IPCC 2014).

Les projections pour l'année 2014 des émissions mondiales de dioxyde de carbone, en hausse de 2,5% par rapport à 2013 (Figure I.2), devraient atteindre un niveau record à 40 milliards de tonnes, avec des émissions records cumulées de CO₂ dans l'atmosphère de 2000 milliards de tonnes.

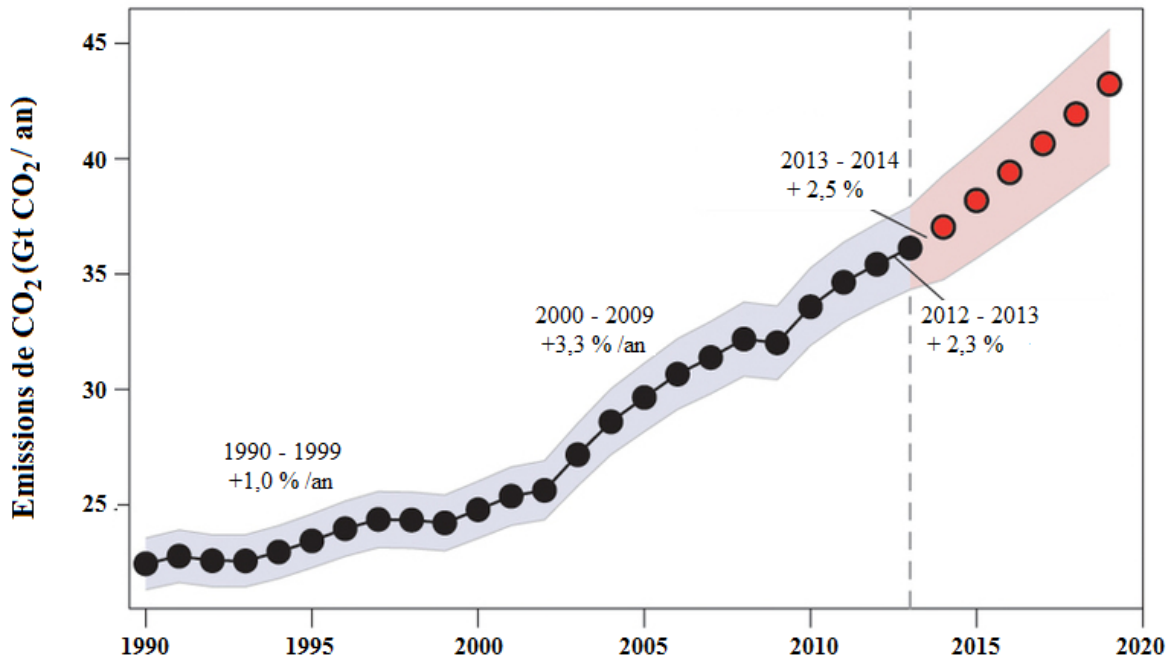


Figure I.2 : Emissions mondiales de CO₂ issues de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) et de production de ciment (Friedlingstein, Andrew et al. 2014)

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) fournit pour l'année 2012, les estimations des différents secteurs d'activité à l'échelle mondiale responsables des émissions de polluants atmosphériques, où l'on peut constater la part prépondérante des transports dans la consommation de produits pétroliers avec comme conséquence une part importante dans les émissions de polluants (Figure I.3).

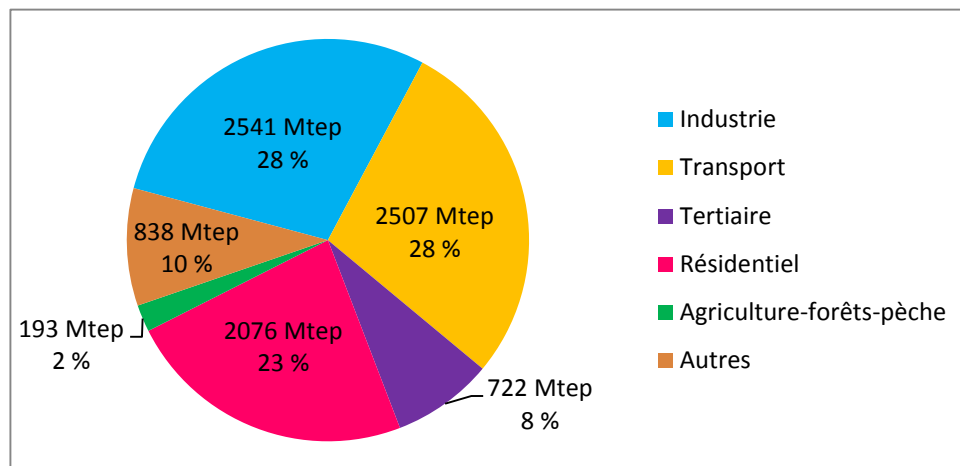


Figure I.3 : Consommation mondiale d'énergie en 2012 par secteur d'activité (IEA 2012 a)

La part des transports motorisés, tous modes confondus dans l'effet de serre ne cesse de croître pour atteindre les 23% dont 40% sont attribués aux transports automobiles. Dans la figure I.4, les émissions mondiales de CO₂ sont ventilées par mode de transport selon le scénario de

référence, basé sur l'hypothèse d'une faible croissance du trafic automobile dans la zone OCDE. Ce graphique montre que les émissions des véhicules légers restent prédominantes, mais que les taux de croissance sont tout aussi élevés dans le transport routier de marchandises et le transport aérien. Ainsi à ce rythme de croissance, en 2050, les émissions dues à l'usage de la voiture dépasseraient de 60% environ leur niveau de 2010.

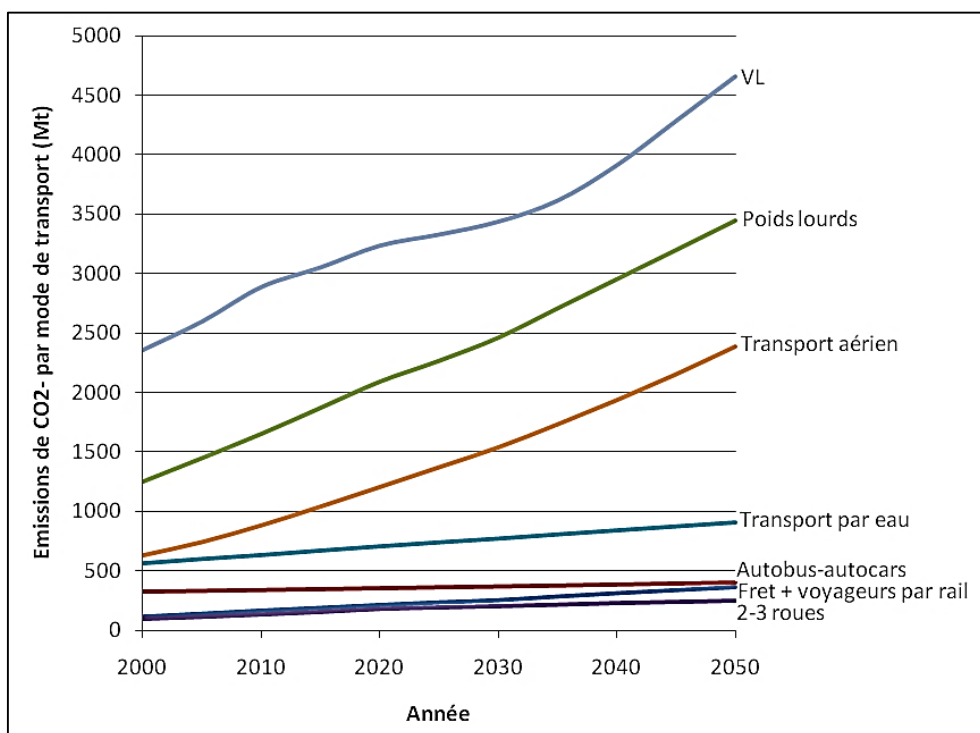


Figure I.4 : Évolution des émissions mondiales de CO₂ par mode de transport (OCDE 2010)

I.1.3. Etat de la pollution de l'air en Algérie

L'Organisation Mondiale de la Santé a publié pour l'année 2014 un rapport alarmant sur les risques de mortalité prématurée, où près de 7 millions de personnes sont décédées prématurément dans le monde en 2012 du fait de l'exposition à la pollution de l'air. Ces chiffres représentent plus du double des estimations précédentes et confirment que la pollution de l'air est désormais le principal risque environnemental pour la santé dans le monde (WHO 2014)

Dans ce même contexte, l'équipe de J. Lelieveld (Lelieveld, Barlas et al. 2013) a développé un modèle permettant de suivre la distribution mondiale et la croissance de la mortalité prématurée liée à la pollution de l'air. L'étude est basée sur le taux de mortalité prématurée des trois décennies précédant l'année 2005, et considère la pollution de l'air causée par l'ozone et les PM-2,5. Elle estime que 69% de la population mondiale sont exposées à la concentration

moyenne annuelle en PM-2,5 d'origine anthropique supérieure à la valeur limite de l'OMS de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air respiré.

Ainsi, notre pays et particulièrement nos villes subissent une pollution visible et de plus en plus grande. Les véhicules rejettent leur gaz de combustion en l'absence de réglementation, rendant l'atmosphère des villes polluée (fumée noire, imbrûlés, particules en suspension, etc...). Un autre problème est l'utilisation à ce jour de l'essence plombée. Ce carburant prohibé ailleurs reste le plus utilisé par les véhicules à essence en Algérie. Faute de satisfaire la demande en essence sans plomb, les véhicules censés rouler à l'essence sans plomb et donc disposant d'un pot catalytique, s'approvisionnent volontairement ou par ignorance en essence plombée, tout en sachant que pour les conducteurs avertis, l'additif de l'essence plombée (tétraéthyl de plomb) est un poison pour le catalyseur. La fonction de dépollution de ce dernier devenue caduque par l'utilisation de l'essence plombée rendra le véhicule beaucoup plus polluant qu'un véhicule non équipé d'un pot catalytique, comme cela s'est vérifié sur un véhicule testé dans cette présente étude expérimentale.

Des études épisodiques (d'inventaire, d'épidémiologie, etc...) dont on va rendre compte ci-dessous ont été menées dans quelques villes d'Algérie pour diagnostiquer cette pollution, mettant en évidence des taux de polluants dégagés par la circulation automobile largement au-dessus des seuils fixés par l'OMS.

Une étude de santé public menée sur une période d'une année (septembre à octobre 2002) par l'INSP (Institut National de Santé public) sur un quartier très urbanisé et à fort trafic au centre d'Alger a conclu que la part de morbidité respiratoire imputable aux PM10 était de 4,5% de l'ensemble des consultations observées en soins ambulatoires durant la période d'étude (Laïd, Atek et al. 2006) qui est caractérisée par un niveau de pollution supérieur à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans plus de 63% des cas.

Par ailleurs, une vaste étude réalisée entre 2002 et 2007 sur la contamination de l'atmosphère par les PM-10, PM-2,5 et PM-1 en différents types de sites dans l'agglomération d'Alger (Kerbachi, Oucher et al. 2009) a mis en évidence en milieu urbain et à fort trafic routier des teneurs en PM-10 et PM-2,5 largement au-dessus normes de l'OMS. Cette pollution est d'autant plus inquiétante que plus de 60% des PM-10 sont des particules respirables. En sites péri-urbains, les niveaux de pollution sont certes réduits de moitié, mais atteignent en ampleur les niveaux mesurés en sites urbains dans les grandes villes européennes. Ainsi selon la même étude, les teneurs moyennes annuelles des particules inhalables PM-10 mesurées à Alger ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont en effet très supérieures à celles observées dans les villes européennes telles

que Paris, Lyon et Marseille (22 à 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) mais inférieures à celles des villes de certains pays émergents connues pour leur forte pollution comme Pekin (136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et Le Caire (130 à 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

L'utilisation à ce jour de l'essence plombé en Algérie est une source de pollution plombifère dans l'air ambiant des villes. Les différentes études qui y ont été menées indiquent des teneurs excessives en plomb dans des quartiers congestionnés d'Alger (Boughedaoui, Kerbachi et al. 2004), qui s'élèvent en moyenne à plus de 0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dépassant la valeur guide de l'OMS (moyenne annuelle de 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Au niveau des stations d'essence ou l'évaporation des carburants est très importante, le plomb atteint des teneurs critiques de plus de 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec une proportion élevée en plomb organique à l'état vapeur.

Le premier réseau de surveillance de la qualité de l'air, dénommé Samasafia, a vu le jour à Alger en mai 2003, puis a été étendu à Annaba (mai 2002), Skikda et Oran (janvier 2008). L'objectif assigné à Samasafia est la mesure des principaux polluants urbains : oxyde d'azote, dioxyde de soufre, oxyde de carbone, hydrocarbures, poussières fines et ozone. Les données recueillies permettaient de calculer un indice de qualité de l'air dans ces villes, porté à la connaissance du public à travers sa publication quotidienne dans les média (Internet, TV, journaux) et son affichage sur des panneaux à la vue des passants. Malheureusement, actuellement, tous le réseau de surveillance est à l'arrêt. Les dernières mesures de Samasafia à Alger remontent à août 2009, si l'on se réfère aux informations mises sur le site de l'Observatoire national de l'environnement et du développement durable, un organisme relevant du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, qui gère le réseau.

I.2. Parc automobile et motorisation

L'image de liberté que confère la voiture à l'homme a permis la révolution des transports au début du XX^{ème} siècle. L'automobile s'est rapidement imposée tant dans les pays industrialisés producteurs de véhicules que dans le reste des pays devenus pour la plupart importateurs. Si cette révolution est indéniable, la problématique des transports jadis réservée aux pays développés du Nord a rapidement gagné les autres pays du Sud avec cependant des effets insidieux et négatifs tant sur le plan économique, environnemental et sociologique que nous abordons ci-dessous.

I.2.1. Dans le monde

I.2.1.1. Parc de véhicules

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit que grâce à la croissance dans les pays émergents le nombre de véhicules de tourisme en circulation dans le monde s'élèvera de 870 millions d'unités en 2011 à 1,7 milliard d'unités en 2035 (IEA 2012 b). C'est cet équipement massif de grands pays émergents (Chine, Inde, Brésil, Afrique du Sud) qui va générer une forte croissance du marché mondial de l'automobile dans les deux prochaines décennies et en conséquence une progression accrue de la consommation de pétrole liée au transport.

Une étude économique canadienne (Gomez 2015) cite que les ventes mondiales d'automobiles ont progressé de 4% au premier semestre de 2014 et atteindront un sommet record en 2015 (Figure I.5). Cette tendance est essentiellement favorisée par l'accélération de la création d'emplois et de l'activité industrielle à l'échelle mondiale. Malgré la montée récente des tensions géopolitiques en Ukraine, au Moyen-Orient et en Afrique, la plupart des indicateurs économiques et des indicateurs de risque financier se maintiennent aux niveaux les plus positifs de la dernière décennie, et il est donc peu probable que ces événements puissent compromettre la poursuite de l'expansion économique mondiale.

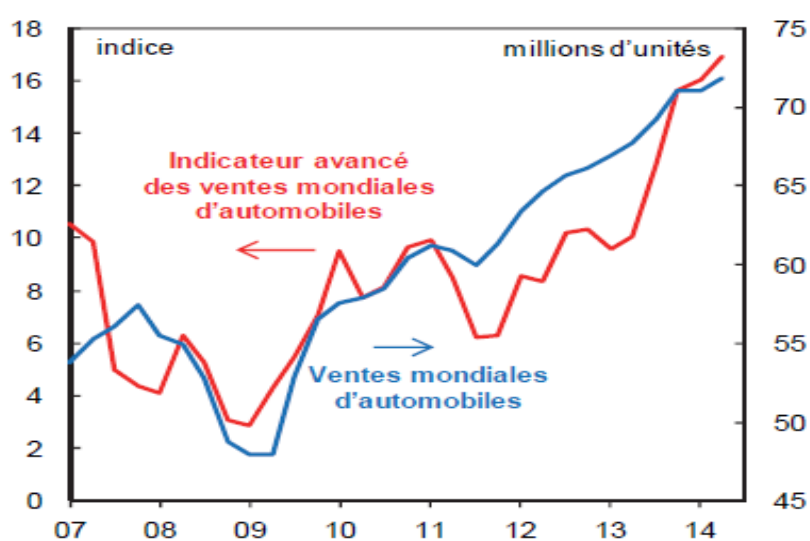


Figure I.5 : Ventes mondiales d'automobiles et indicateur avancé (Gomez 2015).

La Chine reste le principal moteur de la progression des ventes de véhicules (Figure I.6), devenant ainsi depuis 2013 le premier marché mondial de véhicules (tourisme et utilitaires).

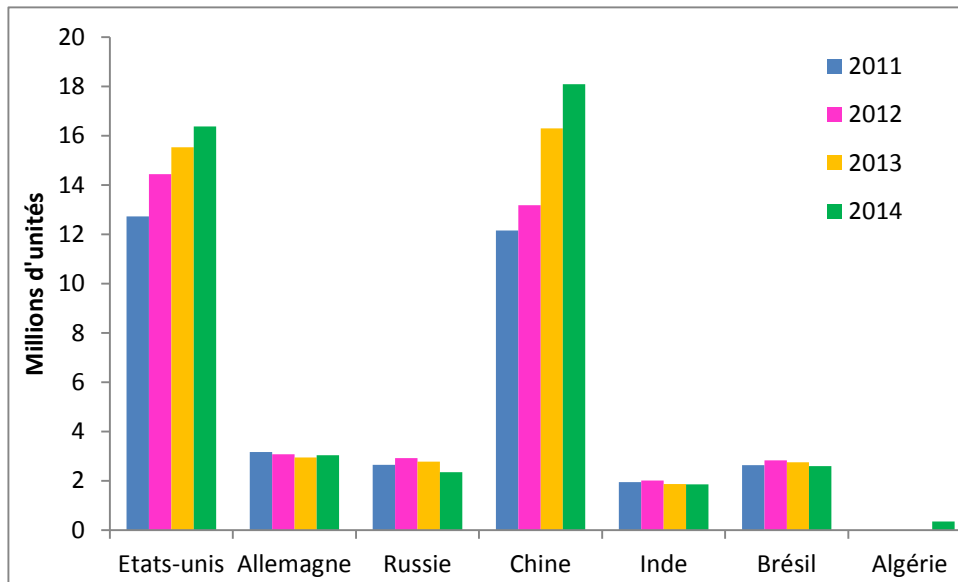


Figure I.6 : Perspectives des ventes internationales automobiles (Gomez 2015).

La Chine, qui n'est pas seulement le pays le plus peuplé du monde, est désormais devenu depuis cette date par sa forte croissance (Figure I.7) le deuxième parc avec 78 millions de véhicules devant le Japon (75 millions), encore loin il est vrai des Etats-Unis (240 millions).

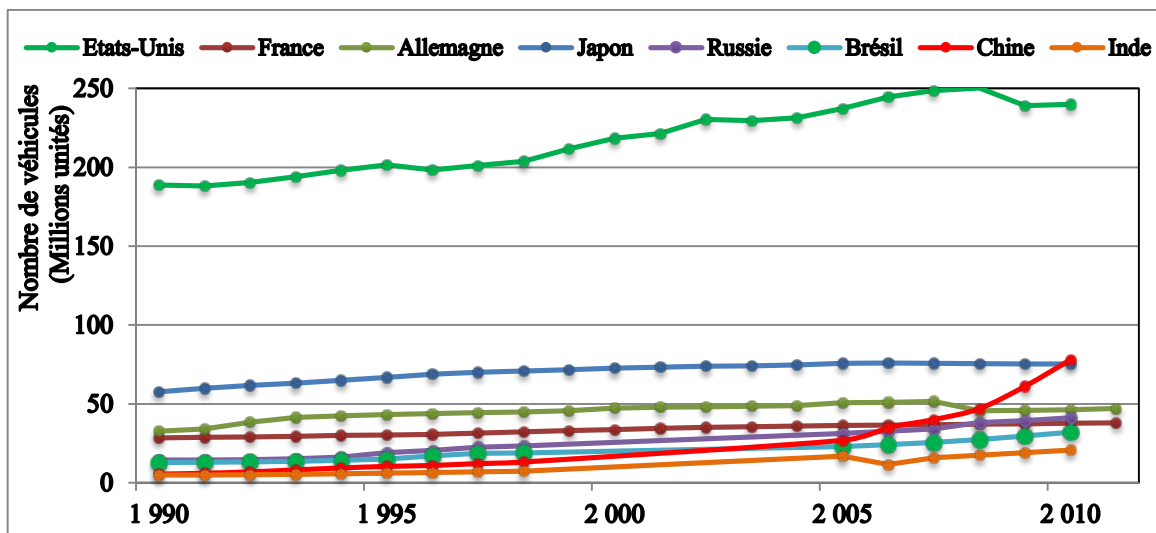


Figure I.7 : Parc automobile des principaux pays équipés (Freyssenet 2013).

Les prévisions de croissance indiquent que le nombre de voitures en circulation en Chine devrait doubler d'ici 2020. L'Inde devrait pour sa part passer de 20 millions d'unités en 2010 à environ 160 millions d'unités en 2035. Pour les pays occidentaux y compris le Japon, on constate la tendance au ralentissement de leurs parcs due à l'effet de la stagnation des immatriculations de véhicules neufs.

Le marché nord-africain (Algérie, Maroc, et Égypte) enregistre également une très forte progression (Figure I.8). Le parc de véhicules de l'Algérie, qui occupe la deuxième place en

Afrique derrière l’Afrique du Sud, a ainsi connu une hausse de plus de 11% au premier trimestre 2009. Le voisin marocain représente également un marché de développement important au Maghreb avec un parc automobile estimé à 1,9 million de véhicules.

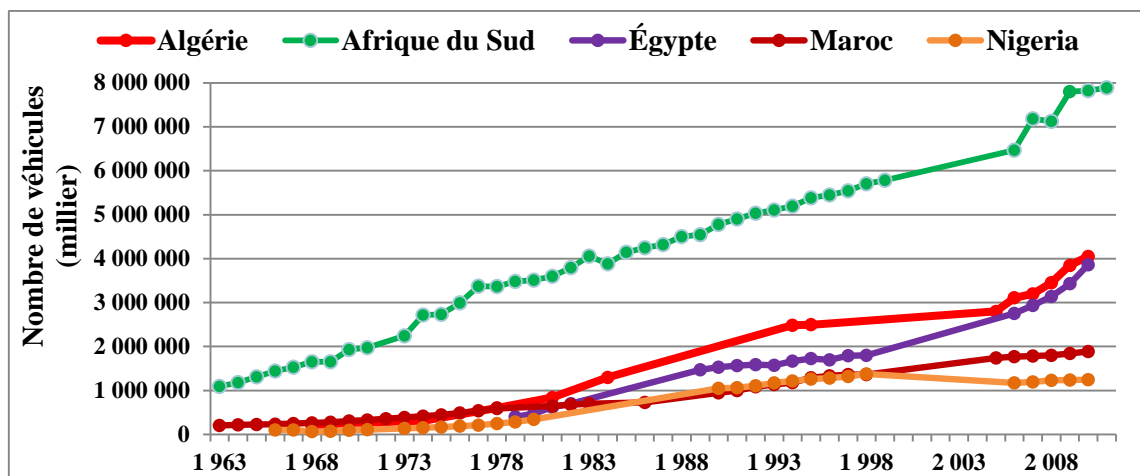


Figure I.8 : Parc automobile des principaux pays d'Afrique (Freysenet 2013).

I.2.1.2. Motorisation

C’est dans les pays en développement que le taux de motorisation (qui représente le rapport entre le nombre des véhicules individuels immatriculés et la population totale considérée) va connaître une croissance notable dans les prochaines années en raison de l’accroissement élevé des ventes de véhicules dans ces pays. La figure I.9 est une représentation de la motorisation des ménages (VP + VU) des principaux marchés automobiles pour l’année 2012. L’Algérie pour cette même année 2012, présente un taux de motorisation de l’ordre de 104 véhicules par 1000 habitants.

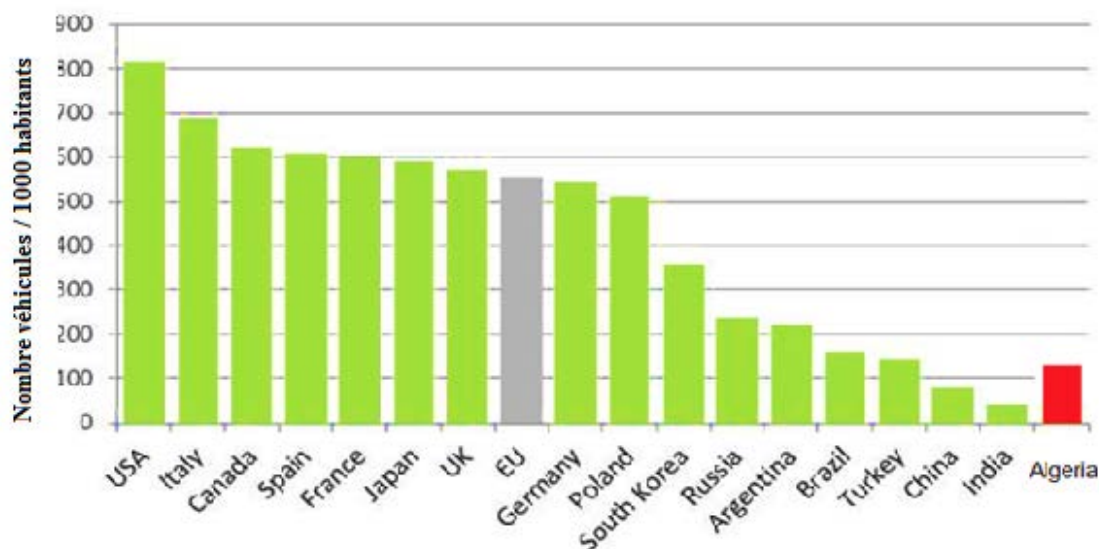


Figure I.9 : Taux de motorisation dans les pays développés et émergents en 2012. (OICA 2012)

I.2.1.3. Parc de véhicules GPL

En 2012, plus de 17,4 millions de véhicules GPL circulaient dans le monde avec un nombre de stations de remplissage en carburant dépassant les 57 000. Le GPL carburant (GPLc) représentait un peu plus de 9% de la consommation mondiale de gaz de pétrole liquéfié. La demande reste néanmoins très concentrée dans un petit nombre de marchés : les cinq plus grands pays représentaient 53% de la consommation mondiale en 2010 et les dix premiers 75%. Les quatre plus gros consommateurs – la Corée, la Turquie, la Russie et la Pologne - ont vu les plus fortes augmentations de la consommation en termes absolus au cours de la décennie passée (WLPGA 2012). La figure I.10 montre que les pays qui possèdent les plus grands parcs de véhicules tels que les USA ou la Chine possèdent paradoxalement les plus faibles flottes de véhicules GPL en comparaison d'autres pays plus petits comme la Pologne.

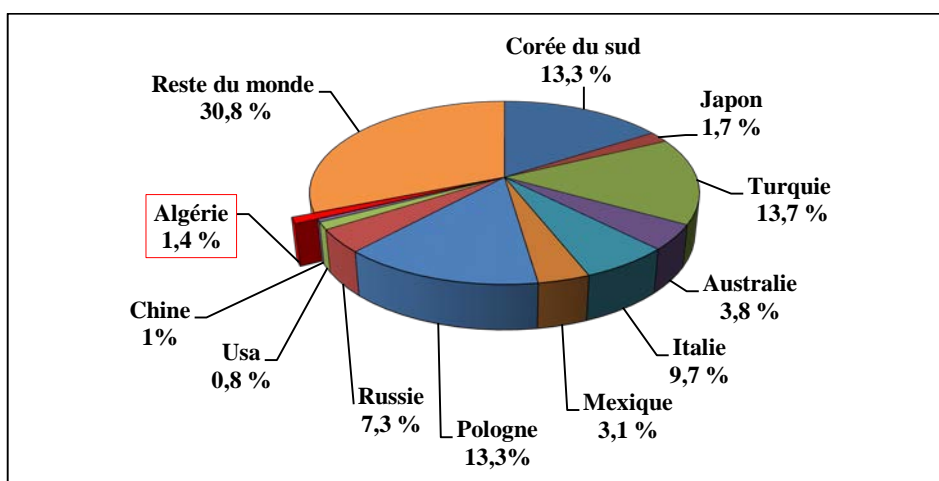


Figure I.10 : Répartition du parc de véhicules GPL dans le monde (WLPGA 2012).

I.2.2. Parc automobile algérien

I.2.2.1. Analyse socio-économique

L'amélioration du niveau de vie des Algériens ces dernières années a eu un impact direct sur l'accroissement des ventes des véhicules neufs. Cette tendance, telle que représentée en figure I.11, peut être décrite pour les trois décennies passées comme suit :

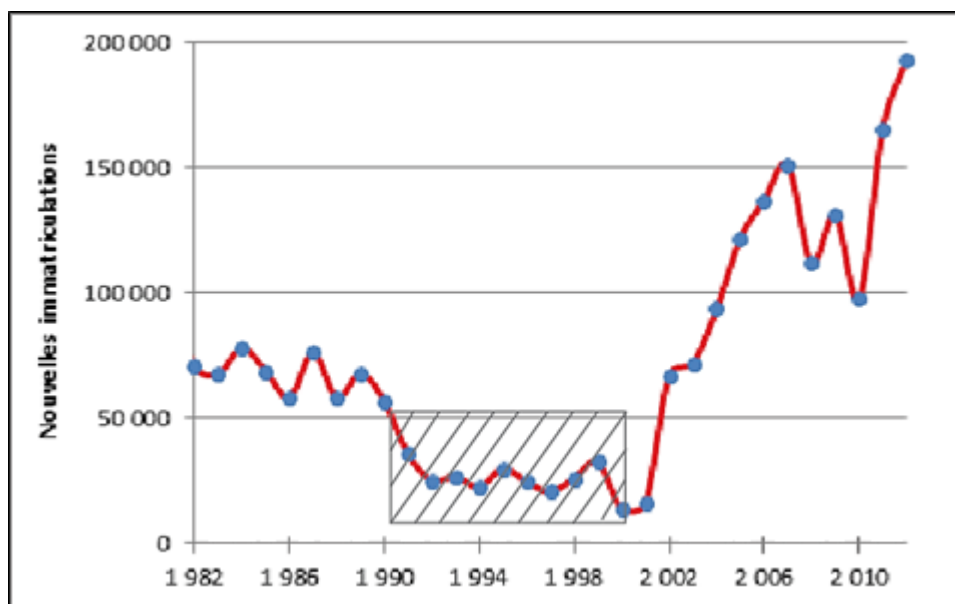


Figure I.11 : Evolution des nouvelles immatriculations des véhicules de tourisme en Algérie pour la période 1982 à 2012 (Sources ONS)

Au début des années 80, l'importation des véhicules particuliers neufs était monopolisée par la société Nationale Sonacome, ainsi qu'une partie par des particuliers dans le cadre de la circulaire d'Autorisation d'Importation de Véhicules de moins de trois ans (AIV). Les voitures importées par Sonacome étaient, selon le quota du moment, vendues à des prix très intéressants. Le problème est que la quantité importée était toujours insuffisante. A telle point que la voiture est pour certains un luxe et pour d'autres une forme de capital, car on pouvait la revendre facilement et beaucoup plus cher que le prix d'achat même après plusieurs années d'utilisation.

Le graphique de la figure I.11 montre pour la décennie 80 une certaine constance des importations marquée en premier lieu par une baisse drastique des importations des véhicules par l'État dues à la baisse des recettes pétrolières (baril de pétrole à 9 dollars). Cette baisse est en partie compensée par une augmentation des importations par les particuliers dans le cadre de l'AIV.

La période des années 90 (en grisé sur la figure I.11) est marquée par une conjoncture économique très défavorable en raison des faibles revenus pétroliers et gaziers (prix du gaz indexé sur celui du pétrole) Ajouter à cela la crise sécuritaire qu'a connue l'Algérie durant cette décennie. Cela a eu pour conséquence directe une baisse notable des importations des véhicules de tout genre, en raison de la très faible mobilité des personnes et de la baisse de l'activité économique à son plus bas niveau.

La troisième décennie est marquée par une reprise progressive et soutenue des importations des véhicules due au développement et à la croissance économique du pays. La libéralisation du

marché automobile en 2004 a vu l'apparition des premiers concessionnaires automobiles représentants de marques asiatiques (Daewoo et Hyundai) et françaises. Le crédit à la consommation en vigueur a permis de doper les ventes jusqu'au pic de 2007-2008 (Figure I.11) avec 200 à 250 000 véh./an. Une rechute des ventes est observée pour les années 2009-2010 suite au gel de la procédure d'achat à crédit survenue dans la loi de finance en 2009 et à l'instauration de la taxe lors de l'achat d'un véhicule neuf. Les raisons de ce gel sont les suivants :

- Le surendettement des ménages, où de nombreuses familles ne pouvaient plus payer les traites ;
- Les impayés des particuliers couverts par le trésor public ;
- La hausse vertigineuse de la facture de l'importation des véhicules ;
- La saturation du réseau routier, principalement urbain où les problèmes d'encombrement devenaient de plus en plus importants.

Enfin à partir de 2011, la croissance du parc redémarre de nouveau en dépit du gel du crédit automobile et de la taxe sur les véhicules neufs. La raison principale en est les augmentations importantes de salaires qu'ont connus tous les secteurs d'activité étatiques et des rappels avec effet rétroactif depuis janvier 2008. Du coup, de nombreux Algériens disposaient d'arriérés importants pouvant financer facilement l'achat d'une voiture. Les importations de véhicules dépassent alors les 350 000 véhicules pour l'année 2012. A partir de 2013, un ralentissement des ventes de véhicules neufs est constaté, dû principalement à la concurrence de l'offre de logements de l'Agence nationale de l'Amélioration et du Développement du Logement (AADL) en direction de la classe moyenne de la population.

Enfin, l'insuffisance tant en qualité qu'en quantité de transports publics, ainsi des considérations socio-culturelles et même religieuses, font que les Algériens qui en ont les moyens préfèrent recourir à la voiture particulière.

I.2.2.2. Répartition du parc de véhicules par type de carburant

Le parc des véhicules légers en Algérie est dominé (Figure I.12) par ceux roulant à l'essence avec un taux de 72% en 2012, suivi des véhicules Diesel (20%) et des véhicules GPL (8%). Si la croissance des véhicules à essence et Diesel est conforme à l'évolution des ventes des véhicules neufs durant ces dernières années, l'évolution des véhicules convertis au GPL tend à régresser par rapport aux autres motorisations.

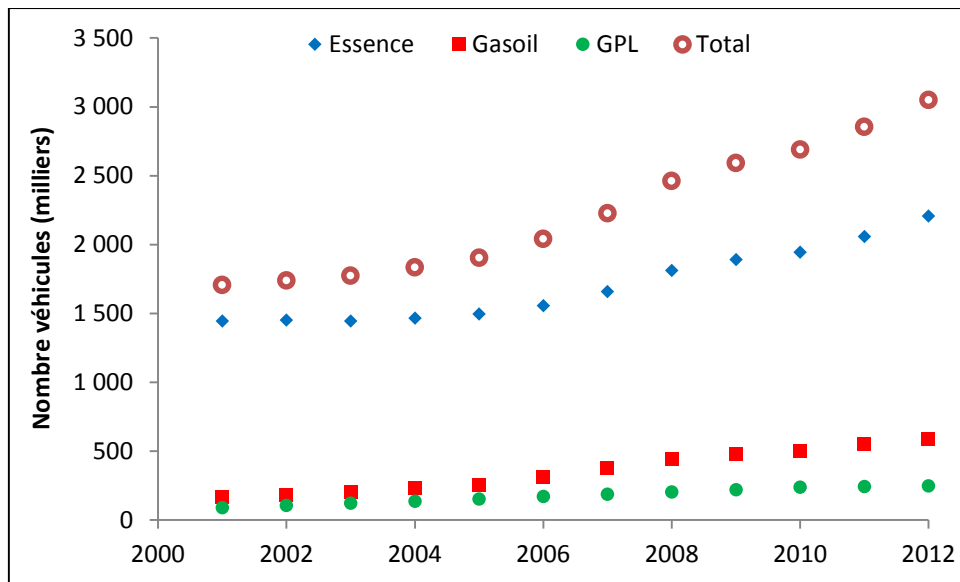


Figure I.12 : Evolution du parc de véhicules légers par type de carburant (ONS 2013)

I.2.3. Technologies de conversion des véhicules au GPL

Au fil des décennies, les équipements de conversion ont connu un développement technologique remarquable pour s'adapter à tout type de technologie moteur allant du carburateur et du système d'injection pour aboutir à l'injection électronique séquentielle du GPLc avec asservissement aux principaux paramètres de fonctionnement du moteur pour les véhicules les plus récents. Nous passons en revue ci-dessous les différentes générations des systèmes de conversion.

I.2.3.1. Systèmes de 1^{ère} génération

Les systèmes de conversion de 1^{ère} génération schématisés figure I.13 concernent les vieux véhicules essence à carburateur et à injection monopoint sans catalyseur (pré Euro1). Très primitive, la technologie de ces systèmes ne comporte pas d'électronique, et donc pas de système de régulation par sonde Lambda. Cela génère des surémissions de polluants et de consommation (environ 30% en volume de carburant de plus qu'une voiture à essence) de GPL par rapport aux nouveaux kits de conversion apparus sur le marché. Par ailleurs, ces systèmes sont plus sensibles à une dégradation des performances que les systèmes les plus récents.

Quant au réglage, il peut être fait entièrement et manuellement par l'installateur de kit de conversion.

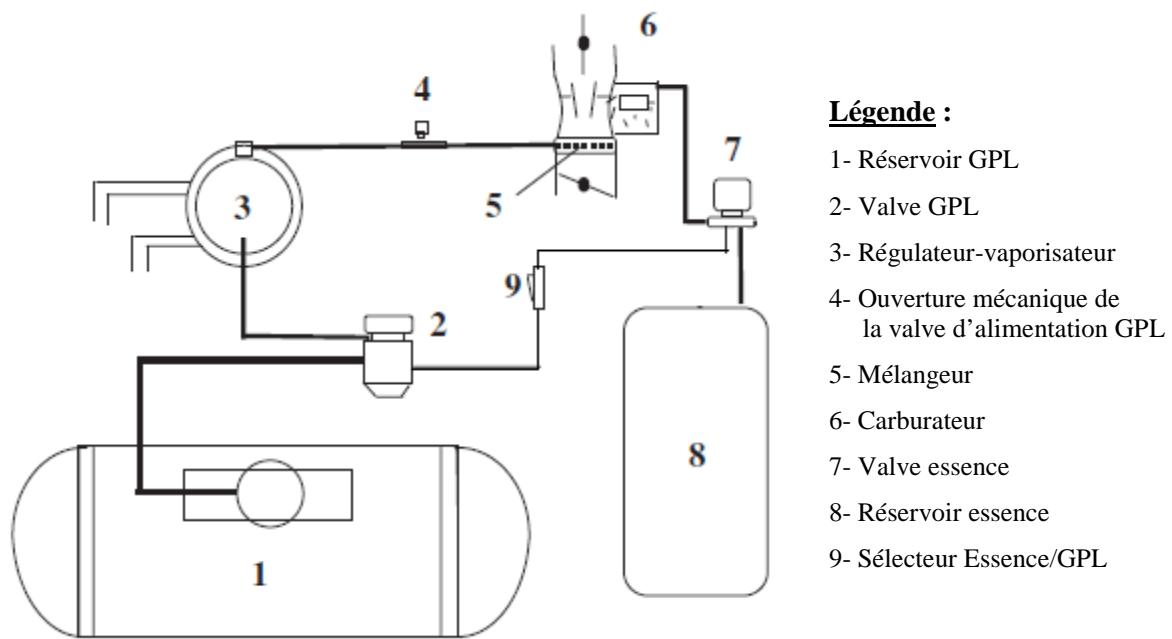


Figure I.13 : Système de conversion GPL de 1^{ère} génération contrôlé mécaniquement. (Karamangil 2007)

Au départ, les réservoirs destinés à stocker le GPLc étaient de forme cylindrique avec des extrémités arrondies (80 à 100 litres de capacité). Dans les modèles plus récents ils peuvent avoir une forme torique (capacité de 60 litres) logés à la place de la roue de secours. Cette dernière de plus petite taille (galette) est logée dans le coffre du véhicule. Tous les réservoirs actuels sont munis d'une soupape de sécurité et sont tarés pour une capacité maximale de remplissage de 80% par mesure de sécurité en cas de forte chaleur.

Les quelques véhicules non régulés en richesse (pré Euro1) encore en circulation (équipés de carburateurs ou de mélangeurs à effet Venturi) deviennent marginaux, dont le nombre estimé n'excède pas les 5% du parc de véhicules légers pour 2010 (Driassa 2008).

I.2.3.2. Systèmes de 2^{ème} génération

Les systèmes de 2^{ème} génération sont appliqués pour les véhicules à allumage mécanique à carburateur et les véhicules à injection électronique pouvant être dotés d'un catalyseur. Ces derniers, selon leur technicité font partie de la norme Euro1 ou Euro2. L'alimentation en GPL est toujours assurée par le régulateur de pression via le mélangeur.

Ce système est un peu plus sophistiqué que le précédent. La majorité des composants utilisés dans ce type de conversion sont les mêmes que dans les systèmes de 1^{ère} génération. Il est largement utilisé pour l'injection, turbo, ou de moteurs de haute performance.

Pour les véhicules catalysés, les signaux venant de la sonde Lambda, du capteur de vitesse (tr/min) et du capteur de position du papillon sont envoyés au calculateur gaz (GPL/GNC), qui à son tour transmet un signal à l'actionneur (moteur pas à pas) pour délivrer la quantité requise de carburant à mélanger avec l'air. La régulation est effectuée en boucle fermée avec une réduction de la consommation de carburant et une réduction des émissions grâce à la sonde Lambda reliée au pot catalytique 3 voies.

Ces systèmes de conversion de 2^{ème} génération ont été abandonnés pour les nouveaux véhicules de la norme Euro3, car, d'une part, ils ne pouvaient pas satisfaire la norme en terme de consommation de carburant et d'émissions de polluants règlementés, et d'autre part le calculateur GPL mis en place dans le système de conversion n'était pas spécifique comme c'est le cas pour le calculateur essence qui possède une cartographie d'allumage propre à chaque type de véhicule.

I.2.3.3. Systèmes de 3^{ème} génération

Les systèmes de conversion de 3^{ème} génération intègrent les véhicules à essence équipés du système d'injection séquentielle multipoint en mode essence et gaz (Figure I.14). L'alimentation du moteur en carburant est gérée par un système bus-CAN (Controller Area Network) qui collabore avec l'électronique du véhicule.

I.2.3.3.1. Principe de l'injection séquentielle :

Historiquement, les premiers systèmes de préparation du mélange utilisaient des carburateurs ou des injections monopoint. Les problèmes de pollution ont depuis favorisés les dispositifs multipoints présentés ici.

Pour une injection multipoints, on utilise un injecteur par cylindre, placé dans la pipe d'admission correspondante et dirigée vers la soupape.

On classe habituellement les injections multipoints en deux catégories (Chaumerliac 1995) :

- " Injection full group " : tous les injecteurs sont pilotés simultanément à chaque tour moteur. Aussi, c'est la même quantité de carburant qui est injectée dans chaque cylindre à une phase donnée.

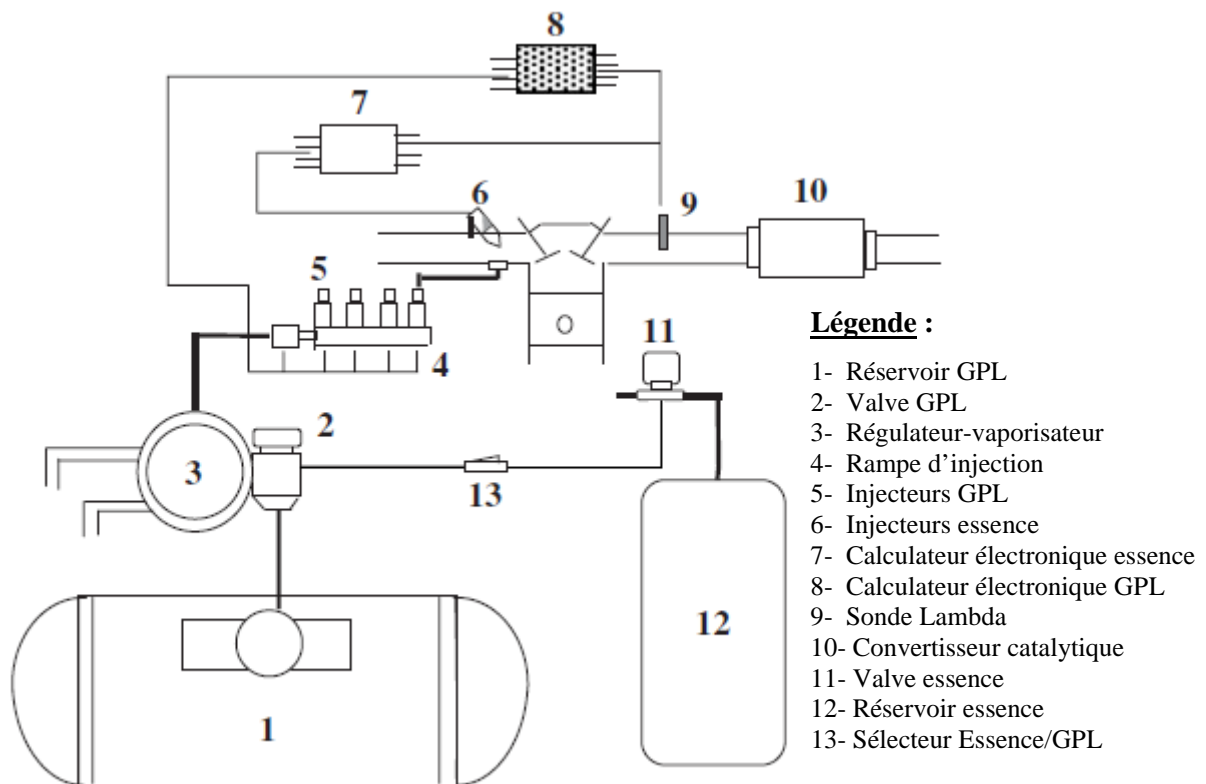


Figure I.14 : Système de conversion GPL de 3^{ème} génération à injection séquentielle.

(Karamangil 2007)

- " Injection séquentielle phasée" : chaque injecteur est piloté une fois par cycle. La quantité de carburant introduite est commandée par le temps d'injection. A une fréquence donnée, la phase et la durée d'injection sont calculées. La phase est choisie de façon à ce que l'injection ne se produise pas pendant le croisement des soupapes, sauf pour les pleines ouvertures du papillon où l'on a besoin d'un temps d'injection d'air plus long.

Ainsi l'injection séquentielle phasée, plus précise, est la plus performante en termes d'émission et de consommation de carburant.

1.2.3.3.2. Principe du mode Maître-Esclave :

Les systèmes de conversion de 3^{ème} génération fonctionnent en mode Maître-Esclave. Le contrôle du moteur est réservé au **calculateur à essence** (maître), tandis que le **calculateur à gaz** (esclave) doit convertir les commandes générées par le premier pour les injecteurs d'essence, en commandes conçues pour les injecteurs de gaz. De façon à garantir une cohérence

parfaite avec le système à essence, le calculateur gaz effectue l'injection du gaz sur le même cylindre avec lequel le temps d'injection relatif à l'essence a été acquis.

La conversion des temps d'injection essence en temps d'injection gaz se fait sur la base d'une série de paramètres acquis par le calculateur gaz tels que : durée d'injection d'essence, la pression du gaz dans la rampe d'injecteurs, température du gaz, température de l'eau du moteur, vitesse de rotation du moteur, signal de la sonde Lambda et tension de la batterie.

Enfin, le calculateur électronique à gaz à travers des stratégies logicielles basées sur des modèles physiques du système convertit les temps d'injection d'essence en temps d'injection de gaz en reconstruisant une chaîne de calcul optimisée et appropriée pour le gaz. Les calculateurs gaz sont programmés avec des logiciels d'interface par connexion port série ou USB avec un ordinateur portable. En premier lieu, l'opérateur qui doit programmer le calculateur, doit d'abord choisir la marque, modèle et type de véhicule figurant dans la base de données du logiciel. Ensuite il n'a qu'à suivre le programme d'installation et de calibration du calculateur étape par étape.

Les systèmes de conversion de 3^{ème} génération peuvent satisfaire aux normes d'émission Euro 3 et Euro 4. Ils sont par rapport à leurs prédécesseurs plus fiables, plus performants en termes de rendement moteur et de consommation de carburant. Ils sont aussi reconnus pour l'absence du phénomène de retour de flamme contrairement aux précédents (CG Gas 2009, Autogassolutions 2014).

Cependant ces kits de conversion sont environ deux fois plus chers en Algérie que ceux de 2^{ème} génération. De plus ils n'intègrent pas la norme OBD (On-Board Diagnostics) d'autodiagnostic dans la gestion du véhicule en mode gaz.

I.2.3.4. Systèmes de 4^{ème} génération

Les systèmes de 4^{ème} génération, toujours à injection séquentielle, sont à présent compatibles avec les normes de diagnostic OBD II et de contrôle des émissions Euro 4 et Euro 5. La structure du kit de conversion reste pratiquement inchangée à quelques différences près (CG Gas 2009, Autogassolutions 2014).

Par ailleurs, les nouveaux moteurs étant conçus avec des soupapes en alliage spécial, ils résistent mieux aux hautes températures et aux conditions sèches de gaz, accroissant le rendement du moteur. Ainsi la perte de puissance inhérente à l'ancienne technologie qui était de 15 à 20% a été réduite à 5% avec les nouveaux moteurs.

Récemment, certains constructeurs de kit de conversion ont prévu de mettre en place en option le système " stop and go" pour la carburation GPL qui permet au véhicule d'arrêter son moteur dans les arrêts ce qui aura une répercussion positive sur la consommation de carburant.

I.2.3.5. Systèmes de 5^{ème} génération

La dernière évolution de l'alimentation en GPL des moteurs est l'injection séquentielle en phase liquide.

Le GPL est injecté à l'état liquide dans le moteur dans la même séquence que l'essence. Les injecteurs sont dérivés d'injecteurs essence, fonctionnant à une pression variant de 7 à 20 bars suivant la température dans le réservoir et la composition du GPL. Une pompe située dans le réservoir de GPL assure une surpression dans la ligne d'alimentation afin d'éviter l'évaporation d'une partie du liquide transportée vers l'avant du véhicule. L'intérêt d'une injection GPL réside dans la possibilité de contrôler à chaque injection, avec un délai très court, la richesse de fonctionnement et donc d'utiliser des stratégies affinées pour limiter les émissions de polluants en fonctionnement transitoire (corrections ou accélérations et coupures d'injection en décélération...). La vaporisation du GPL s'accompagne d'un refroidissement important de la masse d'air admise ce qui permet de rétablir le remplissage moteur par accroissement de la densité de la charge et de permettre une réduction sensible des niveaux d'oxydes d'azote (NO_x) émis (Watson and Phuong 2007). L'injection de GPL liquide permet, contrairement aux autres systèmes d'alimentation en GPL gazeux, de conserver la puissance et le couple obtenus en fonctionnement à l'essence sans modification importante du moteur.

L'autre intérêt de l'injection de GPL sous forme liquide est la qualité du mélange air et GPL. Plus précis, le mélange injecté dans le moteur offre des performances très proches d'un fonctionnement à l'essence. Le dosage précis du carburant est l'un des atouts de l'injection directe en phase liquide conduisant ainsi à une consommation plus réduite de GPL et donc à moins d'émissions de polluants. Autre avantage, les reprises sont plus franches, même à bas régime, avec une conduite plus agréable.

L'inconvénient qui demeure comme pour le système conventionnel précédent, est le démarrage du véhicule en mode essence. La combustion du GPL n'étant correcte qu'avec des chambres de combustion chaudes, le GPL ne peut assurer seul le démarrage du moteur.

Le système d'injection liquide est extrêmement simple dans son principe. Le gaz qui est, rappelons-le, stocké à l'état liquide dans le réservoir est amené vers les injecteurs par une pompe électrique. La pression créée par la pompe s'ajoute à celle naturelle du gaz dans le réservoir. La

pression à l'intérieur du réservoir est variable, celle-ci dépendant de la quantité de GPL et de sa composition. Un régulateur de pression maintient le carburant liquide jusqu'à l'injecteur. De ce fait, la gestion de la quantité de carburant réellement envoyée à travers l'injecteur devient très difficile à réaliser sans une électronique de commande poussée. Un calculateur séparé de celui de l'injection d'essence assure cette tâche. C'est lui qui détermine, en fonction des informations reçues d'un capteur de pression en bout de la rampe, le temps d'ouverture des injecteurs.

I.3. Consommation de carburants en Algérie

Depuis une décennie, l'Algérie est confrontée de manière récurrente à des problèmes d'approvisionnement en carburant principalement le gazole et l'essence sans plomb et ce à cause de capacités insuffisantes de raffinage, elles même dues à une forte croissance du parc automobile, de l'ordre de 5 à 7% ces dernières années. Dans ce qui suit, on abordera cette problématique et la place du GPLc dans le modèle de consommation des carburants en Algérie.

I.3.1. Problématique

En Algérie, les transports occupent la plus grande place dans la consommation d'énergie par secteur pour l'année 2010 (Figure I.15). Le transport routier absorbe entre 80 et 90% du total de la consommation énergétique du secteur des transports.

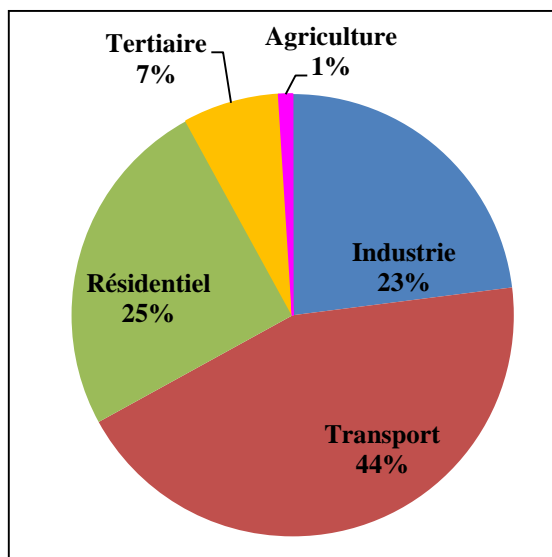


Figure I.15 : Répartition par secteur de la consommation finale d'énergie en Algérie pour l'année 2010 (Medener 2014).

En Algérie, l'évolution constante du secteur des transports est accompagnée d'une croissance de la consommation de produits pétroliers raffinés. Le marché national des carburants routiers est à plus de 75% constitué de gazole. Les 3 types d'essences (essence normale, essence super

et essence sans plomb), qui représentaient 33% des carburants routiers en 2000, ont vu leur part régresser progressivement pour atteindre 23% en 2009, du fait de la croissance du trafic routier par les véhicules lourds (camion et bus). Quant à la consommation de GPL carburant dit "Sirghaz", elle ne représente que 3% de la part des carburants routiers et stagne autour d'environ 300 000 tonnes depuis 2004-2005 (Figure I.16).

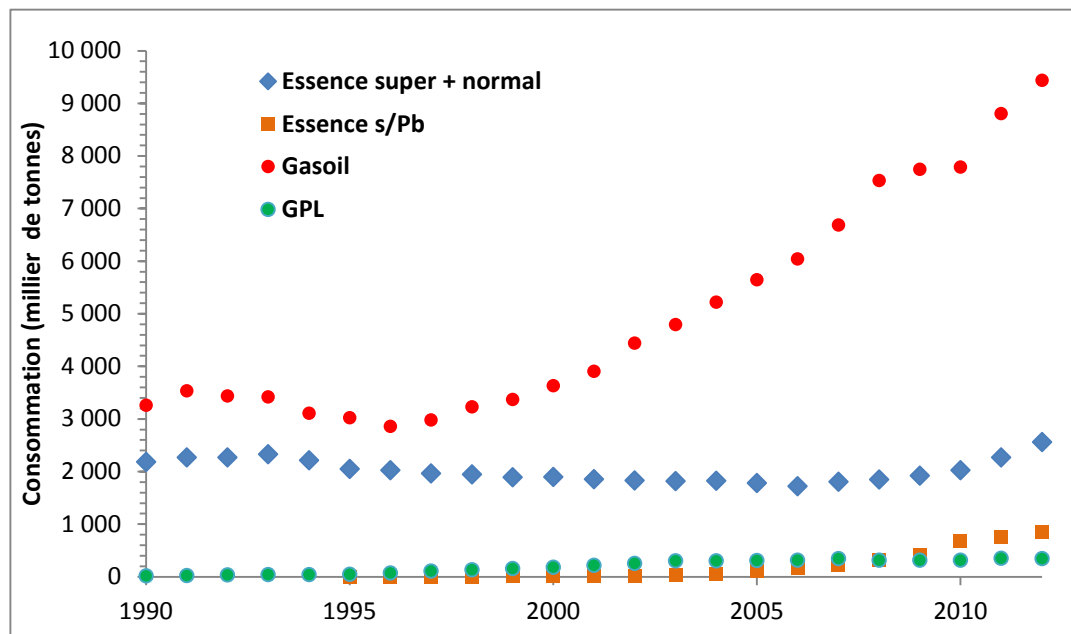


Figure I.16 : Evolution de la consommation des différents carburants routiers en Algérie (Sources NAFTAL)

Depuis une décennie, la croissance de la demande nationale en carburants (gazole et essence) dépasse 7% en moyenne annuelle. En 2003, le pays consommait 7,5 millions de tonnes de carburant automobile. En 2011, cette quantité est passée à près de 12 millions de tonnes (8,9 millions de tonnes de gazole et 3 millions de tonnes d'essence), soit une forte hausse dépassant les 70% en neuf ans. Avec un rythme de croissance annuel de 9%, la consommation atteindrait les 18 millions de tonnes en 2016. En parallèle, les capacités nationales théoriques de raffinage ont stagné autour de 22 millions de tonnes de pétrole brut. En conséquence, l'Algérie, pour faire face au déséquilibre entre la demande et l'offre, a commencé dès 2008 à avoir recours à des importations progressives de gazole et de l'essence sans plomb. A préciser que ce dernier n'est produit que dans une seule raffinerie (celle de Skikda) sur les 5 destinées à la production de carburant. Ainsi et en raison de la forte croissance du parc national automobile attendue pour les années à venir, la pression de la demande sur les carburants, particulièrement le gazole, restera soutenue et ce en dépit du programme de modernisation et de réhabilitation des 3 principales raffineries (Skikda, Alger et Arzew) d'un montant de quatre milliards de dollars avec pour objectif de porter la capacité nationale de raffinage à plus de 27 millions de

tonnes par an contre 22 millions actuellement. Il est prévu dans ce programme d'une part de remplacer progressivement l'essence au tétraéthyle de plomb (PTE) par de l'essence sans plomb et d'autre part de diminuer la teneur en soufre dans le gazole, pour une meilleure adaptation de ces carburants aux nouvelles exigences de technologies des moteurs.

Selon un rapport de l'OCDE (OCDE 2013), l'Algérie est l'un des 6 derniers pays (avec l'Afghanistan, la Birmanie, la Corée du Nord, l'Irak et le Yémen) à continuer à commercialiser l'essence plombée. Il n'existe actuellement qu'un seul fabricant de PTE dans le monde (la société américaine Innospec qui livre ce produit à ces 6 pays, en contradiction avec les dispositions des principes directeurs relatifs à l'environnement issus du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). D'ailleurs récemment, cette société a été contactée par le PCN (Point de Contact National) des Etats Unis pour lui demander d'arrêter la commercialisation du PTE. Le rôle du PCN est de traiter les questions qui peuvent donner lieu à un consensus dans le cas des principes directeurs de l'OCDE à l'intention des entreprises multinationales, dont les recommandations volontaires et non contraignantes sont destinées à favoriser une conduite responsable des entreprises dans un environnement mondialisé.

L'Algérie est l'un des leaders mondiaux du GPL, avec une production annuelle qui avoisinait les 7,5 millions de tonnes en 2013 (MEM 2015), soit une bonne part de la consommation nationale des carburants liquides. Ce niveau de production nationale dominé par le GPL, dont une grande partie pourrait être utilisée comme GPL carburant, devrait amener les pouvoirs publics à reconsidérer le modèle de consommation actuel qui privilégie la consommation des carburants liquides au détriment du GPL. Ce dernier présente aussi le grand avantage d'être extrait à partir des champs de gaz (sans compter la part produite par les raffineries) dont les réserves, estimées à 50 ans d'exploitation, sont nettement plus grandes que les réserves de pétrole (16 ans) qui sert de matière première pour la production du gazole et des essences (Azzoug 2012).

I.3.2. Marché du GPL carburant

Les mesures d'allégement fiscal mises en place par le secteur de l'énergie pour la promotion de l'utilisation du GPL carburant durant les années 1980-1990 se sont avérées très efficaces jusqu'au milieu des années 2000 qui ont vu la consommation du GPL carburant atteindre plus de 300 000 tonnes (Figure I.17).

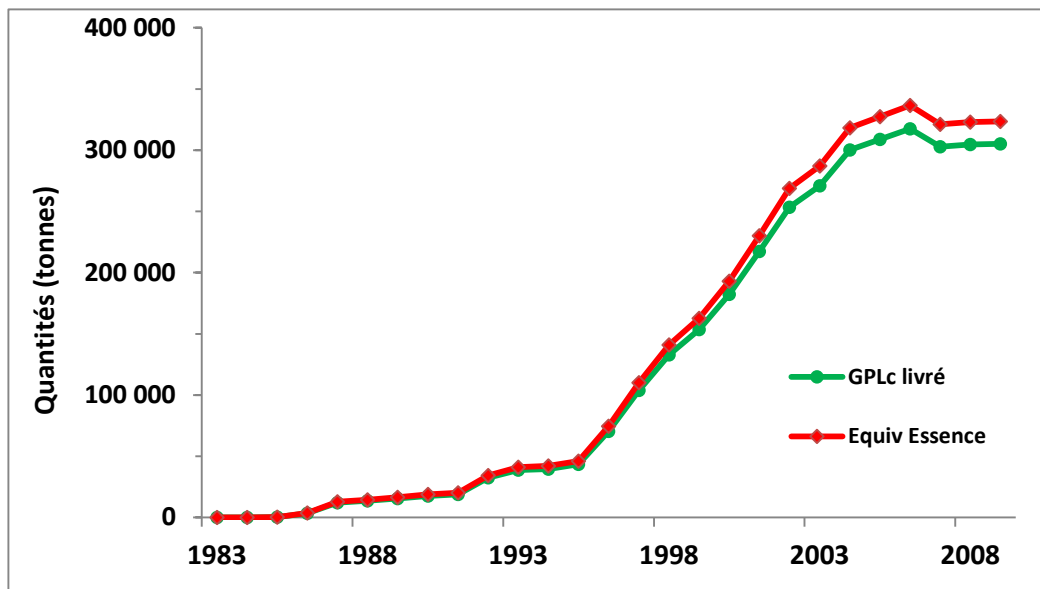


Figure I.17 : Ventes de GPLc et leurs équivalents essences économisés en tonnes
(Lamara 2010)

Néanmoins, la stagnation de la consommation de ce carburant depuis l'année 2007 a montré les limites de l'expérience algérienne en matière d'utilisation du GPLc sur le double plan de la conversion des véhicules et de la distribution du produit. A l'inverse, d'autres pays pourtant non producteurs de GPL (issus des forages gaziers) ont réussi leur expérience de conversion d'une partie de leur parc de véhicules essence au GPLc (Tableau I.1) à l'instar de la Turquie, de l'Italie, de la Corée du Sud et de la Pologne. A titre indicatif, la Turquie, dès le lancement de son programme de conversion au GPLc en 1998, a réussi en 3 années à convertir près de 1 million de véhicules, la Corée du Sud en a converti 1 million entre 1999 et 2001 et plus récemment encore, la Pologne est passée au premier rang mondial en termes de parc GPLc avec la conversion entre 2001 et 2005 de plus de 1,5 million de véhicules.

Les raisons de la stagnation du marché de GPLc sont notamment :

- le faible différentiel de prix à la pompe entre le gazole (13,7 DA) et le GPLc (9 DA) comparativement à l'essence super (23 DA),
- les coûts relativement élevés des kits de conversion de véhicules essence au GPLc.

Tableau I.1 : Marché du GPL de quelques pays en 2010 (WLPGA, 2012)

Pays	Consommation (millier tonnes)	Nombre de véhicules (millier)	Nombre de stations GPL
Corée du Sud	4450	2300	1611
Turquie	2490	2394	8700
Russie	2300	1282	2000
Pologne	1660	2325	5900
Italie	1227	1700	2773
Japon	1202	288	1900
Australie	1147	655	3200
Chine	909	143	310
Mexique	837	535	2100
Algérie	313	239	463

L'expérience pratique a montré que les propriétaires de véhicules sont souvent prêts à convertir leurs véhicules au GPLc si les économies dans les coûts de fonctionnement sont suffisamment attractives. La figure I.18 donne un aperçu du kilométrage à faire pour amortir les frais d'une conversion d'un véhicule à essence au GPL. Le recouvrement des frais nécessite de rouler au minimum 75 000 km avec un kit de conversion à injection séquentielle (70 000 DA), ce qui correspond à une période moyenne d'amortissement de 3 années.

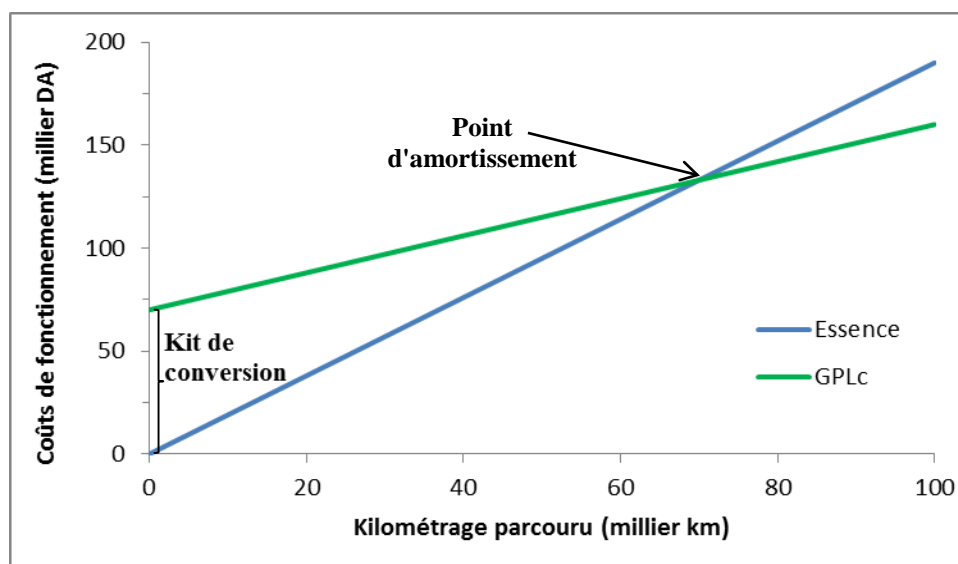


Figure I.18 : Coûts de fonctionnement d'un VP en fonction de la distance parcourue (WLPGA 2012)

Les raisons de la stagnation du marché de GPLc sont ensuite :

- les couts d'investissement relativement élevés dans la chaine de distribution (la réalisation d'un point de vente coute 9 million DA et un camion-citerne coute 19 million DA (Lamara 2010),
- les lenteurs administratives pour l'obtention des autorisations réglementaires pour l'ouverture de nouveaux points de vente de GPLc pour les stations privées,
- l'absence de campagnes de vulgarisation, de promotion et de sensibilisation pour libérer les conducteurs de leur réticence psychologique vis à vis du GPLc,

Certes, à ce jour des mesures incitatives restant insuffisantes ont été mises en place par les pouvoirs publics pour encourager l'adoption du GPLc par les automobilistes, telles que :

- la réduction de la TVA de 17 à 7% pour tous les équipements GPLc accordée par la loi de Finances de 2006 (JORADP n°85 du 31/12/2005),
- la convention entre l'APRUE et la Banque de Développement Local (BDL) en 2009 pour le financement des opérations de conversion à 0% d'intérêt aux propriétaires des véhicules convertis,
- l'exonération de vignette automobile pour les véhicules convertis en 2010, mais aussi l'abattement des droits de douanes pour l'importation des kits GPL,
- plus récemment, l'état vient d'imposer aux concessionnaires (Art. N°73 du JO N°68 du 31-12-2013), l'introduction d'un quota annuel de 10% de véhicules convertis au GPLc dont 80% au moins à équiper en Algérie avec un kit GPL.

I.3.3. Caractéristiques des carburants consommés en Algérie

Les gaz de pétrole brut liquéfiés sont extraits du pétrole brut ou du gaz naturel. Ils sont issus à plus de 60% des champs de gaz naturel et proviennent pour le reste du raffinage du pétrole brut dont ils représentent entre 2 et 3% de l'ensemble des produits raffinés : ainsi, et selon sa provenance, 1 tonne de pétrole brut donne 20 à 30 kg de GPL. Le GPLc est essentiellement un mélange de propane et de butane en proportion variable selon les saisons (Plassat 2005).

Les GPLc sont surtout composés de propane et de butane avec des isomères et alkènes en C₃ et C₄ en quantité généralement faible (propène, isobutane, butène et isobutène, butène-2 trans et cis, etc...). Sa composition varie selon les pays, en fonction des divers gaz disponibles, la proportion d'hydrocarbures en C₃ pouvant aller de 25 à 90% en masse. Le GPLc est facilement

liquéfiable à température ambiante. Cette propriété permet de disposer d'une quantité importante d'énergie sous un volume relativement faible.

Dans les tableaux I.2 et I.3 sont comparées les principales caractéristiques moyennes du GPLc avec l'essence et le gazole.

Tableau I.2 : Comparaison de quelques caractéristiques du GPL avec d'autres carburants (Orselli 1992, Guibet 1997)

Caractéristiques	Propane C ₃ H ₈	Butane C ₄ H ₁₀	GPLc	Essence super	Gasoil
Masse volumique liquide à 15°C (kg/l)	0,51	0,58	0,557	0,747	0,844
Température d'ébullition à 1 atm (°C)	- 42,5	- 0,5	< - 20		
Pression de vapeur à 50°C (bar)			11,5		
Pouvoir calorifique inférieur (PCI) MJ/kg)	46,4	45,8	46	42,7	42,6
PCI composé liquide à 15°C (MJ/l)	23,7	26,6	25,4	32	
Energie mélange carburé à richesse 1, 25°C et 1 atm	3 ,35	3,38	3,37	3,48	
Teneur en carbone (% massique)	81,8	83	82,2	85	87
Teneur en hydrogène (% massique)	18,2	17	17,8	15	13
Plage d'inflammabilité dans l'air (%)			1,9 à 9	1,2 à 7,6	

Le GPLc est odorisé par des mercaptans pour faciliter la détection de fuites.

Tableau I.3 : Caractéristiques physico-chimiques des carburants (Orselli 1992, Guibet 1997, Plassat 2005)

Carburant	Densité	Nombre d'atomes de carbone	Rapport H/C	Composition par famille chimique (% volumique)			
				Paraffine	Naphtalène	Oléfine	Aromatique
G.P.L	0,51 – 0,58	3 et 4	2,0 à 2,67	60 - 100	n.c*	0 – 40	n.c*
Essence	0,72 – 0,77	4 à 10	1,7 à 1,9	40 - 65	0 - 5	0 - 20	15 – 45
Gasoil	0,82 – 0,86	10 à 20	1,9 à 2,1	50 - 65	20 – 30	0	6,8 – 39,1 % mass.

*n.c : non communiqué

En Europe, les caractéristiques du GPLc doivent respecter une législation précise (norme EN 589). Elle concerne essentiellement l'indice d'octane moteur (MON) qui doit être supérieur à 89, ce qui, de fait, limite la teneur en oléfines, et la pression de vapeur, liée au rapport C₃/C₄, qui doit être inférieure à 1 500 mbar à 40 °C, afin d'éviter des surpressions dans les réservoirs, en période d'été. Par ailleurs, pour assurer un démarrage suffisamment aisé du véhicule, on fixe une valeur minimale de pression de vapeur en hiver, différente selon les conditions climatiques de chaque pays. Quatre classes (A, B, C, D) de GPLc sont ainsi définies en Europe, avec une pression de vapeur minimale de 250 mbar, respectivement à -10 °C (classe A), - 5 °C (classe B), 0 °C (classe C) et +10 °C (classe D) (Guibet 1997).

I.4. Conclusion

En Algérie, devant l'accroissement effréné du parc automobile, nos villes subissent une pollution visible et de plus en plus nuisible en l'absence de réglementation des pouvoirs publics. Les taux de polluants dégagés par la circulation automobile sont largement au-dessus des seuils fixés par l'OMS.

Cette détérioration de la qualité de l'air respiré dans les grandes agglomérations algériennes nécessite une réhabilitation urgente du réseau de surveillance de la qualité de l'air "Samasafia", sans lequel il n'est pas possible de connaître le niveau de pollution atmosphérique. Il y va de la santé de la population et particulièrement des catégories les plus vulnérables.

Durant la dernière décennie, la consommation de carburant a subi une croissance de 9%/an à tel point que la production nationale ne répond plus à la demande, d'où la nécessité pour l'Algérie de recourir à des importations selon la demande de gasoil et de l'essence sans plomb et d'investir dans de nouvelles raffineries pour satisfaire la demande du marché interne.

L'importance de ce marché des carburants en général, tant sur le plan économique qu'environnemental, pose la question fondamentale du choix du modèle national de consommation et plus particulièrement de la place que doivent occuper les carburants alternatifs gazeux GPLc et GNC, dont l'Algérie recèle d'énormes potentialités.

Enfin, le vrai défi en Algérie d'aujourd'hui est de contrebalancer la tendance à l'usage excessif escompté de la voiture particulière, sachant que la forte tendance actuelle va se poursuivre dans les prochaines années en Algérie, ce que seule une politique de développement durable pourrait infléchir. La question essentielle reste de savoir comment inscrire les transports et plus globalement la mobilité dans une optique de développement durable.

Chapitre II : Emissions unitaires de polluants

Les facteurs d'émission (FE) unitaires sont issus de relations fonctionnelles qui permettent de prédire la quantité d'un polluant rapportée à la distance parcourue, la consommation d'énergie ou la quantité de carburant utilisée. Ils dépendent de nombreux paramètres tels que les caractéristiques du véhicule et de la technologie de contrôle des émissions, les spécifications du carburant et des conditions ambiantes et de fonctionnement (démarrage à froid et à chaud, mode stabilisé, accélération, etc...).

La qualité de tout modèle d'émission des véhicules routiers ou d'inventaire d'émission est basée sur la représentativité des FE qu'il contient. Les modèles d'émission utilisés pour effectuer les calculs des émissions du transport routier peuvent être répartis en différentes catégories principales en fonction des données d'entrée requises. Ceux-ci vont des modèles qui nécessitent la vitesse de déplacement moyenne (tels que COPERT, EMFAC), des modèles qui tiennent compte des conditions de circulation par l'évaluation qualitative des conditions de conduite (tel que HBEFA, ARTEMIS), et des modèles qui nécessitent chaque seconde les données de fonctionnement du moteur ou du véhicule (tels que MEHP, MOVES) afin d'en tirer des informations d'émission pour le profil de conduite (Franco, Kousoulidou et al. 2013).

II.1. Techniques de mesure

Les émissions de polluants doivent être estimées avec précision pour s'assurer que les plans de la qualité de l'air soient conçus et mis en œuvre de manière appropriée. Dans ce qui suit, on passera en revue les différentes techniques de mesure des émissions des véhicules routiers, en rapport avec le développement des modèles d'émission utilisés à des fins d'inventaires d'émissions.

Les techniques de mesure des émissions les plus couramment utilisées pour la collecte des données sur les émissions des véhicules routiers sont par ordre d'importance : les mesures en conditions de conduite contrôlées sur banc dynamométrique à rouleau et banc moteur (généralement pour les véhicules lourds), suivies des mesures par télédétection et enfin les mesures en embarqué. Les mesures sur banc sont réalisées en utilisant des cycles de conduite réglementaires européens (NEDC puis WLTC) et les cycles plus réalistes ARTEMIS. Les autres types de mesures sont réalisés en conditions réelles de circulation.

II.1.1. Mesures en conditions contrôlées

Les émissions des véhicules routiers peuvent être mesurées dans des conditions contrôlées en laboratoire. Ces mesures sont réalisées sur banc véhicule à rouleau ou sur banc moteur. Dans ces deux cas, les opérateurs de test ont le contrôle sur le cycle d'essai suivi, les conditions environnementales et d'autres paramètres, ce qui assure aux tests réalisés une répétabilité des résultats.

II.1.1.1. Banc d'essais dynamométrique

Cette méthode consiste à placer le véhicule sur un banc d'essai à rouleau (2 rouleaux pour véhicules à 4 roues motrices) et on tente de reproduire au laboratoire (Figure II.1) les conditions de fonctionnement de ce véhicule à l'aide d'un cycle de conduite préétabli, en lui opposant l'ensemble des forces de résistance à l'avancement rencontrées sur la route, principalement : les forces liées à l'aérodynamique (pénétration du véhicule dans l'air), au roulement liée à la vitesse du véhicule (contact pneu-chaussée), au profil de la route (pente) et aux forces d'inertie liées à la masse du véhicule lors des accélérations et décélérations (Degobert 1992).

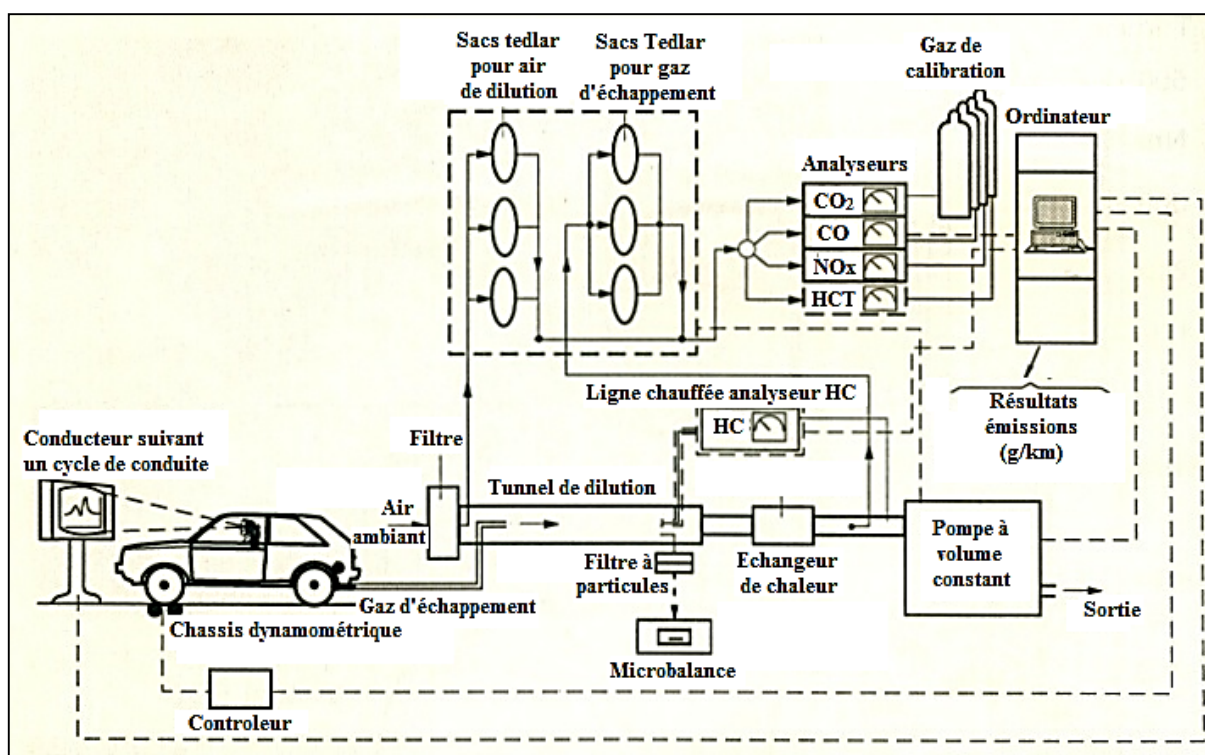


Figure II.1 : Schéma du dispositif d'échantillonnage à volume constant (CVS)

(Klingenberg 1996)

Le dispositif de mesure des polluants consiste à collecter et analyser les gaz d'échappement grâce à la méthode de prélèvement à débit constant CVS (Constant Volume Sampling).

Les gaz d'échappement sont collectés durant l'exécution de cette procédure de test et sont mélangés à un volume complémentaire d'air ambiant filtré (rapport de dilution de l'ordre de 1/8), (Degobert 1992), afin d'obtenir un débit d'air - gaz constant. Des échantillons de ces mélanges à débit contrôlés sont recueillis dans des sacs de collecte des gaz, ainsi qu'un échantillon d'air ambiant qui a servi à la dilution des gaz (échantillon témoin) pour être ensuite analysés. De plus, des mesures de concentration en continu sont généralement faites sur ces mélanges.

La teneur de chaque polluant émis durant l'essai est égale à la différence entre la concentration du gaz dilué et celle de l'échantillon de l'air qui a servi à la dilution.

II.1.1.2. Cycle de conduite

Un cycle de conduite est une courbe consigne de vitesse en fonction du temps qui rend compte des conditions de fonctionnement du véhicule (accélérations, freinages, changements des rapports de boîte de vitesse...) et qui doit être reproduite par le conducteur du véhicule lors du test sur banc. Le cycle dure plusieurs minutes et comprend souvent plusieurs parties (ou sous-cycles) qui représentent différentes conditions de conduite caractéristiques par exemple d'un milieu urbain ou autoroutier.

La figure II.2 montre un exemple de cycle de conduite américain dénommé FTP (pour Federal Test Procedure), créé par l'EPA (Environmental Protection Agency) pour représenter un cycle urbain avec une grande partie de la conduite en ville avec des arrêts fréquents et une partie de la conduite sur autoroute.

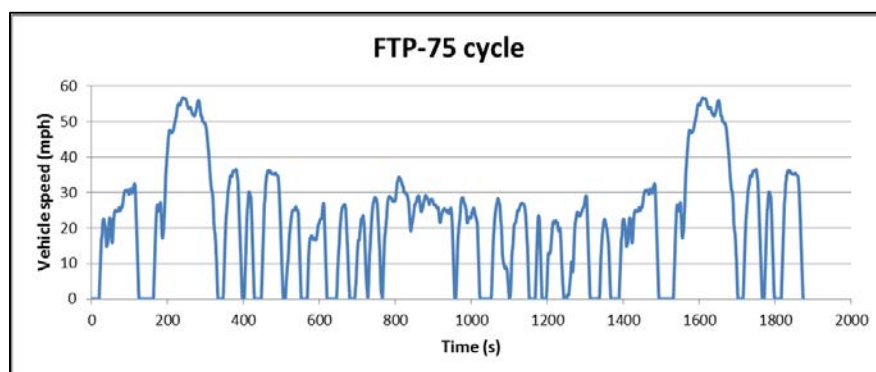


Figure II.2 : Cycle de conduite américain FTP 75

Il existe un très grand nombre de cycles associés aux réglementations des différents pays. Des informations techniques détaillées sur les cycles de conduite standardisés les plus couramment utilisés peuvent être trouvées dans la littérature (Degobert 1992, André 2004).

Ces cycles sont utilisés à de multiples fins : comme quantifier les émissions de polluants et la consommation ; certifier, homologuer des véhicules ou des modèles ; évaluer des technologies, voir l'incidence de modifications de la régulation du trafic.

Tous les cycles d'homologation des véhicules neufs sont critiqués pour être trop stables avec une charge massique trop faible pour un fonctionnement habituel du véhicule. De plus, ils ne couvrent qu'une petite partie de la plage de fonctionnement du moteur (Weiss, Bonnel et al. 2011). En général, les cycles d'homologation sous-estiment les émissions d'environ 18 à 28% en CO₂ par rapport aux conditions réelles de circulation, du fait des plus faibles vitesses utilisées lors des tests. De plus les constructeurs, pour présenter des niveaux d'émission de CO₂ conformément aux nouvelles normes prescrites, ont recours à des mesures d'optimisation telles que : l'utilisation d'huiles performantes pour moteur, essais réalisés à chaud, les points de fonctionnement spécifiques appelés modes ne correspondant que partiellement à la conduite sur route (Ntziachristos and Samaras 2000, Pelkmans and Debal 2006).

Pour pallier aux lacunes des cycles actuels, sur lesquels sont basées les procédures d'homologation, une procédure d'essai harmonisée pour les voitures particulières et véhicules utilitaires légers (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP) est en passe d'être adoptée internationalement à l'horizon 2015 par un groupe d'experts de l'Union européenne, du Japon et de l'Inde sous les auspices du Forum mondial pour l'harmonisation des réglementations sur les véhicules (UN-ECE 2014).

Le cycle d'essai WLTP (Figure II.3) reflète davantage les conditions réelles de conduite que le système actuel, connu sous le nom de New European Driving Cycle (NEDC), utilisé depuis 1996. Grâce à une couverture plus large de points de fonctionnement du moteur, il est estimé que les chiffres de la consommation de carburant avec ce nouveau cycle d'essai seraient de 10 à 20% supérieurs à ceux du cycle de test actuel.

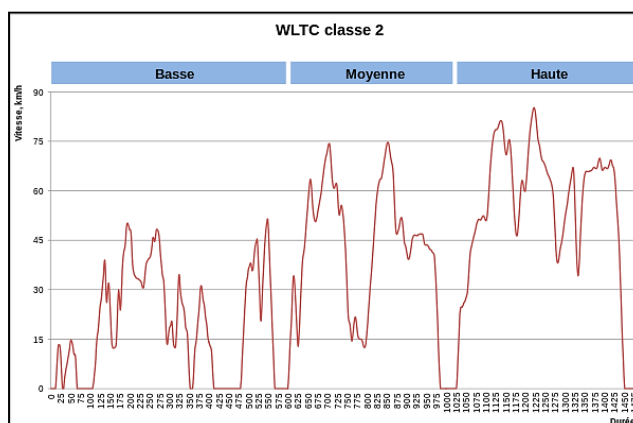


Figure II.3: Exemple de cycle de test WLTC de classe 2 (ICTT 2013)

II.1.2. Mesures en circulation réelle

Les mesures d'émissions automobiles dans les conditions réelles de circulation, que ce soit par télédétection ou avec un équipement embarqué, fournissent des données précieuses sur le comportement des émissions réelles des véhicules roulants, contrairement aux mesures obtenues en laboratoire, où les données obtenues s'écartent de la réalité du fait de la non exhaustivité des conditions de circulation employées. En revanche les mesures en condition réelles sont généralement moins précises et non reproductibles par rapport à celles obtenues sur banc dynamométrique, en raison de l'absence d'un cycle d'essai standard et de la présence d'autres sources de variabilité telle que les conditions d'environnement et de circulation et enfin les comportements de conduite variables d'un conducteur à un autre.

Cependant, les données de mesure d'émission en circulation réelle peuvent jouer un rôle important dans l'identification des lacunes existantes dans les modèles d'émissions et par-delà rendre ces derniers plus réalistes.

II.1.2.1. Mesures par télédétection

Les mesures d'émission de polluants des véhicules en circulation réelle par la méthode de télédétection sont effectuées moyennant un système de mesure optique, cinématique et d'identification des véhicules mesurés. Cette technique permet de mesurer un grand échantillon de véhicules en circulation.

Le dispositif de mesure des polluants est limité sur une seule voie de circulation (Figure II.4). Il comprend un module émetteur placé sur un côté de la chaussée, lequel envoie deux types de sources de rayonnement : infrarouge à des longueurs d'ondes spécifiques pour CO, CO₂ et HCT et ultraviolet pour les NO_x. Les deux sources de rayonnement qui traversent le panache de fumée sortant du tuyau d'échappement des véhicules, sont partiellement détectées par le module récepteur placé de l'autre côté de la chaussée. Les concentrations des polluants sont mesurées en tant que ratio par rapport au CO₂ (exemple CO/CO₂) (Ko and Cho 2006, Guo, Zhang et al. 2007).

Les données de cinématique de vitesse et d'accélération/décélération sont aussi enregistrées grâce à un système de capteur de distance de type émetteur/récepteur placé sur la chaussée.

Les plaques de véhicules qui passent sont enregistrées par une caméra vidéo couplée à l'ordinateur disposant de la base centrale de données du parc de véhicules. A chaque plaque d'immatriculation lisiblement identifiée, l'ordinateur identifiera le véhicule correspondant en lui attribuant la marque, le modèle et l'année de première mise en circulation.

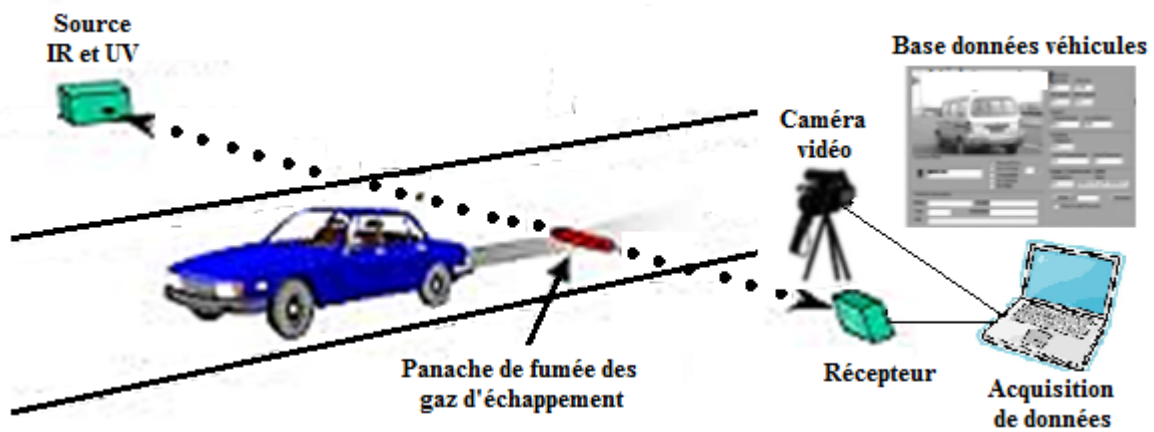


Figure II.4: Schéma montrant un système de mesure par télédétection en opération
(Guo, Zhang et al. 2007)

Dans les mesures par télédétection, on considère que les panaches de gaz d'échappement sont immédiatement dilués avec de l'air ambiant, et donc les concentrations réelles de polluants à l'échappement ne peuvent pas être mesurées directement. Cependant, en supposant que la dilution est turbulente et se produit instantanément, les rapports de concentrations de polluants pour un panache donné sont conservés (Bishop and Stedman 1996), et ce sont donc ces rapports qui sont mesurés et communiqués à l'équipement de télédétection (par exemple CO/CO_2 , $HCT/CO_2, \dots$). En supposant des conditions de combustion stoechiométriques et connaissant les caractéristiques des combustibles (fraction de masse de carbone et rapport H/C), on peut calculer la concentration attendue de CO_2 à l'échappement, et on aboutit au calcul de la concentration d'un polluant i générique P_i du tuyau d'échappement au moyen de l'équation suivante (Franco, Kousoulidou et al. 2013):

$$[P_i]_{\text{échappement}} = \left(\frac{([P_i]/[CO_2])_{\text{mesure}}}{1 + ([CO]/[CO_2])_{\text{mesure}}} \right) \cdot [CO_2]_{\text{stoechio}} \quad \text{éq. (II.1)}$$

où $[CO_2]_{\text{stoechio}}$ est la concentration stoechiométrique de CO_2 pour le carburant considéré et $[P_i]/[CO_2]_{\text{mesure}}$ le ratio générique des concentrations du polluant P_i au gaz de référence CO_2 avec l'indice mesure.

II.1.2.2. Mesures des émissions en embarqué

Nous avons vu que les mesures sur banc d'essai ne reproduisent pas la réalité du trafic mais reproduisent un cycle normalisé ou représentatif d'un type de circulation. La cinématique réelle est difficilement reproductible sur banc d'essai. Les systèmes de mesure de polluants en embarqué sont une alternative intéressante à des tests de laboratoire, car ils prennent en compte

toutes les variables de la conduite réelle qui peuvent influencer sur les émissions.

Le fait que les PEMS (Portable Emission Measurement System en anglais) soient maintenant approuvés ou en cours d'approbation à des fins de certification dans certaines applications est une preuve de leur progrès technologique. Ils ont sans doute des perspectives prometteuses.

Les systèmes portables de mesure des émissions dits PEMS sont des ensembles complets d'instruments de mesure qui peuvent être embarqués à bord d'un véhicule à l'étude (Frey, Unal et al. 2003). Une unité PEMS est généralement composée d'un ensemble d'analyseurs de gaz avec des lignes de prélèvement chauffées directement raccordées au tuyau d'échappement, d'un scanner de diagnostic moteur relié à la prise diagnostic OBD (On-Board Diagnostic) du véhicule via l'ordinateur de bord qui récolte les données : consommation de carburant, vitesse du véhicule, vitesse de rotation et température du moteur, position du papillon et autres paramètres. Les PEMS mesurent généralement les émissions instantanées de NO_x, HCT, CO et CO₂ du gaz d'échappement à l'état brut. Un GPS et une station météorologique sont normalement installés aux abords immédiats du véhicule. Dans certains cas, d'autres instruments peuvent être utilisés, tels que des accéléromètres pour enregistrer les accélérations instantanées (Oprešnik, Seljak et al. 2012), un altimètre et même une caméra vidéo pour enregistrer les conditions de la circulation lors des tests.

Les premiers PEMS ont vu le jour à la fin des années 1980 avec le système du constructeur Volkswagen (Staab and Schurmann 1987, Schürmann and Staab 1990), du laboratoire VITO de Belgique (Lenaers 1994, Lenaers 1996, De Vlieger 1997, Lenaers and Vlieger 1997). Ceux-ci étaient encombrants de par leurs taille et poids (Figure II.5) avec des appareils de laboratoire, limitant ainsi le nombre de travaux de mesure des émissions en embarqué.



Figure II.5: Ancien PEMS embarqué à bord d'un véhicule léger (Lenaers, 1997)

Au cours des dernières années, les PEMS ont connu un développement technologique remarquable, avec des réductions significatives de la taille, du poids, et de la tuyauterie et de la complexité du câblage (Figure II.6) et enfin l'amélioration des principes de mesure et de

temps de réponse des analyseurs de gaz pour obtenir des valeurs d'émissions instantanées de polluants à des niveaux satisfaisants de précision, semblables à ceux d'un équipement conventionnel de laboratoire fixe (Frey, Unal et al. 2003, Pelkmans and Debal 2006, Lau, Hung et al. 2011, Weiss, Bonnel et al. 2011, Hu, Wu et al. 2012, Huo, Yao et al. 2012, Kousoulidou, Fontaras et al. 2013).



PEMS HORIBA 2200



PEMS SEMTECH-DS

Figure II.6: Modèles récents de PEMS

Le principal avantage des mesures en embarqué, c'est qu'elles peuvent fournir de longues séries de valeurs d'émissions d'un véhicule dans une large gamme de conditions de circulation et de conditions ambiantes, qui seraient autrement difficiles ou impossible à reproduire en laboratoire (telles que les pentes variables et l'état de la chaussée, l'altitude, etc...). L'installation de PEMS sur plusieurs types de véhicules (selon leur catégorie, puissance et technologie) peut conduire à une grande base de données des valeurs d'émission des véhicules de différentes technologies contrôlées dans des conditions de conduite et environnementales différentes. Les PEMS sont relativement simples et nettement moins coûteux que les équipements de laboratoire et peuvent être installés sur une grande variété de véhicules. Ils peuvent être particulièrement pratiques pour les véhicules lourds, étant donné que les bancs d'essai dynamométriques ont des limites en termes de taille de véhicule et deviennent coûteux pour des puissances élevées du moteur.

Les principales limites des PEMS résident d'une part dans le nombre limité de polluants à mesurer, tout au plus les polluants règlementés et éventuellement pour certains équipements récents de mesure des particules en masse ou en nombre. D'autre part la reproductibilité réduite des résultats, du fait que les mesures s'effectuent en conditions réelles de circulation, pose quelques limitations à l'utilisation en tant que méthode de base pour le développement des facteurs d'émission (Franco, Kousoulidou et al. 2013).

Parmi les premiers travaux de mesure des émissions de polluants sur route, citons ceux réalisés en Angleterre par le Waring Spring Laboratory (Potter 1987, Bailey, Gunary et al. 1990). Le système monté à bord du véhicule est un échantillonneur de gaz appelé mini-CVS relié à des

sacs en Tedlar pour la collecte des échantillons de gaz d'échappement et d'air ambiant au cours de chaque trajet effectué. Les gaz ainsi collectés sont analysés au laboratoire. Cette méthodologie a été reprise par van Ruymbeke (Van Ruymbeke, Guitton et al. 1993) qui a validé ce système au laboratoire de l'INRETS (Bron, France) sur banc dynamométrique avec des cycles de conduites normalisés. La comparaison des résultats d'émission de polluants avec le banc CVS montre des différences inférieures à 10%.

Les mesures de polluants par PEMS sont une alternative complémentaire à des tests en laboratoire. En fait, l'homologation des véhicules légers neufs récents dans les pays développés, réalisée sur banc à rouleaux en laboratoire doit se conformer à des normes d'émission de plus en plus strictes (actuellement Euro 6). Le cycle normalisé servant aux tests d'homologation doit donc être plus conformes aux conditions de circulation réelles. Aussi l'utilisation de PEMS permettrait de mettre à jour des cycles de conduite pour réduire les écarts importants des niveaux d'émission obtenus sur route et sur banc dynamométrique. Ainsi, Pelkmans (Pelkmans and Debal 2006) a mis en évidence pour un véhicule de norme Euro 4, des émissions de CO et de NO_x pouvant atteindre des taux jusqu'à 10 fois plus élevé dans le trafic réel par rapport au cycle NEDC. De plus, la consommation de carburant et de CO₂ sont généralement sous-estimés de 10-20% dans le NEDC.

D'autres études menées par Daham et Weiss (Daham, Li et al. 2009, Weiss, Bonnel et al. 2011) ont montré que les émissions sur banc sous-estiment de 10 à 50% les émissions réelles de CO₂ mesurées en embarqué avec un PEMS pour des véhicules Euro 1 à Euro 4. D'autres travaux mentionnent des niveaux de NO_x mesurés en circulation réelle de 2 à 4 fois supérieurs aux émissions mesurées sur cycle normalisé européen NEDC (Rubino, Bonnel et al. 2007, Weiss, Bonnel et al. 2011), Pelkmans (Pelkmans and Debal 2006) et Daham (Daham, Li et al. 2009) rapportant des dépassements variables.

Une autre étude plus récente menée avec un PEMS (modèle SEMTECH-DS) par Weiss (Weiss, Bonnel et al. 2012) ont analysé les émissions à l'échappement d'une voiture Diesel éligible à la norme Euro 6 équipée du nouveau système SCR (Selective Catalytic Reduction) qui abaisse la teneur des gaz d'échappement en NO_x (grâce à la présence d'urée qui crée une réaction chimique avant l'expulsion des gaz), et 6 voitures Diesel Euro 4-5. Les mesures montrent l'efficacité de cette technologie qui permet de réduire les émissions moyennes de NO_x pour : l'Euro 6 ($0,21 \pm 0,09$ g/km), l'Euro 5 ($0,71 \pm 0,30$ g/km) et l'Euro 4 ($0,76 \pm 0,12$ g/km). Cependant, toutes les voitures testées, y compris la voiture Euro 6 Diesel, dépassent leurs normes d'émissions de NO_x de $260 \pm 130\%$ (Figure II.7). Ce résultat suggère que la procédure

d'homologation actuelle ne tient pas suffisamment compte des émissions de NOx des véhicules Diesel en circulation réelle.

Ces écarts remettent en cause la méthode réglementaire qui ne permet pas d'obtenir des émissions représentatives des émissions réelles.

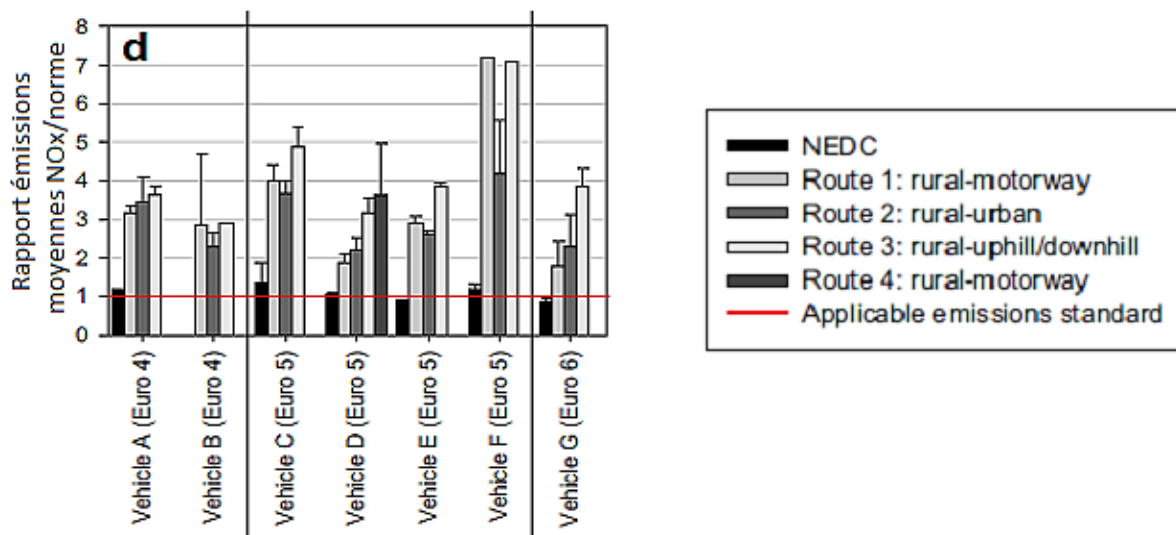


Figure II.7 : Comparaison des émissions du cycle NEDC et sur route pour différentes normes de véhicules (Weiss et al., 2012)

Alors que plusieurs études ont porté sur les émissions sur banc d'essai des véhicules roulant au GPL (Snelgrove 1996, Gamas, Diaz et al. 1999, Bayraktar and Durgun 2005, Ristovski, Jayaratne et al. 2005, Lim, Ayoko et al. 2006, Li, Li et al. 2007, Lai, Chang et al. 2009, Adam, Astorga et al. 2011, Kim, Choi et al. 2013), peu d'études ont été effectuées en circulation réelle (Lau, Hung et al. 2011, Oprešnik, Seljak et al. 2012). L'avantage de ces dernières est de mesurer les performances réelles du GPL en termes d'émission de polluants selon l'environnement du trafic et les conditions de circulation de la région considérée.

II.2. Emissions unitaires

Les émissions unitaires de véhicules deviennent une donnée incontournable pour toute comparaison des niveaux d'émission et tout calcul d'inventaire. En l'absence de normes d'émissions, comme c'est le cas de l'Algérie, on se propose dans cette étude de faire une comparaison et une analyse des émissions unitaires réelles des véhicules en circulation sur la base du modèle d'émission Artemis. La base Artemis qui rassemble les données de mesures européennes des émissions des véhicules en provenance de différents laboratoires regroupe la majorité des marques et modèles existant en Algérie.

II.2.1. Problématique des normes d'émissions en Algérie

L'Algérie, qui importe tous ses véhicules particuliers, n'impose aucune norme d'émission pour les véhicules neufs, du fait de l'absence de norme d'homologation ou de réglementation de ces derniers. Les concessionnaires, qui ne sont soumis à aucune réglementation, peuvent donc mettre sur le marché des véhicules répondant à n'importe quelle norme. Tout au plus, un utilisateur averti qui vient d'acquérir un véhicule pourra savoir si son véhicule est catalysé ou pas. On rappellera que l'Algérie reste l'un des rares pays qui continue à distribuer l'essence plombée, dont l'utilisation est incompatible avec les véhicules essence catalysés, sous peine de détruire leur catalyseur, le plomb étant un poison pour ces derniers.

Ainsi bien que le parc algérien se soit rajeuni à un rythme accéléré durant ces dernières années, les véhicules récents ne sont pas plus sûrs que les anciens dès lors qu'ils peuvent avoir la même norme malgré la différence d'âge. D'autant plus que la norme ne concerne pas seulement l'aspect environnemental mais aussi l'aspect sécuritaire des véhicules en circulation.

Pour faire face à ces lacunes, les autorités algériennes devraient mettre en place une politique de réglementation et d'homologation des véhicules importés par les concessionnaires.

II.2.2. Normes d'émission

L'État de Californie a été pionnier en matière de lutte contre la pollution automobile, en appliquant depuis soixante ans le programme de lutte le plus draconien au monde. Ainsi, de 1955 à 1993, les concentrations d'ozone de pointe y ont été réduites de moitié. Pour réduire encore davantage la pollution automobile en dépit de la croissance du trafic routier, les Etats-Unis, l'Europe et le Japon adoptent des normes de pollution de plus en plus strictes s'appliquant aux véhicules neufs, tandis que, dans le même temps, les normes déjà introduites dans ces pays sont progressivement reprises par d'autres pays.

II.2.2.1. Normes d'émission en vigueur

Dans la mesure où chaque région utilise des procédures d'essai différentes pour l'homologation des véhicules neufs, il est difficile de faire des comparaisons précises quant à la sévérité des limitations respectives. La figure II.8 donne un comparatif des normes d'émission en Europe, aux États-Unis et au Japon.

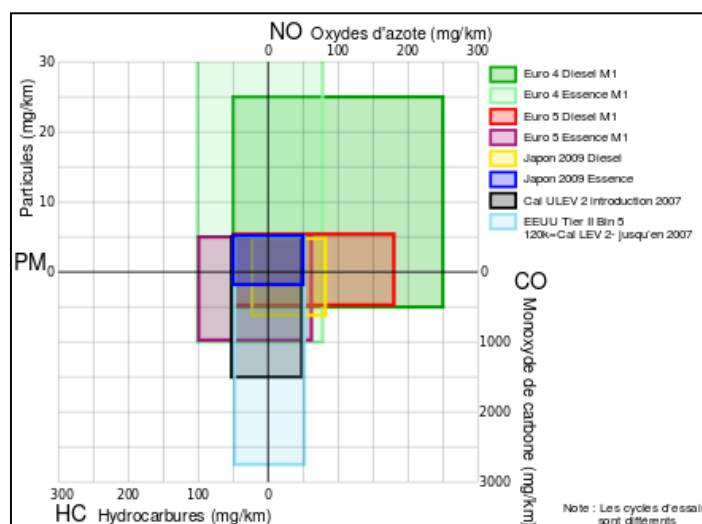


Figure II.8 : Comparaison des normes d'émission des voitures particulières dans l'Union Européenne, les Etats Unis et le Japon (Selles 2005)

II.2.2.2. Evolution des normes d'émissions européennes

Le parc véhicule légers algérien étant constitué en majorité de véhicules de marques européennes, on utilisera comme référence les normes de l'Union Européenne (Tableau II.1) pour notre étude sur les émissions unitaires de notre échantillon de véhicules.

Tableau II.1 : Limites d'émissions de l'UE pour les véhicules particuliers (ADEME 2007)

Classe	Normes	Année		Limites des émissions Euro (g/km)					
		NT	TT	CO	HC	HCNM	HC + NOx	NOx	PM
Diesel	Euro 1	1992		2,72	-		0,97	-	0,14
	Euro 2	1996		1,00	-		0,7	-	0,08
	Euro 3	01/2000	01/2001	0,64	-		0,56	0,5	0,05
	Euro 4	01/2005	01/2006	0,50	-		0,3	0,25	0,025
	Euro 5	09/2009	01/2011	0,50	-		0,23	0,18	0,005
	Euro 6	09/2014	09/2015	0,50	-		0,17	0,08	0,005
Essence	Euro 1	1992		2,72	-			-	-
	Euro 2	1996		2,20	-			-	-
	Euro 3	01/2000	01/2001	2,30	0,20			0,15	-
	Euro 4	01/2005	01/2006	1,00	0,10			0,08	
	Euro 5	09/2009	01/2011	1,00	0,10	0,068		0,06	0,005a
	Euro 6	09/2014	09/2015	1,00	0,10	0,068		0,06	0,005a

NT (nouveau type) : les nouveaux modèles doivent respecter la norme à la date d'entrée en vigueur indiquée.

TT (tout type) : tous les véhicules neufs doivent respecter la norme à la date d'entrée en vigueur indiquée.

Note : dès 2000, suppression dans le cycle d'essai des 40 premières secondes de mise en température moteur.

a : pour moteur à Injection Directe d'essence mélange pauvre seulement.

II.2.3. Emissions réelles de véhicules en circulation

En l'absence de norme d'émission des véhicules à appliquer pour l'Algérie et donc, d'un critère essentiel pour évaluer les émissions des véhicules, on se propose de comparer dans notre présente étude les émissions unitaires de notre échantillon de 17 véhicules avec des véhicules équivalents de la base de données européenne ARTEMIS (Joumard, André et al. 2007). Une comparaison de ces résultats avec cette base permettra d'associer ou de situer chaque véhicule de notre échantillon à une norme Euro d'émission.

Le projet ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Modelling and Inventory Systems) a été initié au début des années 2000 par la Commission Européenne lors du 5^{ème} programme-cadre couvrant les activités de recherche pour la période 1998-2002. L'objectif du projet est de développer et d'améliorer les méthodes européennes d'estimation et d'inventaire des émissions de polluants des différents modes de transport en Europe. 40 partenaires (laboratoires et agences gouvernementales) de 15 pays ont pris part à ce projet (Joumard, André et al. 2007). La conception de ce projet a pour objectif de répondre à la nécessité de développer un modèle d'émission harmonisé des transports routier, ferroviaire, aérien et maritime et de fournir des estimations d'émissions cohérentes à l'échelle nationale, régionale et internationale. Cela devrait contribuer à réduire les conflits méthodologiques et à faciliter la prise de décisions plus efficaces concernant l'amélioration de la qualité de l'air et le bien-être des citoyens. Dans notre cas on se limitera à la base ARTEMIS des véhicules légers.

II.2.3.1. Base de données ARTEMIS

La base de données d'émissions a été développée et améliorée grâce aux nouvelles procédures de tests appliquées dans le cadre même du projet Artemis avec 130 véhicules légers (particuliers et utilitaires). Cette base s'est renforcée de l'apport de données antérieures provenant d'autres campagnes européennes de mesure issues des projets MEET (données des laboratoires : INRETS, TNO, TRL, LAT), HBEFA (APEM, TÜV) et OSCAR (TRL, TNO). La version finale de la base Artemis contient des données d'environ 3000 voitures particulières et véhicules utilitaires légers mesurées entre 1980 et 2004. Pour ces véhicules, quelque 28 000 tests ont été effectués avec des centaines de cycles de conduite différents, regroupant environ 180 000 facteurs d'émission (en g/km) pour les polluants réglementés et non réglementés (environ 400).

II.2.3.2. Cycles de conduite ARTEMIS

Antérieurement, la plupart des laboratoires précités ont développé leurs cycles de conduite propres pour caractériser au mieux les conditions de circulation des voitures particulières.

L'hétérogénéité de ces cycles a rendu leur exploitation inappropriée pour l'estimation des émissions de polluants à l'échelle européenne (Joumard, André et al. 2000). Une harmonisation de ces cycles de conduite a été nécessaire et a vu le jour dans le cadre du projet de recherche Artemis.

La méthode de construction des cycles Artemis (André 2004) est similaire à celle des projets de recherche européens précédents. Elle comprend les étapes suivantes (Figure II.19):

- Observation des usages de véhicules dans des conditions réelle de circulation, grâce à l'instrumentation et la surveillance d'un échantillon représentatif de 60 voitures européennes privées ayant couvert 73 000 km de route dans des conditions d'utilisation habituelles.
- Description des conditions de conduite à travers l'analyse des profils de vitesse enregistrés.
- Répartition des conditions de conduite par classes d'accélération (15 classes principales caractéristiques d'un type de trajet).
- Caractérisation des usages des véhicules tels que les conditions de démarrage (froid, chaud) et l'utilisation de la boîte de vitesses.

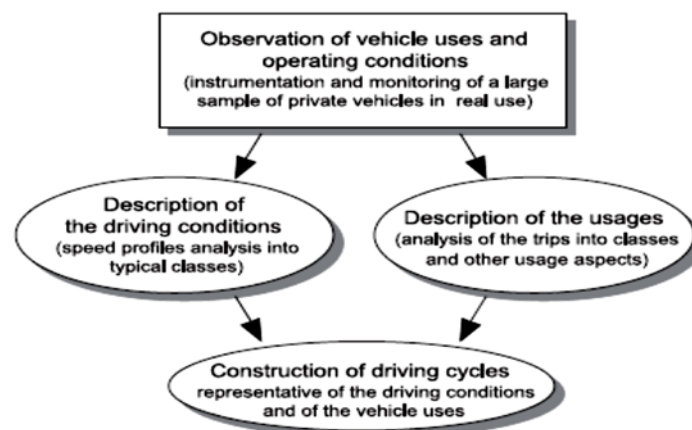


Figure II.9: Principales étapes de construction de cycles de conduite (André 2004).

Un ensemble de cycles Artemis de type urbain, rural et autoroutier a été développé comme méthode de référence pour l'évaluation des émissions réelles (Figure II.10).

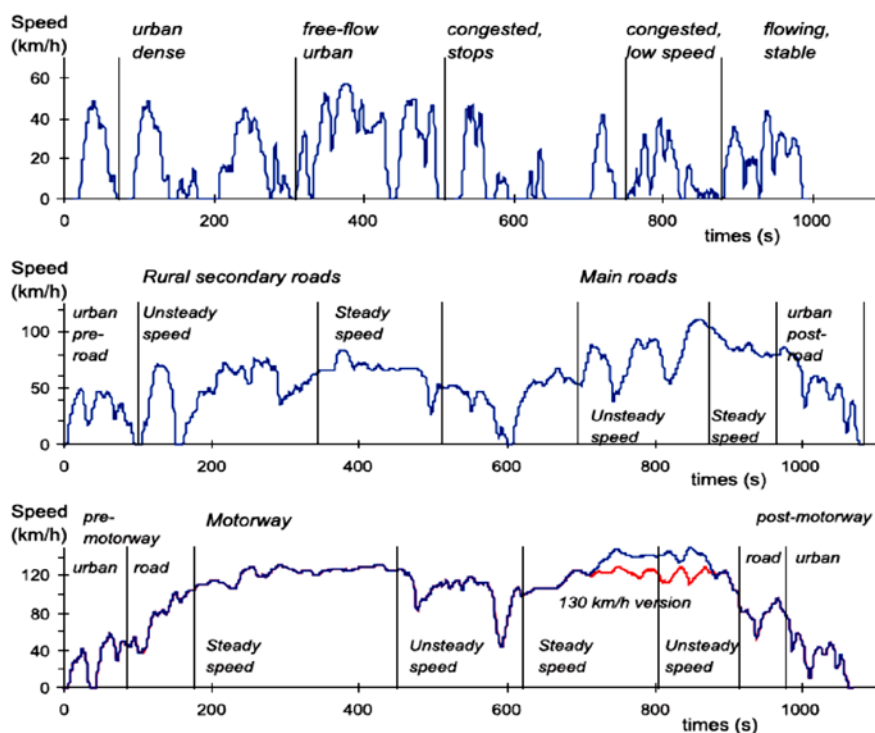


Figure II.10: Structure typique de conditions de circulation réelles observées dans les 3 cycles Artemis urbain, rural et autoroutier (André 2004)

II.2.3.3. Facteurs d'émission de polluants d'ARTEMIS

Pour le calcul des émissions unitaires à chaud des véhicules légers dans le cadre du projet Artemis, deux modèles ou deux approches statistiques distinctes sont proposées en vue d'exprimer les émissions unitaires sous forme d'équations en fonction de la vitesse moyenne.

II.2.3.3.1. Modèle 1

Ce premier modèle est basé sur le regroupement de données d'émissions récoltées à partir de la base LVEM (Light Vehicle Emission Measurement) d'Artemis regroupant plusieurs laboratoires tels que mentionnés en annexe 5 (Joumard, André et al. 2007). Seuls les cycles représentatifs des conditions de conduite réelle sont pris en compte. En raison du faible nombre de données disponibles à certains niveaux de vitesse et afin d'éviter la surpondération de points de vitesse spécifiques avec un nombre élevé de données, les données d'émission ont été moyennées par tranche de vitesse de 10 km/h, c'est à dire de 0-10 km/h, de 10 à 20 km/h et ainsi de suite jusqu'à 130 km/h ou plus. Chaque émission moyenne est donc associée à une classe de vitesse moyenne de 5 à 135 km/h (Joumard, André et al. 2007).

Le calcul des émissions liées à ce modèle s'obtient à partir de l'équation généralisée de la forme :

$$y_i = \frac{a+c.x+ex^2}{1+b.x+d.x^2} + \frac{f}{x} \quad \text{éq. (II.2)}$$

où :

y : Facteur d'émission du polluant i (CO, NO_x et HCT) en g/km.

x : Vitesse moyenne en km/h

a à f : Coefficients.

La caractéristique de cette équation est sa capacité à reproduire les fortes émissions qui ont été observées dans certains cas à basses et hautes vitesses, en raison de la faible efficacité du catalyseur aux vitesses extrêmes.

L'annexe 6 regroupe l'ensemble des fonctions d'émission des véhicules essence et Diesel (Euro 1 à Euro 3) de la base Artemis. La figure II.11 est un exemple d'illustration de cette annexe pour les émissions de NO_x des véhicules à essence.

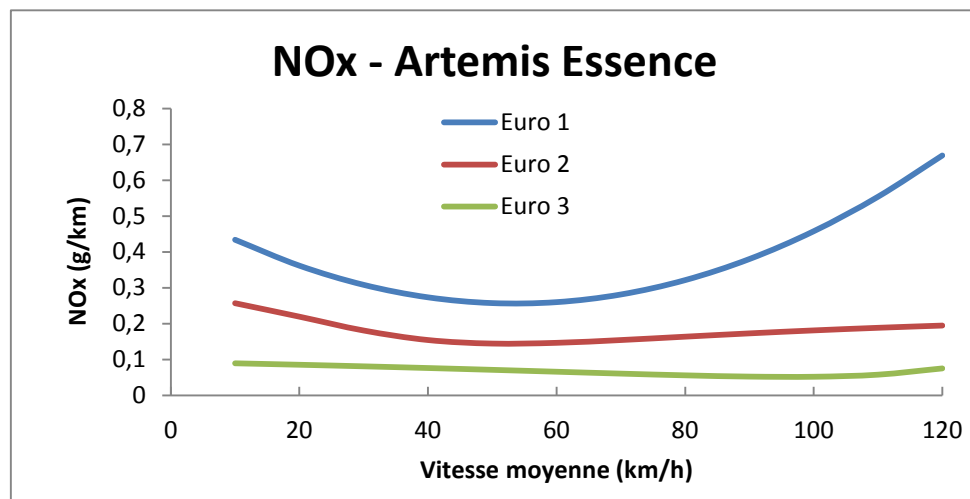


Figure II.11: Variation des émissions de NO_x selon la norme Euro pour les véhicules essence de la base Artemis (Joumard, André et al. 2007).

II.2.3.3.2. Modèle 2

Ce modèle a été conçu à partir d'une série de typologies types de circulations réelles. A cet effet, il a été mis en place une répartition des conditions de conduite par classe d'accélération (André 2004, Joumard, André et al. 2007). Les cycles pris en compte ont été décrits sous forme de représentation de l'accélération en fonction de la vitesse instantanée. L'analyse binaire en composantes principale a permis de dégager 15 classes ou types de conduite dénommées RTP (Reference Test Patterns en anglais) qui rassemblent des sous-ensembles de cycles de conduite homogènes tel que représentés en figure II.12a. Les caractéristiques cinématiques de ces typologies sont indiquées dans le tableau A.7.1 de l'annexe 7.

Le modèle 2 permet le calcul des facteurs d'émissions à l'aide de fonctions polynomiales décrites dans le tableau A.7.2 de l'annexe 7.

La figure II.12b donne un exemple des émissions du polluant NO_x correspondant aux 15 typologies de conduite pour les véhicules essence de la norme Euro 0 ou pré Euro, conformément aux valeurs du tableau A7.3 de l'annexe 7.

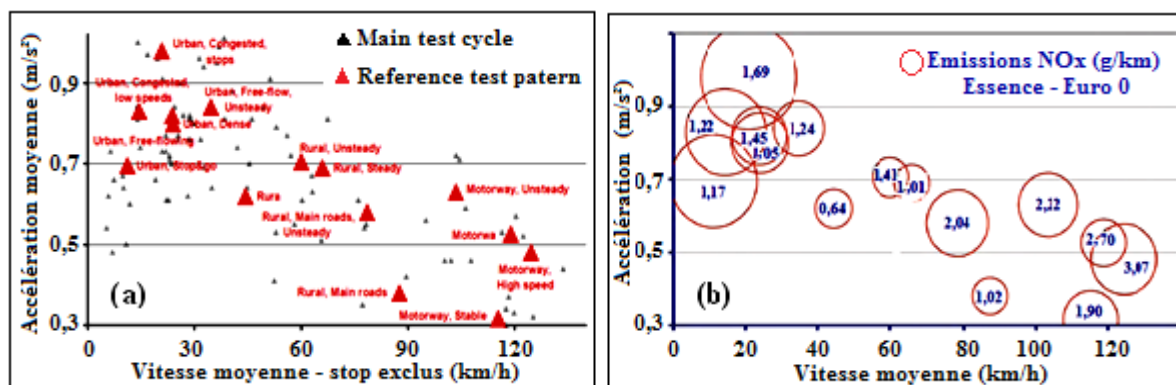


Figure II.12: Variabilité des cycles de conduite répartis en 15 typologies de circulation (a) et variations correspondantes des émissions de NO_x des véhicules Essence (Euro 0) (b) (Joumard, André et al. 2007)

Le modèle 1 est plus pratique à utiliser, car les paramètres d'entrée sont des paramètres moyens (la vitesse moyenne), mais il a le plus mauvais coefficient de corrélation sur l'ensemble des émissions. Le modèle 2 est plus performant, donc plus représentatif, mais plus complexe du fait qu'il y a lieu de prendre en compte les différentes situations de trafic en termes d'accélération et de temps d'arrêts.

Ces deux modèles d'émissions nous permettront de comparer les émissions de notre échantillon de véhicules effectuées lors de la campagne de mesure avec la base de véhicules Artemis et dont la méthodologie sera détaillée dans le chapitre suivant.

II.2.3.4. Entretien maintenance des véhicules

De nos jours, il ne suffit pas d'établir des normes d'émissions pour les véhicules neufs pour établir un contrôle effectif de leurs émissions. Les opérations d'inspection et de maintenance des véhicules sont devenues nécessaires pour s'assurer que les avantages des technologies de contrôle des émissions ne soient pas perdus par manque d'entretien des véhicules. L'Algérie a pour sa part débuté cette mission en 2003, suite à l'Arrêté ministériel n°2000 du 31 décembre 2000 fixant les règles d'organisation du contrôle technique et les conditions d'agrément des contrôleurs techniques de véhicules automobiles. Le premier objectif de cette mission dirigée actuellement par l'organisme ENACTA (Entreprise Nationale de Contrôle Automobile) était

de limiter le nombre d'accidents sur les routes, où pour triste mémoire, l'Algérie est classée au 4^{ème} rang des pays affectés par les accidents de la route, avec plus de 4500 personnes tuées en 2013. Si la prise en charge des accidents de la circulation représente 25% du budget de la santé publique (Panapress 2003), elle correspondrait pour l'année 2012 à 1,31% du PIB, les dépenses totales en santé étant évaluées à 5,25% du PIB pour cette même année (ÉPA 2012).

Le contrôle technique périodique et obligatoire des véhicules automobiles est donc une disposition destinée à assurer le bon état d'entretien et de fonctionnement des véhicules routiers à travers des visites d'inspection périodiques.

A titre indicatif, les statistiques relatives au contrôle technique des véhicules en Algérie durant la décennie 2003-2013 sont résumées ci-après :

- Nombre de stations de contrôle technique : 307
- Nombre de stations mobiles : 3
- Stations fixes en cours d'agrément : 107
- Nombre de véhicules légers contrôlés: 2 076 082
- Nombre de véhicules lourds contrôlés: 549 250
- Nombre de contre visite de véhicules légers : 767 000
- Nombre de véhicules à réformer : 217 780

Le règlement de l'ENACTA stipule que le contrôle technique des émissions sera effectué au moyen d'un analyseur de CO, utilisé pour la mesure directe des concentrations des gaz émis à l'échappement, d'un modèle approuvé par le Ministère de l'industrie et des mines.

Toutefois le contrôle technique peut manquer son objectif pour des véhicules récents, quand des défauts dans les systèmes de gestion du moteur et de contrôle des émissions sont difficiles à diagnostiquer avec des méthodes d'inspection simples, sachant que ces défauts peuvent provoquer des augmentations drastiques dans les émissions d'un véhicule en conditions de circulation réelle sur route (Samaras, Zachariadis et al. 2001).

Outre les mesures non réglementaires telles que la télédétection et les mesures dans les tunnels pour identifier les véhicules gros émetteurs de polluants, l'usage de PEMS peut contribuer grandement au programme de maintenance des véhicules en ciblant l'origine des imperfections des systèmes de contrôle des véhicules (pot catalytique, filtre à particules, sonde à oxygène, etc.). Ainsi des études ciblées menées avec des PEMS sur des taxis (Euro 0 à Euro 4) roulant à l'essence (Huo, Yao et al. 2012), au Diesel (Hu, Wu et al. 2012) et au GPL (Lau, Hung et al. 2011) ont permis de déceler des véhicules gros émetteurs de polluants, y compris des véhicules Euro 4, dénotant des défaillances de maintenance. Aussi des mesures coercitives envers les

véhicules gros émetteurs de polluant dans les centres urbains par les pouvoirs public seraient louables pour la préservation de la santé publique.

II.3. Conclusion

Le développement de facteurs d'émission précis grâce aux différents modèles d'émission des véhicules routiers (tels que COPERT, EMFAC, HBEFA, PHEM, MOVES, ARTEMIS, etc...) nécessite des tests rigoureux pour couvrir de manière adéquate tous les types de véhicules en concordance avec les progrès technologiques et les conditions représentatives de conduite d'une circulation réelle. Les méthodologies mises en œuvre se doivent d'être sans cesse améliorées pour refléter avec précision les émissions de polluants dues au trafic routier.

Les techniques de mesure des émissions sur châssis dynamométrique et banc moteur resteront pour les années à venir les principales sources de données expérimentales qui alimenteront les modèles d'émission des véhicules. Cependant, en raison de leur limitation à reproduire tous les paramètres inhérents à la conduite réelle et en dépit de l'utilisation de cycles de conduite réels, ces techniques de laboratoire sont progressivement accompagnées de techniques de mesures sur route telles que les PEMS et la télédétection. Ces dernières, qui ont connues un développement important ces dernières années se sont révélées être des sources précieuses de données tant dans la modélisation des facteurs d'émission, leur validation, la caractérisation des tendances d'émission avec la nature du trafic, l'identification des gros émetteurs et l'évaluation de l'influence des conditions de conduite réelle sur le profil des émissions des véhicules et la formation de polluants secondaires. L'exploitation de cette panoplie de techniques contribuera à renforcer la qualité des modèles d'émission et à la réalisation des objectifs environnementaux à long terme.

Notre travail qui porte sur l'estimation expérimentale des FE d'un échantillon supposé représentatif du parc de véhicules légers algérien constitué en grande partie de véhicules européens, nous ferons une comparaison des résultats des FE obtenus avec ceux de la base européenne ARTEMIS, qui utilise deux modèles pour le calcul des FE. Le premier modèle est basé sur l'exploitation de cycles représentatifs des conditions de conduite réelle où la vitesse moyenne est le principal paramètre pris en compte. Le second modèle est conçu à partir d'une série de typologies types de circulations réelles avec une répartition des conditions de conduite par classe d'accélération.

Chapitre III : Méthodologie expérimentale

Des mesures d'émissions de polluants à l'échappement sont effectuées par mini-CVS sur un échantillon de 17 véhicules avec l'enregistrement de la cinématique et l'analyse des quatre polluants règlementés : CO₂, CO, HCT, NO_x. Des études préliminaires de choix des circuits urbains dans la ville de Blida et de validation des mesures cinématiques par GPS ont précédé la campagne de mesure.

On passera en revue la méthodologie de calcul des facteurs d'émission unitaires de polluants, ainsi que les différentes procédures de tests réalisés comme suit : avec moteur tournant au ralenti à chaud, en circulation réelle en milieu urbain, suburbain et autoroutier et enfin des mesures d'émissions sur route à différentes vitesses stabilisées.

III.1. Echantillon de véhicules testés

L'échantillon de véhicules que nous avons testés est composé de 17 véhicules légers appartenant à des particuliers et répartis selon le tableau III.1 entre 6 véhicules à essence, 4 véhicules Diesel et 7 véhicules à bicarburation essence/GPL. Les véhicules sont choisis pour être représentatifs du parc roulant en termes de marque, cylindrée et âge. Tous ces véhicules appartiennent à des particuliers de différentes couches sociales et activités professionnelles. Ils constituent leur bien propre et sont utilisés aussi bien pour un usage professionnel que personnel.

A titre de comparaison avec notre échantillon de véhicule, le tableau III.2 rassemble la liste des véhicules du projet ARTEMIS arrêtée au 1^{er} décembre 2004 et sur lesquels ont porté les mesures des facteurs d'émissions unitaires de polluants.

Tableau III.1 : Caractéristiques et classification de l'échantillon de véhicules testés

Marque	Modèle	Carburant	Année	Cylindrée (cm ³)	Puissance (kW)	Catalysé	Kilométrage (x 1000 km)
Volkswagen	Golf	Essence	1989	1300	40	non	n.d
Toyota	Echo	Essence	2004	1497	79	non	82
Dacia	Logan	Essence	2006	1400	55	oui	82
Toyota	Yaris Sedan	Essence	2008	1298	78	non	110
Renault	Symbol	Essence S/Pb	2009	1390	55	oui	5
Toyota	Yaris Sedan	Essence	2011	1298	78	non	9
Renault	Symbol	Essence S/P et GPL	2011	1390	55	oui	10
Chevrolet	Aveo	Essence et GPL	2004	1498	63	non	179
Chevrolet	Aveo	Essence et GPL	2006	1498	63	non	145
Chevrolet	Aveo	Essence et GPL	2007	1498	63	non	61
Chevrolet	Aveo	Essence et GPL	2008	1498	85	non	28
Chevrolet	Optra	Essence et GPL	2010	1598	79	non	30
Chevrolet	Aveo	Essence et GPL	2010	1498	63	non	67
Renault	Clio	Diesel	1998	1870	48	oui	405
Renault	Scenic	Diesel	2002	1870	77	oui	25
Toyota	Corolla	Diesel	2004	1995	85	oui	177
Ford	Fiesta	Diesel	2010	1398	50	oui	29

¹nd : non déterminé.

Tableau III.2 : Base de données véhicules par norme standard d'émission et par type de carburant utilisée pour le projet ARTEMIS (André 2005)

Norme standard d'émission	Type de carburant				
	Bio-Diesel	GNC	Diesel	Essence	Total
pré-Euro 1			2	7	9
Euro 1			4	7	11
Euro 2			30	32	62
Euro 3	2	1	16	42	61
Euro 4		1		9	10
Total	2	2	52	97	153

III.2. Mesures de cinématique

La sensibilité des émissions de polluants à la vitesse de conduite est démontrée en utilisant les fonctions d'émission actuellement disponibles dans la littérature (André and Hammarström 2000, Joumard, André et al. 2007, Jung, Lee et al. 2011). Une connaissance précise et détaillée des vitesses réelles de conduite est alors fondamentale pour les estimations et les inventaires d'émissions.

Pour les mesures d'émissions sur route, nous disposons d'une instrumentation de mesure de cinématique composée d'un cinémomètre à effet doppler et d'un GPS. Ces deux appareils étant disponibles pour nos besoins, une étude comparative d'aptitude du GPS à recueillir des données de cinématique est faite par rapport au cinémomètre utilisé comme appareil de référence, car plus précis mais plus encombrant avec risques de dommages encourus lors des mesures sur route (Figure III.3).

Des tests cinématiques de comparaison y sont effectués en hauteur sur la route de Chréa située au piémont de la ville de Blida, à 50 km d'Alger. Nous avons opté pour ce circuit de sorte à être dans les conditions de mesure les plus défavorables avec la sinuosité et la dénivellation de la route (Figure III.1). La distance du circuit relevée sur le compteur du tableau de bord d'une Renault Mégane est de 3,4 km.



Figure III.1 : Circuit des mesures cinématiques en pente sur la route de Chréa (Blida)

III.2.1. Mesures par cinémomètre

La vitesse de roulage du véhicule en circulation est enregistrée avec un cinémomètre fonctionnant avec le principe d'effet Doppler. La figure III.2 montre le principe de fonctionnement qui consiste à émettre une onde inclinée par rapport au vecteur vitesse du véhicule. Celle-ci est réfléchi à une fréquence qui varie selon le déplacement du véhicule. La variation de la fréquence de l'onde émise et réfléchi est proportionnelle à la vitesse du véhicule.

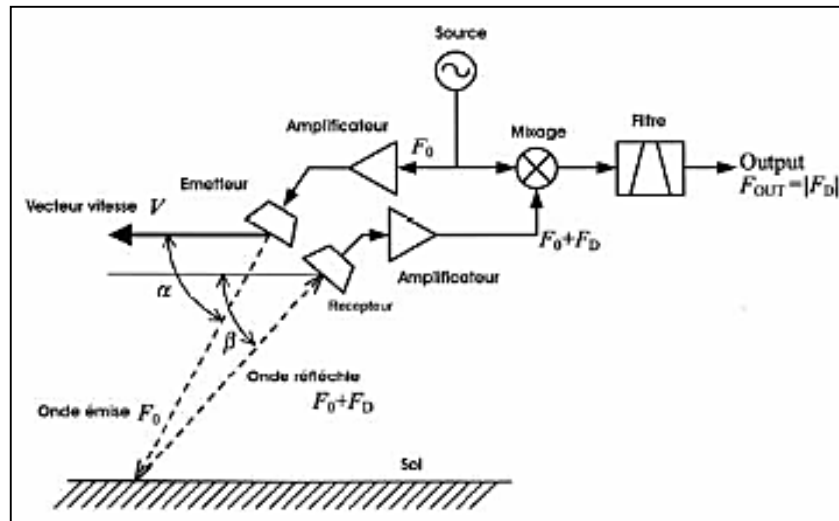


Figure III.2 : Principe de mesure de la vitesse par effet Doppler (Boughedaoui 2007)

Les mesures de cinématiques sont réalisées par un cinémomètre étalonné type DRS-6/1aa de marque BS2 Multidata GmbH à effet Doppler (Figure III.3). Il est utilisé pour mesurer la vitesse du véhicule le long du circuit emprunté 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. Son inconvénient majeur, outre son prix élevé, est qu'il doit être associé à une centrale d'acquisition pour l'enregistrement des vitesses tout au long du circuit de mesures. Par ailleurs ce type d'appareil, qui se fixe sur la porte avant du véhicule, ne permet pas la localisation de ce dernier au moment de la mesure.

La centrale d'acquisition utilisée dénommée DTL1232 Datalogger est un enregistreur autonome. Une batterie interne rechargeable assure l'alimentation de l'appareil, la sauvegarde des données et le programme de configuration.

Le dialogue avec la centrale d'acquisition (Figure III.4) est effectué avec un ordinateur portable par l'intermédiaire de son logiciel Logwin fonctionnant sous Windows. Le logiciel offre la possibilité de visualiser les paramètres enregistrés sur l'écran du PC.



Figure III.3: Cinémomètre à effet Doppler Type DRS-6/1aa BS2 Multidata

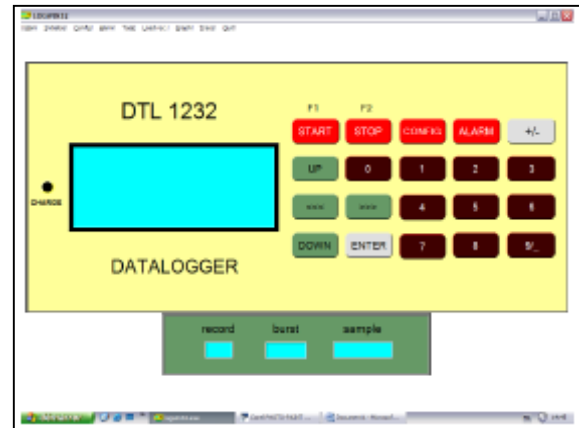


Figure III.4 :Interface PC Logwin de la centrale d'acquisition DTL 1232

III.2.2. Mesures par GPS

Pour pallier aux inconvénients précités du cinémomètre, un appareil GPS (Global Positioning System ou Géo Positionnement par Satellite) de la marque RoyalTek (Modèle RTB 300) a été testé. Celui-ci est non seulement moins cher qu'un cinémomètre mais moins encombrant (Figure III.5). De dimension 72x42x25mm, il tient dans une main et peut donc être placé discrètement dans la boîte à gants du véhicule. Sa batterie a une autonomie de 6h. Il est équipé d'un chargeur branché sur l'allume cigare du véhicule. En revanche il présente certains inconvénients de géolocalisation, tels que son inefficacité dans les tunnels et trémies, aux abords de voies étroites bordées par des immeubles élevés.



Figure III.5 : Bluetooth GPS RBT-2300

Outre sa fonction de géolocalisation, le GPS utilisé permet la mesure de la vitesse des véhicules en déplacement et leur position en altitude. La position en surface, la vitesse et le temps sont déterminées avec des précisions respectives de 10m, 0,1m/sec et 1microseconde. Il a une capacité d'enregistrement de 400 000 positions avec une incrémentation temporelle atteignant la seconde (réglable de 1 à 60 secondes). Les données enregistrées sous forme de trame NMEA de type GGA et RMC (voir annexe N°4) sont téléchargées par connexion Bluetooth sur ordinateur portable. Le dépouillement de ces données au moyen du tableur Excel permettra de tirer les informations de cinématique indispensables à notre étude.

III.3. Choix des circuits de mesure

La wilaya de Blida sur laquelle a porté notre étude est caractérisée par une multitude de réseaux routiers jouxtant le chef-lieu de Wilaya et une forte activité du trafic automobile.

L'agglomération de Blida, y compris les communes adjacentes, compte environ 800 000 habitants et est située à 50 km au sud de la capitale Alger. La topographie de la ville présente une pente moyenne de 1,5%. Blida est le chef-lieu de la wilaya avec de nombreuses administrations publiques, et abrite de nombreuses activités industrielles, agricoles et commerciales. Le parc de véhicules de tourisme de la wilaya de Blida représente 5,8% du parc total national (données de l'ONS au 31/12/2013), soit le deuxième parc après la wilaya d'Alger (30%).

Pour le choix des circuits en milieu urbain, une étude préliminaire a été faite durant le mois de mars 2010, sur la base d'enregistrements cinématiques par GPS effectués par un véhicule suiveur dans le trafic de la ville de Blida. Le principe de cette méthode consiste à suivre avec un équipement GPS, un véhicule inconnu de manière aléatoire. Le conducteur professionnel aura à s'adapter à toutes les situations de la circulation pour suivre un véhicule inconnu tant que celui-ci n'aura pas quitté le périmètre de la commune de Blida. En cas de stationnement du véhicule suivi, le conducteur fera de même en attendant de cibler aléatoirement un autre véhicule, par exemple en repérant un véhicule ayant le dernier chiffre de la plaque d'immatriculation préalablement choisi (entre 0 et 9). Ainsi, par cette méthode, 75 véhicules ont été suivis aléatoirement par un même véhicule et un même chauffeur à travers les artères de la ville de Blida (Figure III.6).



Figure III.6 : Ensemble des trajets de 75 véhicules suivis dans la commune de Blida

Le tableau III.3 donne les résultats des principales artères fréquentées selon le nombre de passages dans la ville de Blida par les 75 véhicules suivis. Sur cette base de données, 3 types de circuits urbains (dense, congestionné, et fluide de 2.7, 3,1 et 2.4 km respectivement) représentatifs de la ville (Figure III.7) ont été adoptés pour les mesures d'émission en circulation réelle.

Tableau III.3 : Résultats des artères les plus fréquentées de la commune de Blida

Artères principales	Nombre de passages	Artères principales	Nombre de passages
Axe Stade Tchaker - Zabana	17	Sidi Yacoub - Beb Essebt	7
Bd Larbi Tebessi	17	Route d'Alger	7
Bd Amara Youcef -	16	Passage Hôtel des finances	5
Route de la Chiffa	15	Passage Clinique Ferroudja	4
Bd Mohamed Boudiaf	11	Passage Cité Benboulaïd	4
Avenue du 1 ^{er} Novembre 1954	9		

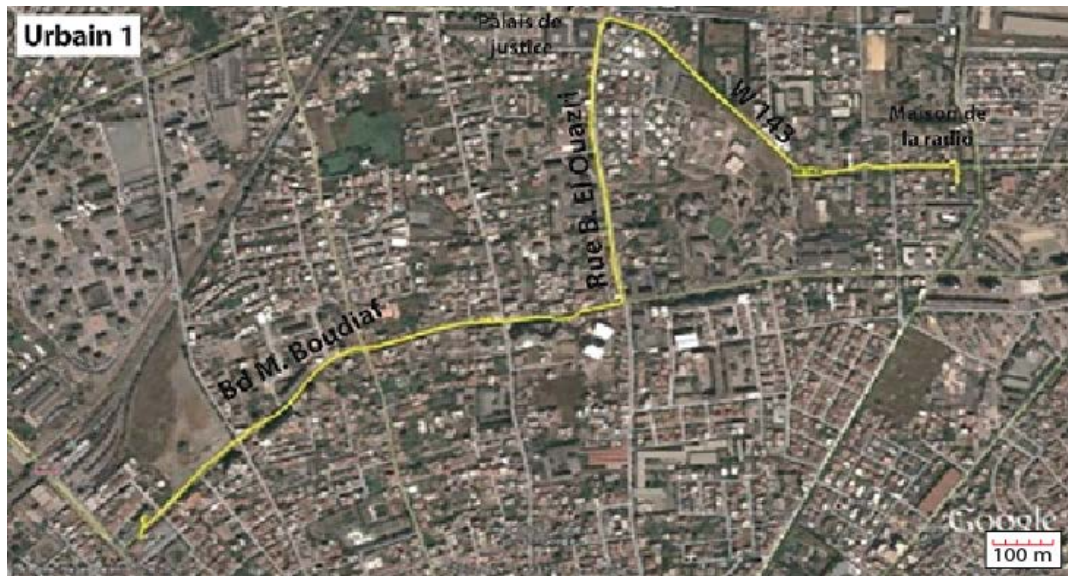


Figure III.7: Les 3 circuits urbains adoptés pour la mesure sur route (2,7 ; 3,1 et 2,4 km)

Afin d'exploiter toutes les gammes de vitesses de roulage pour les mesures d'émissions sur route, deux circuits suburbains et deux autoroutiers ont été sélectionnés à la périphérie de la ville de Blida.

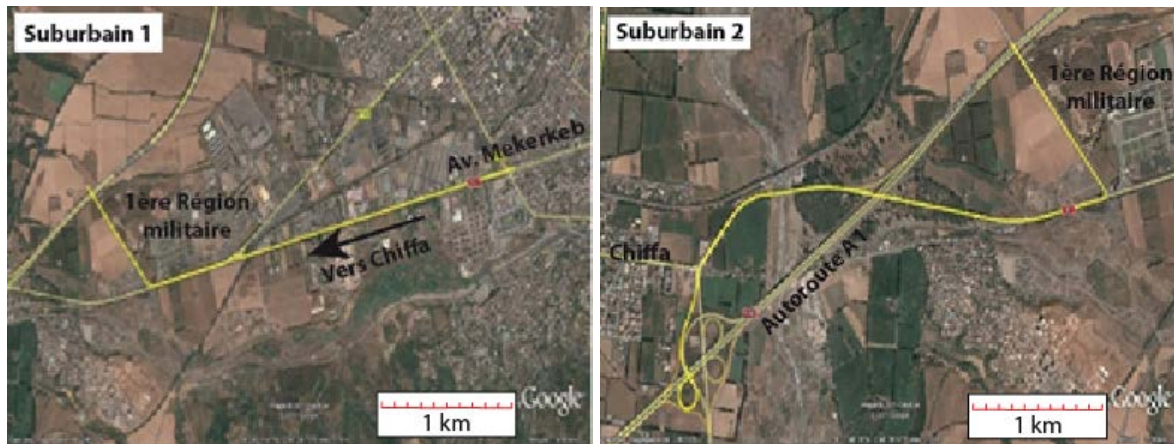


Figure III.8: Les 2 circuits suburbains adoptés pour la mesure sur route (4.2 km)

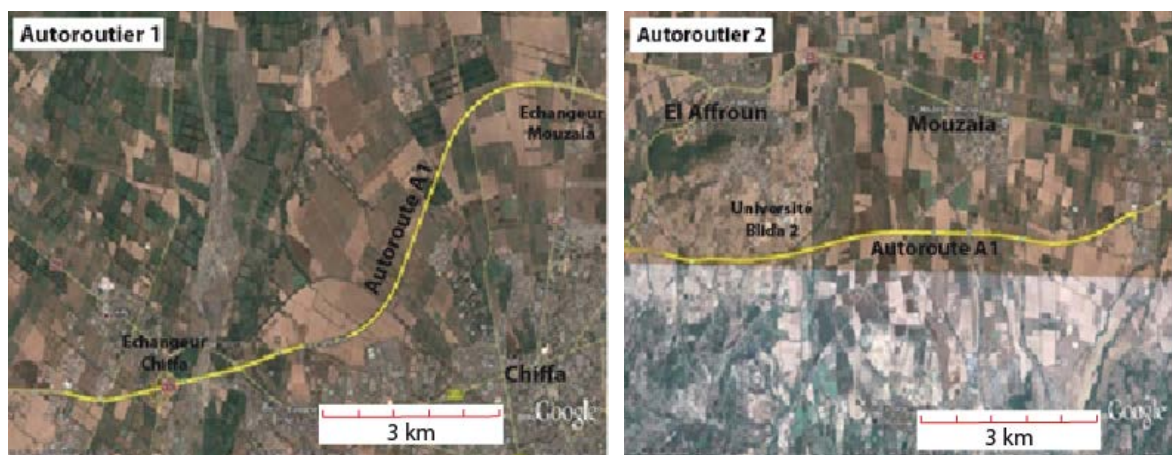


Figure III.9: Les 2 circuits autoroutiers adoptés pour la mesure sur route (7.9 et 11 km)

III.4. Dispositif de prélèvement des échantillons

La technique d'échantillonnage de gaz d'échappement utilisée est celle du mini-CVS (Constant Volume Sampling) basée sur le principe de prélèvement à débit constant (discuté dans la section II.1.2.2. : systèmes de mesures en embarqué). Cette technique éprouvée et récemment développée par Boughedaoui (Boughedaoui, Kerbach et al. 2008), diffère de ses prédécesseurs (Potter 1987, Van Ruymbeke, Guitton et al. 1993) par l'analyse in-situ des gaz d'échappement à l'aide d'une batterie d'analyseurs de gaz règlementés montés sur des véhicules utilitaires légers. Pour notre étude et en raison de l'exiguïté de l'habitacle des véhicules légers composant

notre échantillon, seul l'échantillonneur de gaz (min-CVS) sera monté à bord du véhicule, les analyses étant faites au laboratoire à la fin de chaque essai.

III.4.1. Principe de fonctionnement du mini-CVS

Le mini-CVS dont le montage expérimental est représenté schématiquement en figure III.10, est un système de prélèvement similaire mais réduit et simplifié du système CVS. Il est embarqué à bord du véhicule et est relié au tuyau d'échappement.

Les gaz d'échappement rejetés par le véhicule passent dans un embout sous forme de cône attaché au pot d'échappement, formé de 112 tubes parallèles et dont les débits sont estimés égaux. Seuls les gaz d'un tube sont amenés dans une chambre de mélange pour être dilués avec de l'air ambiant. Un ensemble de 6 pompes connectées en parallèle prélève l'échantillon de gaz dilué dans la chambre de mélange. Une fraction de l'échantillon prélevé par une 7^{ème} pompe indépendante dont on règle le débit à 5 l/min (débit moyen qui permet de remplir suffisamment le sac durant l'essai) est stockée dans un sac en Tedlar de 70 litres. L'excédent de gaz est rejeté après être passé par un compteur à gaz volumétrique. Une 8^{ème} pompe indépendante peut être actionnée pour la collecte de l'air ambiant dans un 2^{ème} sac pour être analysé. Pour s'assurer que cette prise d'air ambiant servant à la dilution ne soit pas polluée par les gaz d'échappement, la prise de celui-ci est positionnée du côté opposé du tuyau d'échappement sur lequel est placé l'embout.

Les sacs remplis sont transférés au laboratoire immédiatement à la fin de chaque circuit pour l'analyse des concentrations en CO, CO₂, HCT et NO_x. Au début de chaque essai, les sacs sont préalablement vidés de leur contenu, en actionnant la manette "Evacuation" du mini-CVS.

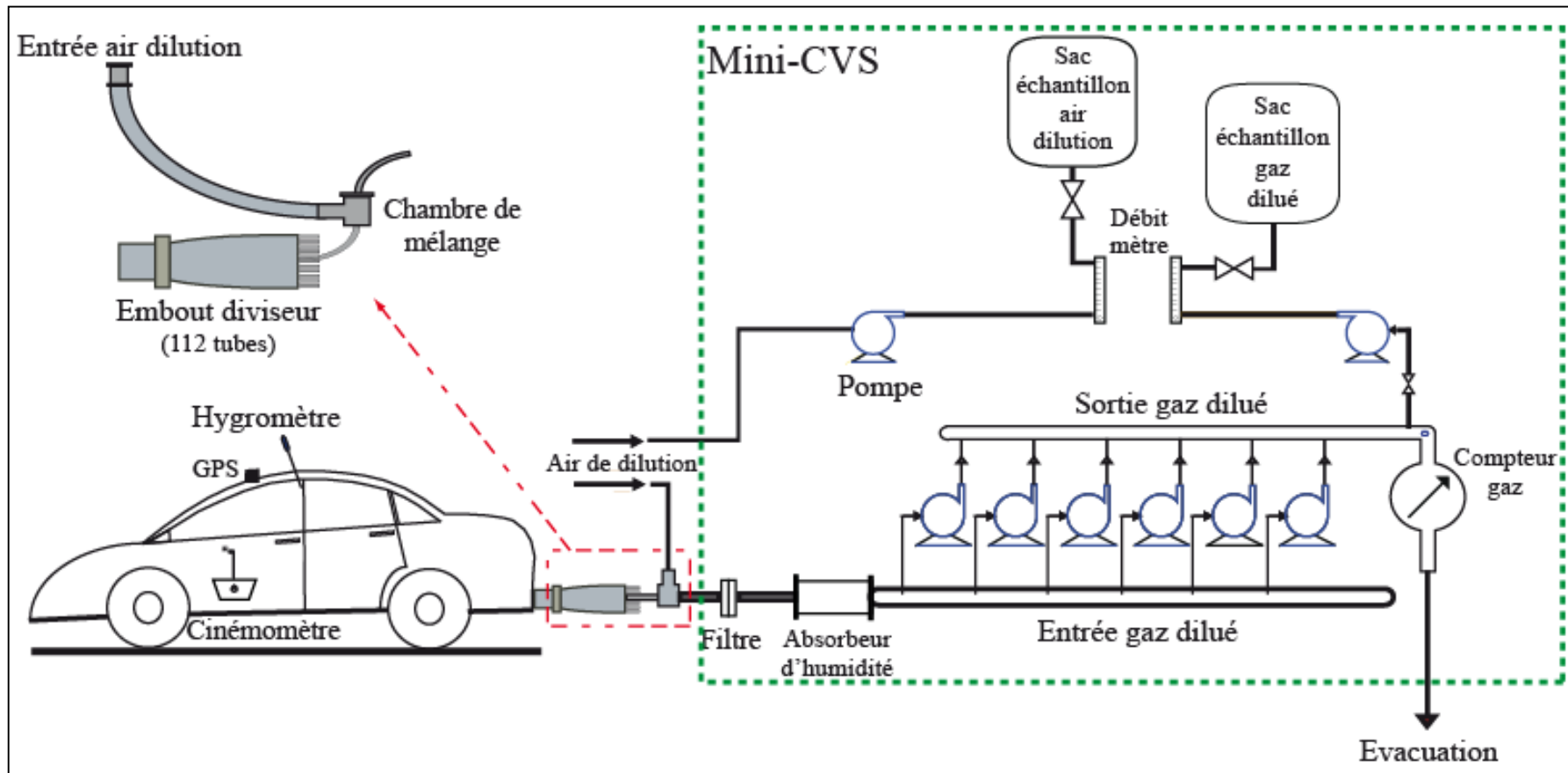


Figure III.10 : Schéma du montage expérimental de prélèvement embarqué sur véhicule

III.4.2. Alimentation électrique

Le montage réalisé nécessite une autonomie électrique suffisante afin d'effectuer les mesures d'émissions sur des trajets multiples. Aucun branchement électrique n'est effectué sur la batterie du véhicule afin d'éviter toute influence sur la charge du moteur. L'énergie électrique est alors fournie par une batterie 12 V de forte capacité (220 Ah et 35 kg) utilisée pour alimenter les huit pompes du mini-CVS fonctionnant en tension continue avec une intensité totale maximale de 32 A.

Des tests d'autonomie effectués au laboratoire sur la batterie indiquent (Figure III.11) que le mini-CVS à un mode de fonctionnement stable pendant 6 heures et demi avec les 8 pompes en marche (débit volucompteur inchangé de 2300 l/h). En deçà de 11,5 Volts, la batterie n'assure plus la stabilité du débit et donc doit être rechargée. L'énergie fournie par la batterie permet donc de couvrir une journée de tests, de sorte que sa recharge soit assurée durant la nuit pour les essais du jour suivant.

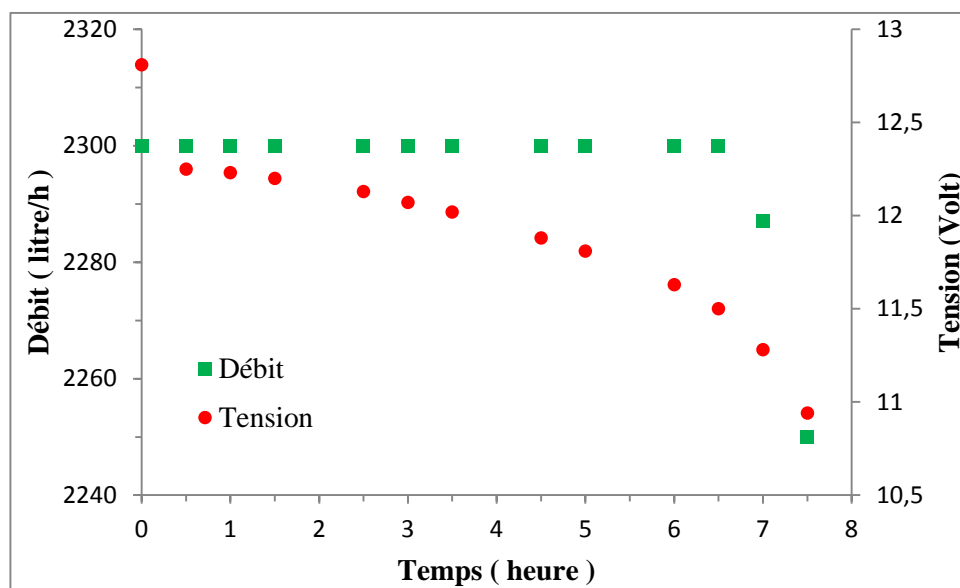


Figure III.11 : Etat de la stabilité du débit total du mini-CVS en fonction du temps

III.5. Analyse des polluants

III.5.1 Analyse des oxydes de carbone

L'analyse du monoxyde et du dioxyde de carbone (CO, CO₂) est effectuée par la technique d'absorption de rayonnement infrarouge non dispersif (NDIR), avec un appareil de marque COSMA- Environnement SA, type Cristal 300 dont la précision est de 1,5% sur la pleine échelle avec un temps de réponse de 1 s.

Les oxydes de carbone sont détectés grâce à un rayonnement infrarouge de longueur d'onde caractéristique de chaque gaz, qui traverse une cellule contenant l'échantillon de gaz à analyser. La présence de CO ou de CO₂ dans l'échantillon atténue l'intensité de ce rayonnement par rapport à une cellule de référence, ce qui permet de mesurer son niveau d'absorption. Les concentrations de CO et CO₂ sont déterminées grâce à l'étalonnage de l'appareil par des gaz étalons de concentrations connues (voir tableau III.4).

III.5.2 Analyse des oxydes d'azote

L'analyse des oxydes d'azote (NO_x) est effectuée par la technique de chimiluminescence avec un appareil de marque COSMA- Environnement SA, type Topaze 3010 mono chambre avec 1% de précision de l'étendue de mesure et un temps de réponse inférieur à 3 secondes. Cet analyseur mono chambre permet la détermination alternée des concentrations de NO ou de la somme de celles de NO et NO₂ désignée par NO_x

Le principe de l'analyse par chimiluminescence est basé sur le fait que certaines molécules portées à un état excité par une réaction chimique retournent à l'état fondamental en restituant une partie de l'énergie sous forme d'émission de lumière et dont l'intensité est proportionnelle à sa concentration. Le phénomène utilisé ici est la chimiluminescence du monoxyde d'azote avec l'ozone.

La méthode utilise préalablement la conversion de NO en NO₂* par de l'ozone produit in situ par une décharge à haute tension. Les molécules de NO₂ présentes dans l'échantillon sont décomposées en NO par voie thermique dans un four à molybdène à 300-400 °C. L'ensemble des molécules de NO est alors oxydé par l'ozone pour former des molécules de dioxyde d'azote à l'état excité NO₂*. Leur retour à l'état normal s'accompagne d'une émission lumineuse de photons lors de leur désexcitation dans la bande 0,6 à 3 μm. Le résultat de l'analyse est linéairement proportionnel à la quantité de NO ayant réagi grâce à un détecteur photomultiplicateur. Les réactions mises en jeu sont :



L'ozone est produit à l'intérieur de l'analyseur à partir d'une bouteille d'air reconstitué pur. Dans le cas de mesures de forte teneurs en NO_x (> 1000 ppm), l'air doit être substitué par de l'oxygène en bouteille détendu à 0.2 bar maximum.

Le passage par le four ou le bypass de l'appareil permet de sélectionner la mesure des NO_x ou du NO respectivement.

L'analyseur possède deux séries de gammes de mesures : basse teneur (100, 1000 ppb, 10 et 100 ppm) et haute teneur (10, 100, 1000 et 1000 ppm).

III.5.3 Analyse des hydrocarbures

Les hydrocarbures totaux (HCT) sont déterminés par la technique de détection à ionisation de flamme (FID), avec un appareil de marque Cosma-Environnement SA, type Graphite 730 avec 1% de précision de l'étendue de mesure et un temps de réponse inférieur à 3 s.

Le principe de cette analyse est l'ionisation des molécules d'hydrocarbure dans une flamme d'hydrogène où le nombre d'ions formés sera détecté sous forme d'un courant électrique entre une électrode et le brûleur, constituant la seconde électrode. Le courant qui s'établit est proportionnel au nombre d'atomes de carbone présents dans les produits hydrocarbonés contenus dans le gaz à analyser. Il s'agit donc d'une mesure de masse de carbone total sans distinction de la nature des hydrocarbures.

Pour l'analyseur Graphite 730, l'air synthétique est utilisé comme air comburant et aussi comme gaz de zéro pour l'étalonnage. Le mélange hydrogène / hélium (40/60%) est utilisé comme combustible. L'opérateur peut effectuer des mesures alternées automatiques ou manuelles des HC totaux, du méthane et des HC non méthaniques par différence. L'analyseur possède 4 gammes de mesures (0-10 ; 0-100 ; 0-1000 et 0-1000 ppm équivalent C). En outre il est équipé d'une ligne chauffée à 180-225 °C pour éviter la condensation des HC lourds.

III.5.4. Etalonnage des appareils

Les trois analyseurs CO/CO₂, NO/NO₂ et HC sont étalonnés chaque jour au début de l'expérimentation avec des gaz étalons de la société Air Liquide.

Tableau III.4: Concentrations et pureté des gaz d'étalonnage

Analyseur	Concentration des gaz étalons	Pureté (%)
CO ₂ /CO	CO: 1,03% CO ₂ : 1,48%	99,5
NO _x	NO: 494 ppm	99,5
HC _{totaux} / HC _{méthaniques}	CH ₄ : 1009 ppm C ₃ H ₈ : 1023 ppm	99,5

Les résultats d'analyse des NO_x totaux (NO+ NO₂) et HCT sont exprimés respectivement en ppm équivalent de NO₂ et ppm équivalent de CH₄.

III.6. Méthode de calcul des émissions

La masse de polluant n'étant pas affectée par les conditions de température et de pression extérieures contrairement à la concentration volumique, la masse de polluant contenue dans le mélange est égale à la masse de polluant émise par le véhicule, additionnée à la masse de polluant introduite par l'adjonction d'air de dilution. De plus, on admet que la division du volume de gaz émis à travers l'embout (composé de 112 tubes) par le véhicule est homogène pour tous les polluants.

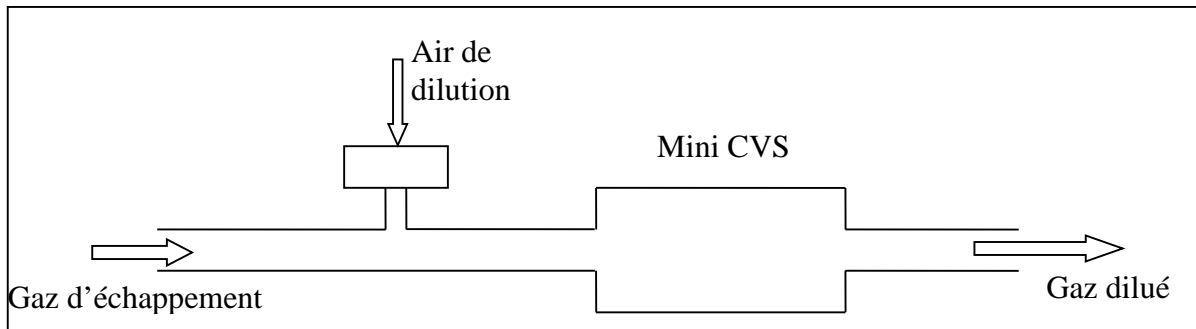


Figure III.12: Schéma du circuit des gaz prélevés par mini CVS

$$\text{On a :} \quad m_i = m_i^e + m_i^a \quad \text{ou} \quad m_i^e = m_i - m_i^a \quad \text{éq. (III.3)}$$

avec :

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

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 :

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.

Par ailleurs on a :

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

éq. (III.4)

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 :

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

éq. (III.5)

avec ($P_2 \approx P_o$)

Finalement on obtient:

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

éq. (III.6)

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

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

éq. (III.7)

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 :

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

éq. (III.8)

En posant :

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

éq. (III.9)

Il vient que :

$$m_i^e = K \cdot V(T_3) \left[c_i - c_i^a \cdot \frac{V_a(T_3)}{V(T_3)} \right] \quad \text{éq. (III.10)}$$

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 :

$$DF = \frac{V(T_3)}{V_e(T_3)} = \frac{13,4}{[CO_2] + ([HC] + [CO]) \cdot 10^{-4}} \quad \text{éq. (III.11)}$$

avec $[CO_2]$ en% ; $[HC]$ et $[CO]$ en ppm

l'indice i représentant les polluants CO_2 , CO , HC et NO_x .

D'où :

$$\frac{V_a(T_3)}{V(T_3)} = \frac{V(T_3) - V_e(T_3)}{V(T_3)} = 1 - \frac{1}{DF} \quad \text{éq. (III.12)}$$

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

$$m_i^e = K \cdot V(T_3) \left[c_i - c_i^a \cdot \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \right] \quad \text{éq. (III.13)}$$

où :

- $V(T_3)$ 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 $Z \times 10^{-6}$

Dans le calcul du facteur de dilution DF, les concentrations de CO_2 sont exprimées en % et celles de HC et CO en ppm.

- 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 :

$$m_{i \text{ (totale)}}^e = 112 * m_i^e \quad \text{éq. (III.14)}$$

Correction d'humidité des NO_x :

Les émissions des NO_x dépendant des conditions atmosphériques ambiantes, la concentration des NO_x doit être corrigée en fonction de l'humidité, de la température de l'air ambiant et de la pression barométrique. Le facteur de correction K_H est donné par les formules suivantes :

a) Pour des moteurs Diesel :

$$K_{Hd} = \frac{1}{1 - 0,0182 (H - 10,71)} \quad \text{éq. (III.15)}$$

b) Pour les moteurs à essence et GPL

$$K_{Hg} = \frac{1}{1 - 0,0329 (H - 10,71)} \quad \text{éq. (III.16)}$$

où H : humidité de l'air d'admission en g d'eau par kg d'air sec

et

$$H = \frac{16,220 * R * P^{sat}}{P - P^{sat} * R * 10^{-2}} \quad \text{éq. (III.17)}$$

R = humidité relative de l'air d'admission en %

P^{sat} = pression de vapeur d'eau saturante de l'air d'admission en kPa

P = Pression barométrique totale en kPa

Quant à la pression de vapeur d'eau saturante, l'Organisation mondiale de la météorologie (WMO 2008) recommande l'équation de Bolton (1980) suivante avec une erreur ne dépassant pas les 0,3% dans le domaine de température compris entre -35 et + 35°C :

$$P^{sat} = 6,112 * \exp\left(\frac{17,62 t}{243,12 + t}\right) \quad \text{éq. (III.18)}$$

avec t en °C et P^{sat} en hPa

III.7. Campagne de mesures

La campagne de mesure des émissions de polluants de véhicules en circulation réelle, étalée de mars à septembre 2011, a été menée sur les 7 circuits de l'agglomération de Blida avec un échantillon de 17 véhicules.

Le laboratoire a été installé à l'ex Centre de Recherche des Industries Alimentaires (CRIA) devenu une annexe de l'université. Cette annexe est située à la périphérie du centre-ville de Blida à proximité de la clinique Ferroudja. Cela a pour avantage de procéder rapidement à des essais en milieu urbain, suburbain et autoroutier.

Les photos de la figure III.13 donnent un aperçu de quelques véhicules équipés pour la mesure des émissions de polluant en circulation réelle et du laboratoire dans lequel sont effectuées les analyses des polluants règlementés.

Les véhicules empruntés sont en général réceptionnés la veille pour pouvoir les équiper au garage du centre, pour être prêts le lendemain matin, sinon au cours de la matinée pour débiter les tests l'après-midi.

La durée de mise en place du matériel dans le véhicule, composé principalement du mini-CVS, de la batterie et de l'embout à placer sur le tuyau du pot d'échappement peut prendre une heure et demie avec la mise en marche et l'étalonnage des analyseurs.

Tous les essais sur route sont précédés par des tests de moteur tournant au ralenti à chaud.

Pour tous les tests effectués, on relève les conditions opératoires : température et humidité à l'aide d'un capteur hygrométrique de marque Hygroclip type S1 avec des plages de de 0 à 100% pour l'humidité (précision $\pm 0,6\%$) et de -40 à 85°C pour la température (précision $\pm 0,2$ K). Durant la campagne de mesure, la température a varié entre 18 et 43°C et l'humidité entre 18 et 71% .

Les périodes de pointe (10h-12h30 et 16h-17h30) sont privilégiées pour la mesure des émissions en milieu urbain où l'on enregistre une congestion de la circulation afin de balayer les différentes vitesses. Les autres horaires sont consacrés aux circuits autoroutiers, périurbains à circulation fluide et aux essais à vitesses stabilisées. Les tests sur route ne sont pas effectués en absence de trafic.

Tous les véhicules de l'échantillon sont conduits par un conducteur unique afin d'éliminer la variabilité associée au style de conduite qui peut être significative selon Holmèn (Holmèn and Niemeier 1998). Le conducteur a pour consignes de conduire normalement en suivant le flux de véhicules et en évitant des comportements extrêmes afin de reproduire le plus fidèlement possible le style de conduite moyen du trafic.

III.7.1. Répartition des essais

Le sous-échantillon de véhicules GPL se répartit entre 4 véhicules équipés de kit à injection standard (Aveo 2004 à 2008) et 3 véhicules à injection séquentielle multipoint. Le choix des

véhicules à bicarburation essence/GPL a porté notamment sur 5 véhicules de mêmes marque et modèle (Aveo) mais d'âge et de kilométrage différents, permettant une meilleure comparaison et de réduire la variabilité entre modèles et marques.

L'un des véhicules Diesel (Renault Clio) a subi une réparation du moteur par son propriétaire avant la campagne de mesure.

Les véhicules à bicarburation sont utilisés pendant 2 à 3 jours et ceux à monocarburation de 1 à 2 jours. Toutes les mesures d'émission sont effectuées à chaud en circuit urbain, périurbain et autoroutier. La durée des essais varie selon le type de circuit entre 4 (circuits courts et rapides) et 20 min (circuits urbains congestionnés).

Chaque véhicule subit des essais sur les 7 types de circuit avec au moins 3 tests par type de circuit. Le tableau III.5 résume la répartition des 346 tests valides pour un total de 357 tests réalisés sur l'échantillon de véhicules. Le kilométrage total ainsi parcouru par l'ensemble de l'échantillon de véhicules avoisine les 2 600 km.

III.7.2. Mesure des émissions

Les mesures des émissions de polluants sont réalisées à partir de l'analyse d'échantillons et d'air de dilution recueillis dans des sacs en Tedlar pour chaque essai réalisé. Tous les paramètres opératoires ainsi que les résultats de mesure sont consignés sur des fiches dont les modèles sont représentés à titre d'exemple dans les annexes 1, 2 et 3. Ces dernières sont de trois types : mesures au ralenti (chaud et froid), mesures sur route (urbain, suburbain et autoroutier) et mesures à vitesses stabilisées (30 à 100 km/h).

III.7.2.1. Mesures au ralenti

Tous les essais débutent par des tests au ralenti à chaud. Dès le démarrage du moteur, on met en marche le mini-CVS, tout en relevant les paramètres opératoires indiqués sur la fiche mesure : température, humidité, volucompteur, débits, etc...

Chaque test de ralenti à chaud dure 5 minutes, au terme duquel les sacs d'échantillon et d'air de dilution sont retirés pour être analysés sur place au laboratoire.

Pour les véhicules à bicarburation, des tests à chaud sont menés successivement avec les deux carburants essence et GPL.

Les tests de ralenti à froid n'ont pas été effectués, du fait que la plupart des véhicules sont ramenés au garage le jour même des essais, moteur déjà chaud. Des tests à froid nécessiteraient que les véhicules passent au moins une ou deux nuits au centre d'essais, selon qu'ils soient à monocarburation ou bicarburation. De plus, tous les véhicules récents à bicarburation démarrent

en mode essence. Le passage en mode GPL moteur froid, nécessite plusieurs tentatives par des coups de pédale d'accélérateur, ce qui peut prendre plusieurs minutes, ce qui ne correspondra plus à la phase de démarrage à froid escomptée.

III.7.2.2. Mesure en circulation sur route

Les mesures en milieu urbain débutent à partir du garage de l'ex CRIA. Trois circuits successifs (dans l'ordre urbain 1, urbain 2 puis urbain 3) comme indiqué sur la figure III.7, sont parcourus à travers les artères de la ville de Blida. Pour cela 4 sacs sont embarqués à bords du véhicule pour remplir les 3 échantillons correspondants à chaque circuit ; le 4^{ème} sac servant au remplissage de l'air de dilution. Au terme des 3 circuits, on retourne au garage pour analyser sur place les sacs. A l'entame et à l'arrêt de chaque trajet, le moteur démarre et s'arrête en mode ralenti.

A l'instar des circuits urbains, la même procédure est exécutée pour les circuits suburbain et autoroutier à la périphérie de la ville et sur autoroute. Pour une meilleure rentabilité dans la succession des tests, ces derniers par groupe de 3 sont mélangés entre trajets suburbains et autoroutiers (3 trajets suburbain et autoroutier chacun à exécuter en 2 sorties). On s'arrangera à ce que la fin du dernier circuit soit celui qui soit le plus proche du garage pour une analyse rapide des échantillons au laboratoire.

III.7.2.3. Mesures à vitesse stabilisée

Les mesures à vitesse stabilisée sont effectuées pour les faibles vitesses (30 à 50 km/h) sur la bande d'arrêt d'urgence d'une portion d'autoroute pour ne pas gêner les automobilistes sur les autres voies de circulation, et pour les vitesses plus élevées sur une voie normale de l'autoroute. Une fois la vitesse stabilisée à un niveau choisi par le conducteur, celle-ci sera maintenue constante autant que possible durant le test (Figure IV.9), soit le temps de remplissage des sacs.

Une fois le régime moteur stabilisé à une vitesse choisie, on met en marche le mini-CVS pour la collecte des échantillons dans les sacs. Le conducteur maintiendra autant que possible la vitesse stable à l'aide du compteur de vitesse affiché sur le tableau de bord. Une fois les sacs remplis (en moyenne 7 minutes), on arrête le mini-CVS ainsi que le GPS.

Batterie et système de prélèvement Mini-CVS sur banquette



Véhicule testé en circulation réelle dans des sacs



Embout de prélèvement



Laboratoire d'analyse des échantillons de gaz prélevés



Figure III.13 : Photos de véhicules équipés et laboratoire d'analyse pour la campagne de mesure des émissions

Tableau III. 5 : Répartition des essais effectués sur l'échantillon de véhicules

N°	Marque	Modèle	Année	Carburant	Nombre d'essais				
					U	S.U	A	V.S	Tot/veh
1	CHEVROLET	AVEO	2004	GPL/ES. Sup	6 + 6	3 + 3	3 + 3	5 + 5	34
2	CHEVROLET	AVEO	2006	GPL/ES. Sup	5 + 4	3 + 3	3 + 3		21
3	CHEVROLET	AVEO	2007	GPL/ES. Sup	9 + 9	3 + 3	3 + 3	5 + 5	40
4	CHEVROLET	AVEO	2008	GPL/ES. Sup	8 + 8	4 + 4	3 + 3	7 + 7	44
5	CHEVROLET	AVEO	2010	GPL/ES. Sup	6 + 6	3 + 3	3 + 3		24
6	CHEVROLET	OPTRA	2010	GPL/ES. Sup	4 + 4	3 + 3	3 + 3	5 + 5	30
7	RENAULT	SYMBOL Sedan	2011	GPL/ES. S/P	5 + 4	2 + 2	6 + 5	4 + 4	32
8	RENAULT	SYMBOL Sedan	2011	ES. S/P	3	2	4	6	15
9	DACIA	LOGAN	2006	ES. S/P	6	3	3	6	18
10	TOYOTA	YARIS Sedan	2008	ES. S/P	6	2	3		11
11	TOYOTA	YARIS Sedan	2011	ES. Super	6	3	3		12
12	TOYOTA	ECHO	2004	ES. Super	4	3	3		10
13	VOLKSWAGEN	GOLF	1988	ES. Super	3	2	2		7
14	RENAULT	CLIO	1998	Diesel	6	2	4		12
15	RENAULT	MEGANE Scénic	2002	Diesel	3	2	3	4	12
16	TOYOTA	COROLLA	2004	Diesel	6	3	3		12
17	FORD	FIESTA	2010	Diesel	6	3	3		12
Total tests					133	67	78	68	
Total général					346 essais				

U: Urbain ; S.U: Sub-urbain ; A: Autoroutier ; V.S: Vitesses stabilisées

III.8. Traitement des données

À partir des concentrations de polluants mesurées lors des tests effectués sur route, les facteurs d'émission de chaque polluant sont calculés pour chaque test de chaque circuit, en tenant compte des paramètres de la cinématique enregistrée et des conditions météorologiques. On détermine ainsi les émissions unitaires en g/km pour chaque test en fonction de la vitesse moyenne du circuit parcouru. Les tests de mesure de ralenti ayant une durée de 5mn, les facteurs d'émission sont exprimés en g/test (ou en g/mn. en divisant la valeur en g/test par 5).

L'ensemble des résultats obtenus pour chaque véhicule donne accès aux valeurs des facteurs d'émissions unitaires selon la méthodologie de calcul présentée au paragraphe III.6 en fonction de la vitesse moyenne de roulage du véhicule de l'échantillon.

III.8.1. Calcul du facteur d'émission moyen par classe de vitesse

La grande dispersion des données de vitesses enregistrées suite à diverses situations de trafic en zone urbaine ou périurbaine au cours d'une journée soulève la question de l'utilisation de valeurs moyennes simples. En fait, selon André (André and Hammarström 2000), les émissions selon cette méthodologie peuvent être sous-estimées de 30% du fait de la mauvaise qualité des données de vitesse de conduite. Pour éviter de telles déperditions dans les résultats d'émissions, des fonctions d'émissions de polluants ont vu le jour, exprimées en fonction de classes de vitesses moyennes. Cette méthode a le mérite de présenter les résultats de manière plus homogène, et permet pour de mêmes conditions de vitesse moyenne une meilleure comparaison des résultats entre différents carburants, technologies de véhicules, etc... .

Ainsi, les résultats des facteurs d'émissions des véhicules testés sont rassemblés selon la motorisation (essence, Diesel et GPL) et la technologie (catalysé, non catalysé, type d'injection). Pour chaque catégorie, les facteurs d'émission sont calculés pour les 10 classes de vitesse déterminées à partir de la courbe de fréquences cumulées des vitesses moyennes enregistrées (Figure IV.3). À chacune de ces classes correspond une valeur moyennée du facteur d'émission obtenue par pondération avec les vitesses individuelles appartenant à chaque classe de vitesse selon l'équation suivante :

$$(FE_i)_k = \frac{\sum_j (FE_i)_j \cdot V_{j,k}}{\sum_j V_{j,k}} \quad \text{éq. (III.19)}$$

où : $(FE_i)_k$: Facteur d'émission moyen du polluant i obtenu pour la classe de vitesse k,

$(FE_i)_j$: Facteur d'émission du polluant i obtenu à l'issue de l'exécution du trajet j ,

V_j : Vitesse moyenne appartenant à la classe de vitesse k , obtenue à l'issue de l'exécution du trajet j .

III.8.2. Calcul des fonctions d'émission des véhicules de la base Artemis

Pour le calcul des émissions des véhicules de la base Artemis, on utilisera les deux modèles (décrits dans §II.2.3.3) qui serviront comme base de référence aux résultats des facteurs d'émission de notre échantillon de véhicules.

Pour les émissions de polluants règlementés autre que le CO_2 , on utilisera le modèle 1 pour les véhicules Euro 1 à Euro 3. Le modèle 2 grâce à ses fonctions polynomiales servira au calcul du CO_2 pour l'ensemble des véhicules et à l'estimation des émissions de polluants des véhicules Pré-Euro ou Euro 0, l'estimation de ces derniers n'étant pas prévue par le modèle 1.

Comme exemple d'application, on utilisera le tableau A.7.3 de l'annexe pour représenter sous forme de courbes lissées, les émissions unitaires pour la norme Euro 0 des véhicules non catalysés de la base Artemis ; en fonction de 15 classes de vitesse moyenne, dont chacune correspond à une typologie de circulation. Pour les autres normes, on utilisera le tableau A.7.2, pour lequel on tracera directement en fonction de la vitesse moyenne les courbes lissées d'émission unitaire de polluants.

Enfin, le rassemblement des résultats d'émissions de notre échantillon de véhicule par classe de vitesse moyenne permet de tracer des courbes de régression de meilleure qualité, plus équilibrées (comme cela a été fait pour Artemis) et de pouvoir situer les niveaux d'émissions obtenus des véhicules par rapport aux normes des véhicules de la base Artemis.

III.8.3. Calcul du facteur d'émission moyen par catégorie de véhicule

Le facteur d'émission moyen d'un polluant donné d'une catégorie de véhicule et pour l'ensemble des vitesses pratiquées se calcule en trois étapes :

- pour chaque polluant i et centre de classe de vitesse moyenne k on calcule le facteur d'émission $(FE_i)_k$ selon l'équation (III.19) ci-dessus ;
- pour chaque type de trajet t (urbain, suburbain et autoroutier), on estime le facteur d'émission moyen d'un polluant i en faisant la moyenne arithmétique des facteurs d'émission $(FE_i)_k$ selon l'équation suivante :

$$\left[(FE_i)_k \right]_t = \frac{\sum_k (FE_i)_k}{N_k} \quad \text{éq. (III.20)}$$

où N_k : représente le nombre de classes k de vitesse moyenne appartenant au type de trajet t réparti entre urbain, suburbain et autoroutier.

- Le facteur d'émission moyen d'un polluant i d'une catégorie de véhicule, pour l'ensemble des vitesses pratiquées, est la moyenne des facteurs d'émission moyens $(FE_i)_k$ pondérés par la part du kilométrage X_t effectué sur chaque type de circuit urbain, périurbain et autoroutier et qui sont respectivement de 25, 30 et 45% ; selon l'équation suivante :

$$(FE_i)_{\text{moy}} = \sum_t \frac{X_t \cdot \left[(FE)_{i,k} \right]_t}{100} \quad \text{éq. (III.21)}$$

Chapitre IV – Emissions unitaires de polluants issus du trafic routier léger

Les modèles d'émission macroscopiques proposent des fonctions empiriques appelées facteurs d'émissions. Ces derniers utilisent comme variable principale la vitesse moyenne, comme le montrent les multiples fonctions d'émissions données par la littérature (André and Hammarström 2000, De Haan and Keller 2004, Beevers and Carslaw 2005, Joumard, André et al. 2007, Hausberger, Rexeis et al. 2009, Jung, Lee et al. 2011). Toujours dans cette même optique, on peut constater qu'en cas d'alerte de dépassement des niveaux admissibles de pollution dans certaines grandes agglomérations urbaines (Paris, Athènes, Mexico, etc...), on a recours à des limitations de vitesses qui induisent elles-mêmes une réduction de la vitesse moyenne et par suite une réduction des facteurs d'émission. En fait, seule la mise en place de moyens de transports alternatifs et d'aménagements dans les centres urbains (tels que : tramway, voies à sens uniques, rues piétonnes, etc...) permettrait grâce à une diminution efficace du trafic automobile, une réduction des émissions.

Par ailleurs, la recherche a démontré que l'utilisation de la vitesse moyenne comme seule variable est insuffisante pour estimer les émissions des véhicules (Rakha and Ding 2003, André 2004, Pujadas, Núñez et al. 2004). D'autres paramètres doivent être pris en compte telles que les conditions de trafic entre autres, l'accélération, les nombres et temps d'arrêts moyens. En effet, une même vitesse moyenne pour un trajet donné peut correspondre à plusieurs typologies de circulation telles que : conduite sobre ou agressive marquée par plusieurs temps d'arrêt plus ou moins longs où le véhicule se met en position de fonctionnement de ralenti.

On présente ci-dessous les résultats de validation des cinématiques pratiquées par GPS dans le but d'une caractérisation des circuits testés, suivies de l'exploitation des mesures d'émission de polluants au ralenti, en circulation réelle et à vitesses stabilisées.

IV.1 Cinématiques observées

A partir des données relevées lors des différents enregistrements de vitesses pour les différents trajets de mesure des émissions réalisées sur route, on présente ci-dessous les résultats de validation des mesures cinématiques par GPS et la caractérisation cinématique des différents types de trajets effectués en milieu urbain, suburbain et autoroutier. Enfin, de l'analyse de la

courbe des fréquences cumulées des vitesses moyennes, des classes de vitesses moyennes ont été retenues à des fins d'exploitation des résultats des mesures des facteurs d'émission unitaires.

IV.1.1. Validation des mesures cinématiques par GPS

Les mesures d'émissions de polluants en embarqué sont indissociables de mesures de cinématiques de vitesse en fonction du temps. La comparaison des mesure de vitesses entre le cinémomètre et le GPS effectuées sur la route de Chréa (la topographie du circuit est représentée en figure III.1) sont indiquées figure IV.1. L'altitude mesurée par GPS y est aussi indiquée.

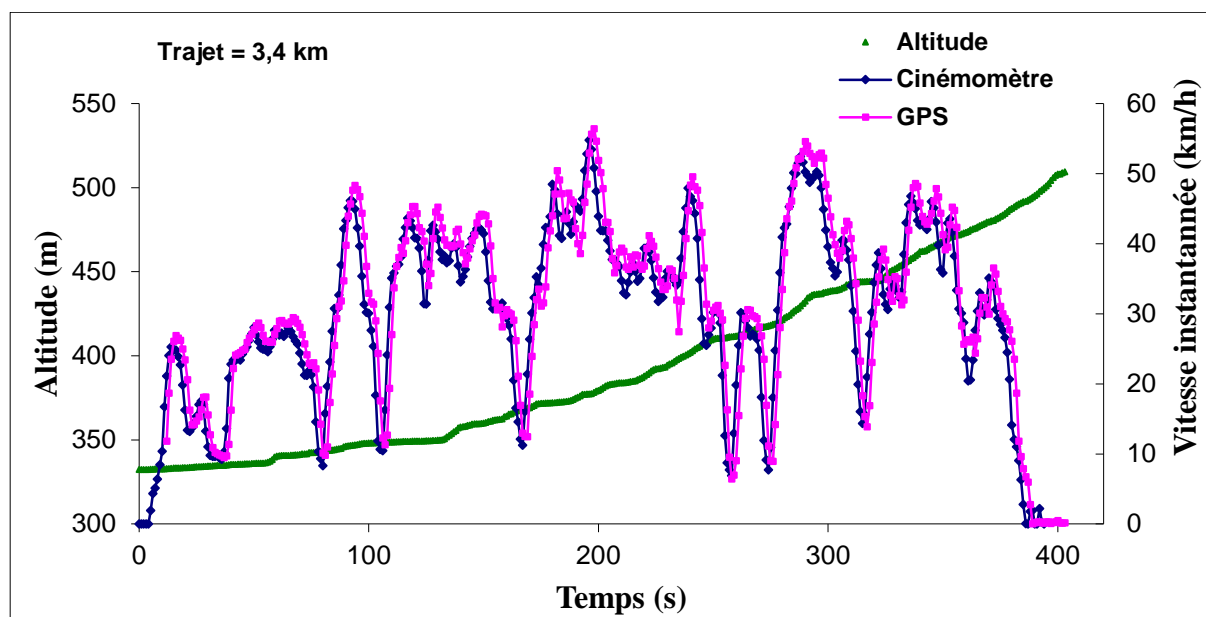


Figure IV.1 : Mesure des vitesses et altitude par GPS et cinémomètre en montée sur la route de Chréa

On relève une très bonne corrélation des vitesses avec le temps entre les deux types d'appareils, les valeurs de distances cumulées obtenues par sommation sont de 3319 m pour le cinémomètre qui est la référence et de 3437 m pour le GPS (3400 m pour la distance relevée sur le compteur du tableau de bord). Cela correspond à une marge d'erreur par rapport au cinémomètre de 3,5% pour le GPS.

IV.1.2. Caractérisation de la cinématique des circuits

Durant la campagne de mesure étalée d'avril à septembre 2011, 278 essais de mesures de polluants en circulation réelle ont été effectués sur les 7 circuits de l'agglomération de Blida avec l'échantillon de 17 véhicules. Compte tenu des résultats concluants de l'utilisation du GPS vis-à-vis du cinémomètre, le GPS a été adopté pour les mesures de cinématiques pour tous les tests. L'ensemble des résultats des mesures par GPS a permis de dégager les données

statistiques des cinématiques pratiquées lors des essais sur les trois types de circuits : cf. Tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Paramètres cinématiques des circuits de test effectués

Type de circuit	Longueur trajet (km)	Vitesse moyenne (km/h)	Vitesse moyenne maximale (km/h)	Accélération positive moyenne (m/s ²)	Durée moyenne trajet (s)	Temps d'arrêt moyen (s)	Nombre moyen d'arrêts
Urbain 1	2,7	12,58	17,48	0,33	773	166	15
Urbain 2	3,1	12,89	21,86	0,36	866	156	16
Urbain 3	2,4	18,69	26,70	0,44	462	36	5
Suburbain 1	4,2	34,63	39,48	0,41	437	62	2
Suburbain 2	4,2	52,98	60,72	0,57	285	35	1
Autoroutier 1	7,9	75,14	86,18	0,09	378	0	0
Autoroutier 2	11	89,90	107,87	0,15	440	0	0

IV.1.3. Classes de vitesses

La figure IV.2 représente la répartition des vitesses moyennes enregistrées des 278 circuits entre les trois types de voies, urbain, suburbain et autoroutier.

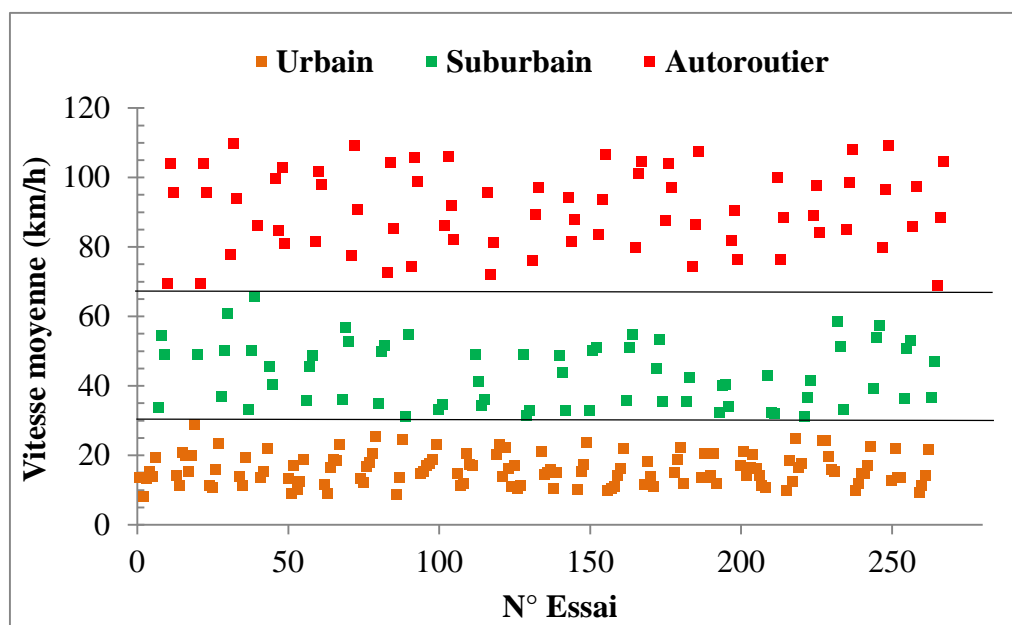


Figure IV.2 : Répartition des vitesses moyennes enregistrées entre les trois types de voies de circulation pour les essais chronologiques effectués.

Pour définir les classes de vitesses moyennes, nous rassemblons tout d'abord les vitesses moyennes des véhicules de notre échantillon relatives à chaque trajet et par ordre croissant, puis

on trace sur un graphique (Figure IV.3) la fréquence cumulée de celles-ci en fonction des vitesses moyennes obtenues pour chaque circuit. Ensuite on départage l'ensemble des vitesses en 10 intervalles ou classes de même poids (10%). Enfin, comme indiqué sur la figure, à chaque centre de classe de vitesse moyenne correspondra une valeur moyennée du facteur d'émission obtenue par pondération avec les vitesses individuelles moyennes appartenant à chaque classe de vitesse moyenne selon l'équation (III.19).

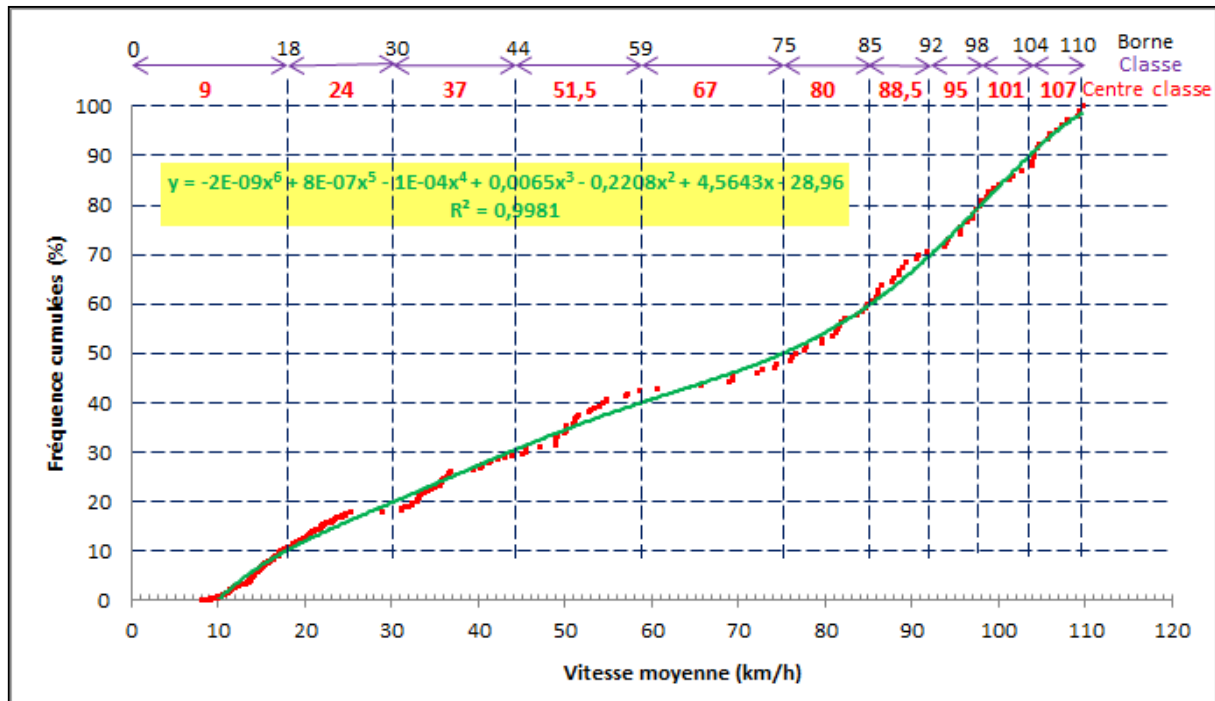


Figure IV.3 : Histogramme d'identification des classes de vitesses à partir de la courbe de fréquence cumulée des vitesses moyennes enregistrées.

IV.1.4. Conclusion

A la lumière des résultats obtenus, les mesures de cinématique par GPS peuvent suppléer avec une bonne précision les mesures de vitesse effectuées par cinémomètre, dans l'accompagnement des mesures d'émission de polluants des véhicules en conditions réelles de circulation. Cependant dans le cas des mesures "instantanées" et en embarqué, le cinémomètre demeure irremplaçable du fait que la vitesse et les mesures de concentration des polluants doivent être synchronisées avec le temps. Dans le cas de notre étude, où la totalité des émissions de polluants à l'échappement est récupérée par sac tout au long du trajet, puis finalement analysés à la fin du circuit de mesure, le GPS est alors tout indiqué pour la mesure des cinématiques.

IV.2– Emissions unitaires des véhicules testés

Les conditions de conduite restent primordiales quant aux niveaux des facteurs d'émissions des véhicules. Seules des données expérimentales permettent d'avoir une vision réaliste du trafic routier automobile.

Dans cette partie expérimentale, nous passons en revue les différents résultats de notre campagne de mesure des facteurs d'émission de véhicules légers à l'échappement selon différentes situations de trafic, allant des mesures au ralenti, mode de conduite qu'on retrouve dans une circulation congestionnée, aux mesures en circulation réelle pour différentes plages de vitesses. Nous terminons avec des mesures à vitesse stabilisée pour évaluer l'impact du niveau de la vitesse stabilisée sur les émissions de polluants.

IV.2.1. Emissions au ralenti

En Algérie, la circulation routière dans les centres urbains des grandes villes se caractérise très fréquemment pendant la journée par des niveaux de congestion élevés, contraignant ainsi un grand nombre d'automobilistes à conduire en mode arrêt-démarrage communément appelé "stop and go". Lorsque les périodes d'arrêt sont prolongées, comme c'est le cas des embouteillages, les moteurs des véhicules tournant en mode ralenti génèrent des excédents importants d'émissions de polluants et particules qui sont la conséquence de fortes pollutions urbaines (Frey, Rouphail et al. 2001, Rakha and Ding 2003, Pujadas, Núñez et al. 2004, El-Shawarby, Ahn et al. 2005).

Les teneurs d'émissions de polluants mesurées au ralenti peuvent nous renseigner en premier lieu sur l'état de fonctionnement du moteur. D'ailleurs, c'est cette opération qui est effectuée dans les stations de contrôle maintenance des véhicules pour contrôler le niveau des émissions des véhicules en circulation.

On se propose ci-après de qualifier et de quantifier l'impact de l'arrêt des véhicules en circulation, moteur au ralenti, sur les émissions d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote.

IV.2.1.1. Ralenti à chaud

Chaque test, sans démarrage, correspond au fonctionnement du moteur chaud tournant au ralenti. Cette procédure permet de simuler un arrêt prolongé dans une situation de congestion du trafic. A l'issue de tous les tests qui durent précisément 5 minutes, on récolte les gaz d'échappement et d'air de dilution. Les échantillons récoltés sont immédiatement analysés.

En figure IV.4, sont présentés les résultats d'émission en mode ralenti à chaud de 5 véhicules bicarburation essence-GPL non catalysés de notre échantillon, ainsi que de trois véhicules monocarburation catalysés dont un au Diesel et deux à l'essence sans plomb.

Pour les émissions de monoxyde de carbone (Figure IV.4a), il y a lieu de relever les rejets excessifs des véhicules GPL non catalysés à injection standard qui dépassent les 50 g/test. Celles-ci sont suivies par leurs homologues roulant à l'essence super (essence bicarburation) avec une moyenne de 1,31 g/test (pour les Aveo 2004, 2006 et 2010), si l'on exclue celles relatives aux deux véhicules Aveo 2008 et Optra 2010 (moyenne de 20 g/test), qui manifestement présentent un mauvais fonctionnement au ralenti en mode essence. Pour ce qui est des véhicules non catalysés roulant au GPL à injection séquentielle (Optra et Aveo 2010), leurs faibles émissions de CO rivalisent avec celles des véhicules catalysés (Fiesta, Symbol et Logan).

Cette performance est liée au fait que l'alimentation du GPL est assurée par un deuxième calculateur propre au kit GPL autre que celui de l'essence placé d'origine dans le véhicule. Le dosage précis à chaque instant du GPL au niveau de chaque cylindre permet, à travers une bonne combustion du carburant, une réduction plus efficace de polluants. Quant aux véhicules GPL à injection standard, leur piètre performance est inhérente au fait que l'alimentation du GPL est régie par le calculateur destiné d'origine pour fonctionner à l'essence.

Les émissions d'hydrocarbures au ralenti (Figure IV.4b) sont les plus élevées pour les véhicules à bicarburation non catalysés avec des niveaux équivalents entre l'essence super et le GPL à injection standard avec un taux moyen de 2,52 g/test en exceptant celles de l'Aveo 2004 GPL. Quant aux émissions au ralenti des véhicules GPL non catalysés à injection séquentielle, elles restent équivalentes à leurs homologues catalysés, pour les mêmes raisons évoquées pour le CO avec une moyenne de 1,24 g/test. Par ailleurs, on confirme ce qui est reconnu pour les véhicules Diesel catalysés, leurs faibles émissions de CO et HCT par rapport aux autres carburations.

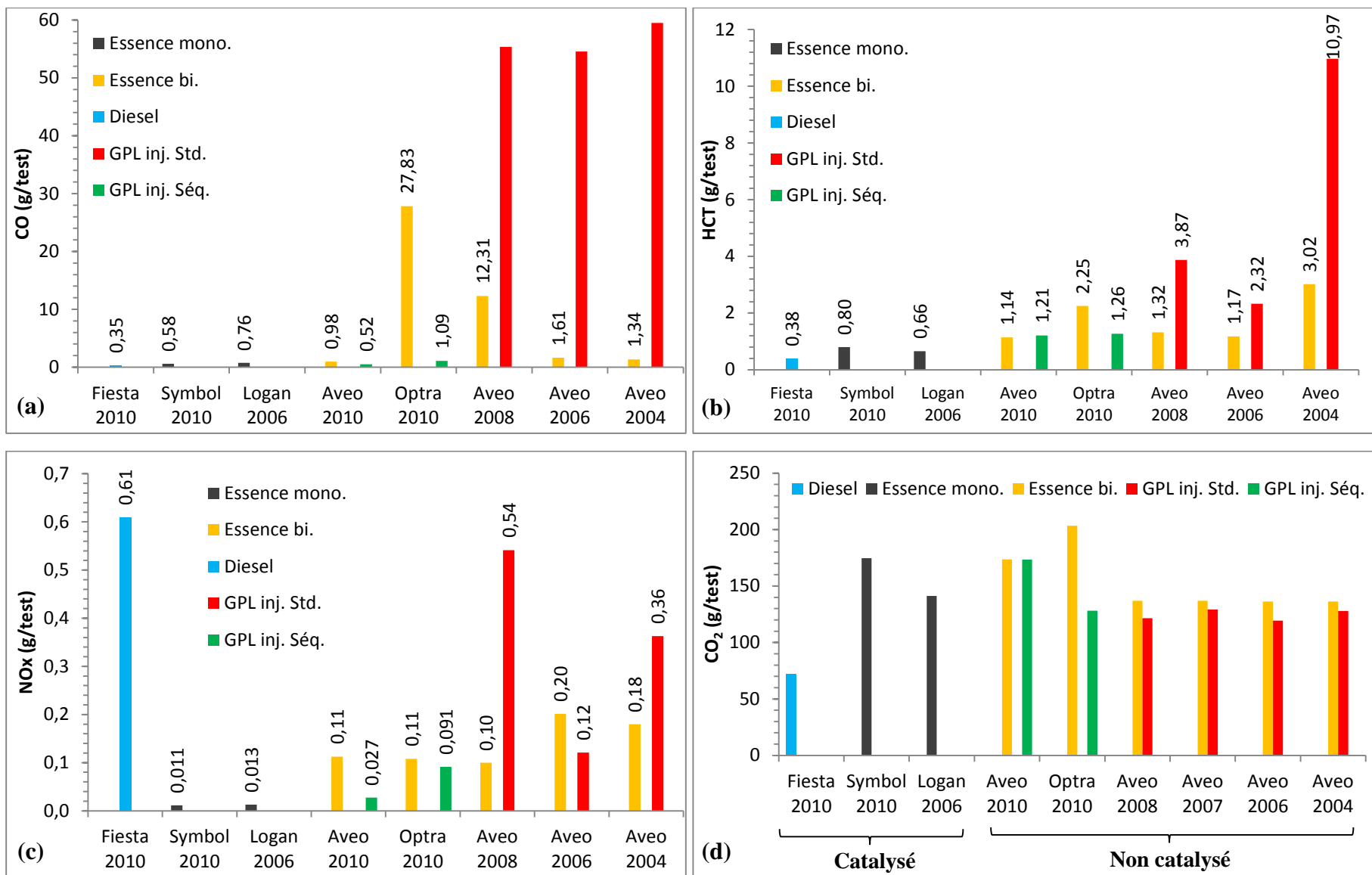


Figure IV.4 : Résultats d'émission des tests de ralenti à chaud des véhicules essence, Diesel et GPL.

Il est reconnu que les excès d'émissions d'oxyde d'azote restent l'apanage des véhicules Diesel et GPL. Cela se confirme aussi pour les émissions au ralenti (Figure IV.4c) où l'on relève des taux de 0,6 g/test pour le Diesel et une moyenne de 0,34 g/test pour le GPL à injection standard. L'injection séquentielle pour les véhicules non catalysés permet de réduire 5 fois ces émissions par rapport à l'injection standard (0,06 g/test), tout en dépassant légèrement celles des véhicules essences catalysés. Les véhicules Diesel bien que catalysés restent donc les plus gros émetteurs de NOx en dépit des technologies apportées à ce type de véhicules. D'ailleurs, paradoxalement, Pujadas (Pujadas, Núnèz et al. 2004) estime que les véhicules de la norme Euro 2 émettent plus de NOx que ceux d'Euro 1 du fait des meilleures performances des premiers en terme de rendement moteur et des systèmes de dépollution qui permettent d'élever plus rapidement la température du moteur, engendrant de fait une formation plus importante des NOx. Plus récemment, une étude menée par Kousoulidou (Kousoulidou, Fontaras et al. 2013) a mis en évidence à partir de tests menés sur deux véhicules Euro 5 à moteur Diesel systématiquement dans les zones urbaines, rurales et sur autoroute, des niveaux de NOx bien plus élevés que la norme d'émission à laquelle ils sont sensés appartenir. Ces observations soulèvent des préoccupations concernant les émissions réelles de NOx des véhicules récents et leur impact sur la qualité de l'air urbain.

Les émissions de CO₂ au ralenti (Figure IV.4d) varient d'une catégorie de véhicule à une autre avec des écarts mesurés très importants par rapport au véhicule Optra à essence, allant de 14 à plus de 60% pour le véhicule Diesel (Fiesta) reconnu comme étant économe en carburant et donc émettant moins de CO₂. Contrairement aux 2 véhicules non catalysés à bicarburation Optra et Aveo (2010) qui disposent de 2 calculateurs pour chaque carburant (avec l'injection séquentielle pour le GPL), les basses valeurs enregistrées pour les autres véhicules non catalysés de la série Aveo, qui disposent d'un même calculateur pour l'essence et le GPL (à injection standard) ne sont pas dues à leurs performances, mais aux émissions plus élevées de CO, NOx et HCT (Figure IV.4 a, b et c) caractérisant de fait, une mauvaise combustion du carburant.

Par ailleurs, les émissions de CO₂ au ralenti restent insensibles à l'âge des véhicules de la série Aveo (2004 à 2008) aussi bien pour l'essence que le GPL.

IV.2.1.2. Excès d'émission des HCT

Les véhicules à injection bicarburation essence-GPL démarrent tous en mode essence, même si le GPL est sélectionné pour le roulage et même si le moteur est déjà chaud. Le passage automatique en mode GPL est effectué après un certain temps lié aux températures du moteur, sachant que la température d'allumage du GPL (500 °C) est supérieure à celle de l'essence

(250 °C) (Yang, Chien et al. 2007, Adam, Astorga et al. 2011). Pour cette raison, des tests spécifiques de ralenti ont été menés pour explorer l'effet sur les émissions des HCT d'un démarrage du moteur à l'essence puis passage automatique au GPL et d'un test de ralenti avec le GPL seul.

Ainsi, des échantillons de gaz d'échappement dilué avec le mini-CVS ont été recueillis durant 5 minutes pour les deux opérations suivantes : 1) Mise en marche du mini-CVS en même temps que le démarrage à l'essence avec passage automatique en mode GPL et 2) Mise en marche du mini-CVS après le passage automatique en mode GPL pour récupérer l'échantillon.

Les résultats indiquent qu'avec un ralenti au GPL seul, on obtient une réduction de 10 à 3% de HCT selon le modèle de véhicule. Ainsi, une partie des HCT provenant de la combustion de l'essence au démarrage du véhicule va contribuer à cet excès d'émission. Ce qui est d'autant plus vrai lorsque l'on sait que la phase de démarrage à froid est cruciale pour la qualité des émissions (Weilenmann, Favez et al. 2009).

IV.2.1.3. Conclusion

Les taux d'émissions de polluants hors CO₂ mesurées sur notre échantillon, pour les différents tests réalisés de ralenti à chaud, révèlent la bonne aptitude des véhicules GPL non catalysés à injection séquentielle à réguler les émissions aux bas régimes pour tous les polluants, ce qui les rends performant autant que leur homologues catalysés. Quant aux véhicules non catalysés essence et GPL (à injection standard), ils restent de gros émetteurs de polluants dans les situations de congestion de trafic.

IV.2.2. Résultats des mesures d'émission en circulation réelle

La différence de mesures des émissions des véhicules relevée entre le banc d'essais à rouleaux et les émissions en situation réelle incite les constructeurs automobiles à prendre de en plus en considération les mesures réelles sur route, pour que les nouvelles normes d'émission des véhicules puissent être respectées dans une situation normale de trafic.

Nous présentons ici les résultats d'émission de notre échantillon de véhicules sur différentes voies de circulation (urbaine, suburbaine et autoroutière) pour les trois motorisations essence, Diesel et GPL.

IV.2.2.1. Véhicules non catalysés

Une comparaison des résultats d'émissions du monoxyde de carbone (Figure IV.5a) pour les véhicules à essence (10 véhicules) et GPL non catalysés, montrent que les véhicules GPL à

injection standard (4 véhicules) sont les plus gros émetteurs de CO. Ce système d'injection est limité technologiquement du fait que l'alimentation est gérée par le calculateur essence (Karamangil 2007) lorsque le véhicule roule au GPL. Celle-ci est donc moins optimisée que pour l'essence, engendrant une surconsommation de GPL et donc une surémission de polluants. Les émissions des hydrocarbures totaux sont équivalentes pour les deux catégories de véhicules essence et GPL à injection standard (Figure IV.5b). Là aussi on peut dénoter relativement une surémission de HCT pour le GPL, alors que l'émission est sensée être moindre du fait du rapport plus élevé hydrogène/carbone pour le GPL que pour l'essence. En revanche, les véhicules non catalysés équipés de kit GPL d'injection séquentielle multipoint (2 véhicules) sont nettement moins polluants en roulant au GPL qu'avec l'essence (Figures IV.5a et b). Ce système d'injection est géré par un double calculateur pour l'alimentation en essence et en GPL, ce qui permet de l'optimiser dans les deux cas selon les caractéristiques de chaque véhicule (Karamangil 2007, Gumus 2011, Gumus and Ugurlu 2011, Masi 2012).

Si globalement les émissions des polluants règlementés en fonction de la vitesse pour les véhicules non catalysés sont conformes aux tendances présentées dans la littérature, à savoir des émissions élevées pour les faibles vitesses moyennes, suivies d'une baisse pour les vitesses intermédiaires représentant d'une conduite sur route, enfin suivies d'une hausse pour les vitesses élevées caractéristiques d'une conduite sur autoroute, il y a quand même lieu de relever une exception pour les NOx émis par les véhicules GPL à injection séquentielle, avec un accroissement de ceux-ci pour les vitesses intermédiaires (Figure IV.5c). Cette particularité est aussi observée pour le véhicule catalysé doté de la même carburation GPL (Figure IV.6c). L'explication de ce phénomène est donnée plus bas dans la partie émissions moyennées par classes de vitesses.

Pour ce qui est des émissions de CO₂ (Figure IV.5d), on constate une équivalence de rejet entre les véhicules essences et GPL à injection standard, due aux niveaux d'émission équivalents de HCT et à un degré moindre de CO en faveur de l'essence. Quant aux véhicules GPL à injection séquentielle non catalysés, ils présentent les niveaux d'émissions de CO₂ les plus élevés, compte-tenu qu'en contrepartie on relève de plus faibles émissions de CO et HCT (Figures IV.5a et b).

IV.2.2.2. Véhicules catalysés

Les résultats de mesure des émissions des véhicules catalysés concernent trois motorisations : essence (3 véhicules), Diesel (4 véhicules) et GPL à injection séquentielle (1 véhicule). On constate pour les polluants CO et HCT en figures IV.6a et b, des réductions drastiques de leurs

émissions pour les vitesses élevées ; caractérisant les rôles joués par les catalyseurs trois voies pour les véhicules à essence et GPL et catalyseurs d'oxydation pour les véhicules Diesel. Globalement, les catalyseurs des véhicules à essence testés ont permis des réductions des émissions de CO de 92% et 87% des HCT par rapport à leurs homologues non catalysés.

Pour ce qui est des émissions de NOx représentées en figure IV.6c, la tendance est moins prononcée pour les véhicules Diesel avec un accroissement des émissions pour les vitesses élevées, dénotant à priori une moindre efficacité du catalyseur pour ce polluant, en raison d'une part de l'âge avancé de la plupart des véhicules Diesel testés et d'autre part, du fait que ces derniers sont dépourvu de catalyseur "Dé-Nox", prévus sur les véhicules récents de la norme Euro 5 et Euro 6. Quant aux véhicules à essence, on observe une disparité des valeurs d'émission des NOx pour les vitesses élevées avec une tendance à la hausse pour ces dernières. On retrouve ces disparités de valeurs d'émission entre véhicules lorsque les mesures sont effectuées sur route.

Citons, à titre indicatif, l'étude menée par Kousoulidou (Kousoulidou, Fontaras et al. 2013) sur des véhicules récents Diesel (deux Euro 4 et un Euro 5) et trois véhicules essence (Euro 3, 4 et 5) à l'aide d'un équipement embarqué type PEMS (modèle SEMTECH DS). Cette étude montre aussi bien pour les véhicules Diesel que pour les véhicules essence pourtant récents des valeurs relativement élevées de NOx aux vitesses moyennes élevées pour le Diesel (Euro 4) et vitesses intermédiaires pour l'essence (Euro 3). On relèvera aussi pour nos résultats la tendance particulière des variations de NOx pour le véhicule GPL à injection séquentielle qui comme mentionné plus haut est similaire à celle des véhicules GPL non catalysés avec le même type d'injection.

Quant aux variations avec la vitesse moyenne des émissions de CO₂, elles sont en adéquation avec les variations du facteur de consommation de carburant obtenues par Kousoulidou (Kousoulidou, Fontaras et al. 2013), du moment qu'il existe pratiquement une relation linéaire entre consommation de carburant et émission unitaire de CO₂.

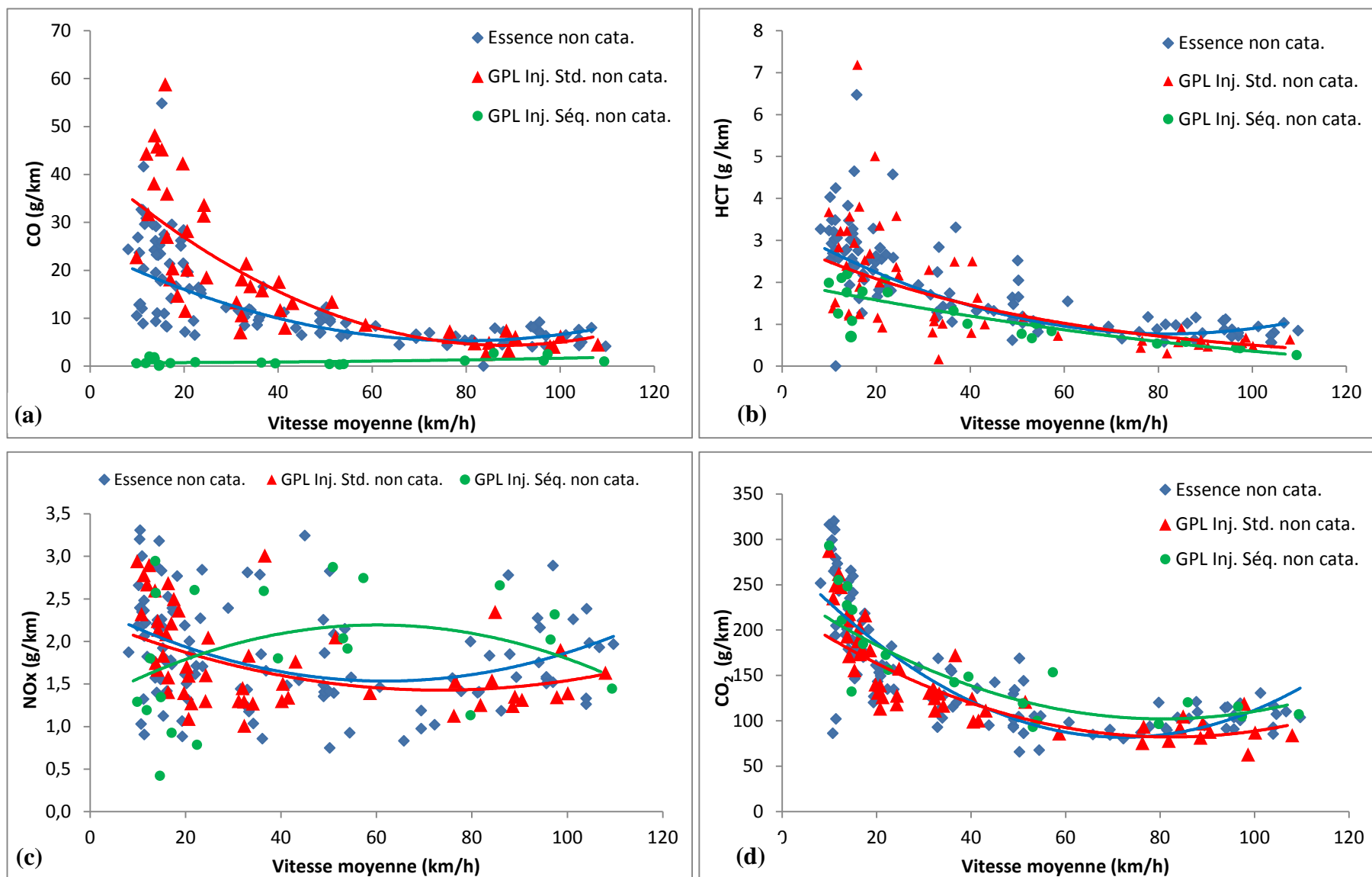


Figure IV.5 : Emissions de CO (a), HCT (b), NOx (c) et CO₂ (d) des véhicules essence et GPL non catalysés, avec courbes de régression

IV.2.3. Résultats et discussions des émissions moyennées par classe de vitesse

Les résultats des facteurs d'émissions des véhicules testés sont rassemblés par catégorie de véhicule, selon la motorisation (essence, Diesel et GPL) et la technologie (catalysé, non catalysé, type d'injection). A chaque centre de classe de vitesse moyenne lui correspondra une valeur de facteur d'émission moyenne d'un polluant conformément à l'équation (III.19).

IV.2.3.1. Emissions des véhicules essence et Diesel

Les émissions unitaires moyennes des polluants règlementés en fonction des différentes classes de vitesse moyennes sont regroupées en figure IV.7 pour différents carburants et technologies de véhicules.

Pour les véhicules à essence catalysés (entre 1 et 5 ans d'âge), les émissions varient pour le CO de 2,5 g/km à 10 km/h à 0,3 g/km à 90 km/h. Pour les HCT la variation s'étale de 0,33 à 0,05 g/km et les NOx de 0,06 à 0,22 g/km, respectivement pour les mêmes valeurs de vitesse. Ces véhicules répondent ainsi à la norme Euro 1 pour le CO, Euro 2 pour les NOx et Euro 3 pour les HCT.

Les émissions des véhicules à moteur Diesel équipés de convertisseurs catalytiques (moins de 3 ans d'âge) varient de 1,9 g/km à 10 km/h à 0,3 g/km à 90 km/h pour les CO, de 0,20 à 0,03 g/km pour les HCT, et de 1,07 à 0,35 g/km pour les NOx, aux mêmes vitesses. Ces véhicules répondent aux normes Euro 2 pour le CO et Euro 3 pour les HCT et les NOx.

Les véhicules à essence catalysés, censés être alimentés avec de l'essence sans plomb, sont confrontés épisodiquement à des pénuries de ce dernier, obligeant les conducteurs à avoir recours à l'essence plombée. La conséquence s'en ressent dans la dégradation des pots catalytiques, avec pour conséquence des surémissions de polluants dans l'atmosphère

Des résultats comparables ont été obtenus par Hu (Hu, Wu et al. 2012) avec un équipement PEMS embarqué à bord de 16 taxis Diesel catalysés à Hong Kong. Les auteurs ont confirmé les performances du Diesel par rapport aux véhicules essence de la même catégorie. Les véhicules à essence non catalysés restent les plus polluants et leur conversion au GPL pourrait être une alternative pour réduire la pollution.

IV.2.3.2. Emissions des véhicules GPL

Les résultats des mesures d'émissions effectuées sur les véhicules roulant au GPL sont comparés à ceux des véhicules à essence et Diesel.

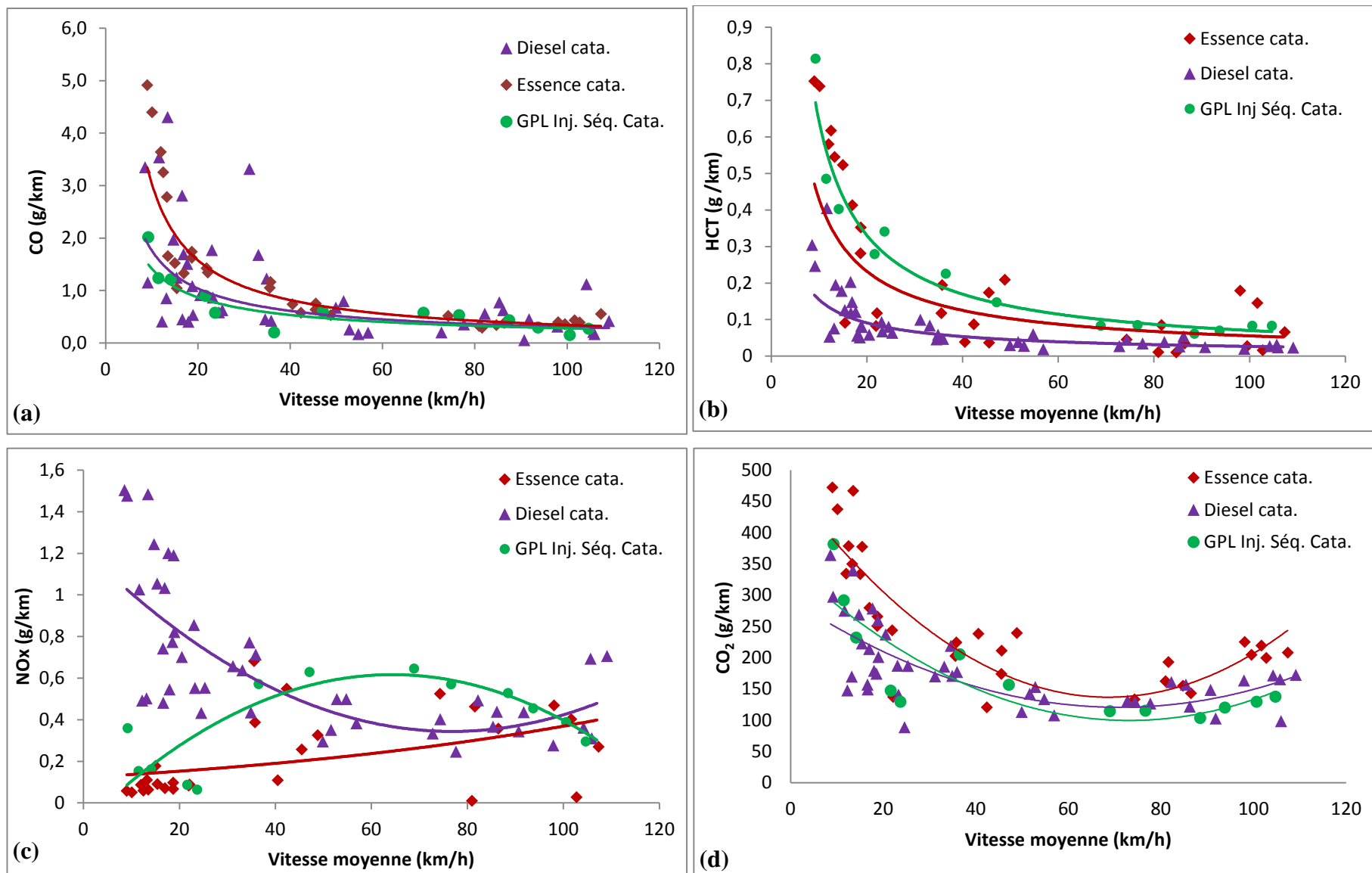


Figure IV.6 : Emissions unitaires des véhicules catalysés, avec courbes de régression

Les émissions de CO des véhicules non catalysés convertis au GPL à injection standard varient de 40 g/km à 10 km/h à 5 g/km à 90 km/h. Les HCT varient de 2,5 à 0,6 g/km et les NOx de 1,5 à 2,5 g/km, pour les mêmes vitesses (Figure IV.7).

Les émissions provenant de véhicules de même type, convertis au GPL à injection séquentielle sont beaucoup plus faibles que celles de la technologie de l'injection standard comme illustré sur les figures IV 7a, 7c et 7d pour les émissions de CO, HCT et NOx. Elles varient de 1,1 g/km à 10 km/h à 1,8 g/km à 90 km/h pour le CO. Les émissions de NOx et de HCT varient de 1,8 à 0,4 g/km et 1,4 à 2,2 g/km respectivement.

Les émissions observées pour les véhicules équipés d'un convertisseur catalytique et d'un système d'injection séquentielle de GPL, sont encore beaucoup plus faibles que celles des deux autres catégories de véhicules. Les émissions de CO varient de 1,25 g/km à 10 km/h à 0,4 g/km à 90 km/h, et les HCT de 0,88 à 0,06 g/km et les NOx de 0,26 à 0,53 g/km, pour les mêmes vitesses.

Toutefois, les véhicules non catalysés équipés de kit d'injection séquentielle multipoint sont beaucoup moins polluants que leurs homologues à essence. En conséquence, la technologie utilisée dans les kits de conversion de GPL a un impact positif et significatif sur les émissions. L'injection séquentielle multipoint maintient les performances du moteur à un niveau équivalent à l'essence et réduit considérablement les émissions polluantes. Ces résultats sont en accord avec la littérature (Gumus 2011, Gumus and Ugurlu 2011, Masi 2012). L'injection séquentielle a donc un avantage environnemental indéniable par rapport à l'injection standard de GPL, même dans le cas de véhicules non catalysés.

IV.2.3.2.1. Emissions de NOx

Les émissions de NOx provenant des véhicules GPL non catalysés pour les deux technologies de conversion (à injections standard et séquentielle) sont les plus élevées, allant de 1,67 à 2,7 g/km (Figure IV.7d). La moyenne des accélérations maximales enregistrées pour tous les tests sur les différents circuits est de $1,88 \pm 0,43 \text{ m/s}^2$, et avec un maximum de $2,53 \text{ m/s}^2$ en milieu urbain fluide. Il est reconnu qu'une forte accélération peut générer des niveaux élevés de NOx (Adam, Astorga et al. 2011). Dans le trafic réel, une forte accélération peut accroître la formation de NOx, même pour les véhicules catalysés, en tenant compte de la détérioration du catalyseur à trois voies (TWC) au cours du temps avec les véhicules anciens. Cela est confirmé par les excès d'émissions de NOx enregistrées dans les zones urbaines ou suburbaines en Europe, conséquentes aux fortes accélérations mesurées sur ces types de voies (André, Rapone et al. 2006).

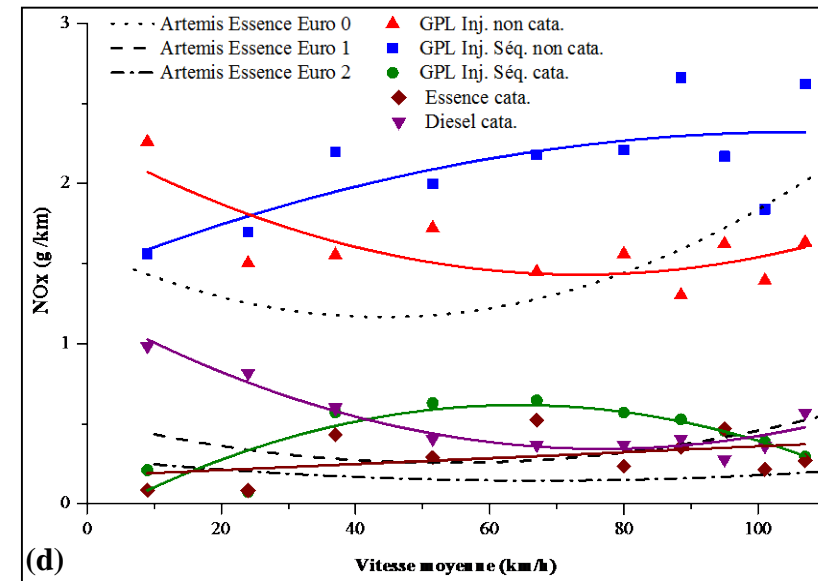
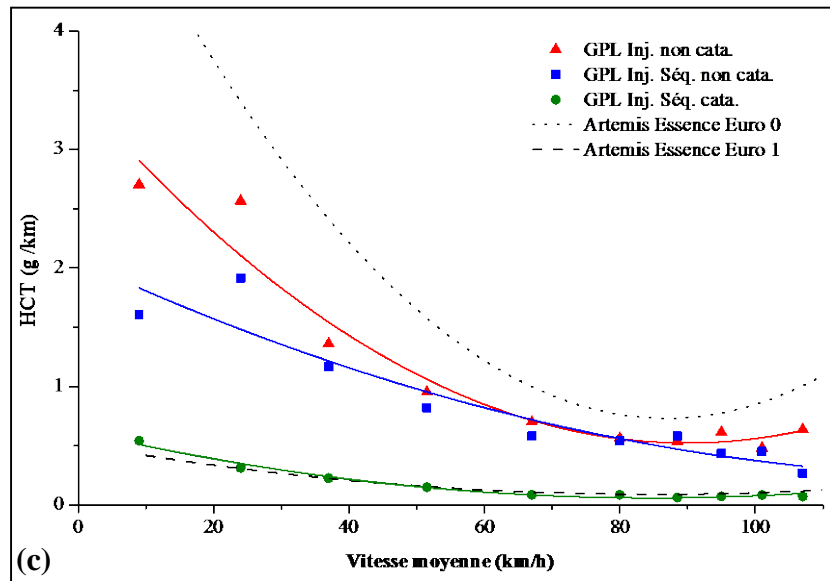
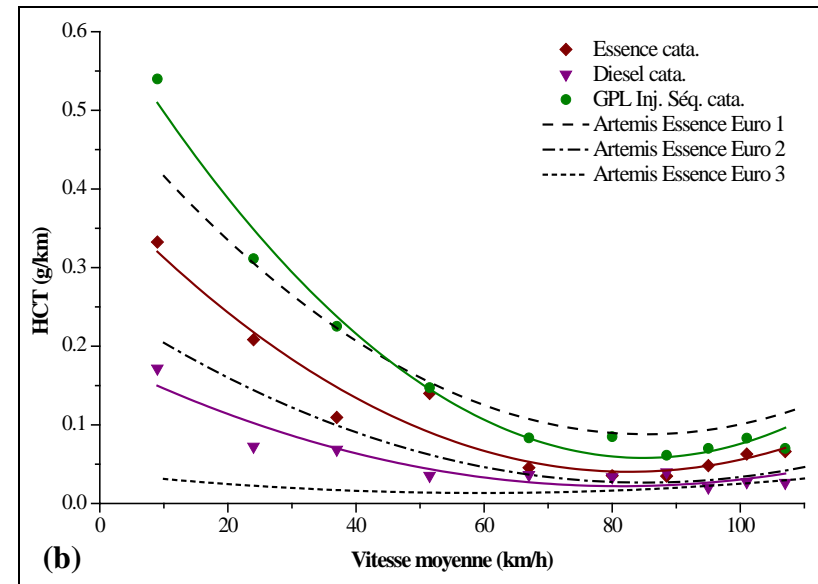
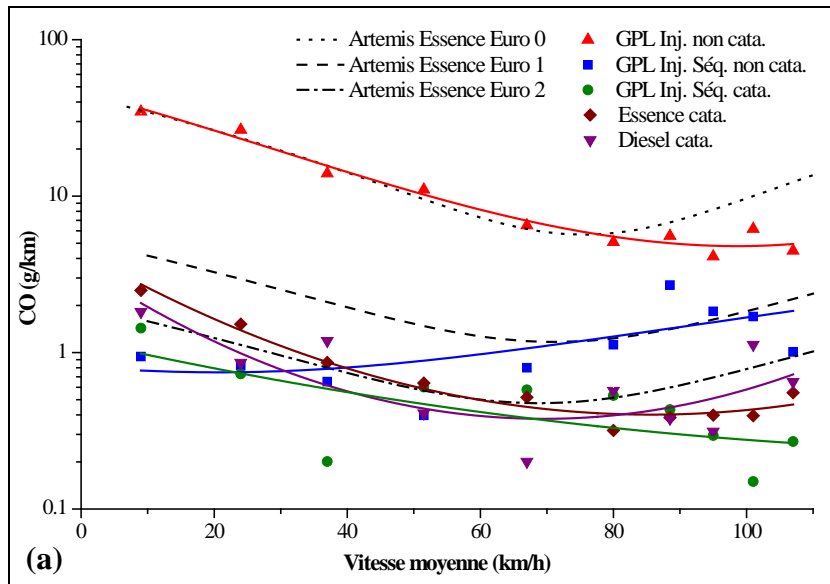


Figure IV.7 : Comparaison avec le modèle Artemis des émissions de CO (a), des émissions de HCT des véhicules catalysés (b) et GPL (c) et émissions de NOx (d) pour l'ensemble des carburants et technologies

Dans notre cas, les véhicules non catalysés roulant au GPL ou à l'essence émettent des taux de NO_x dépassant les 2 g/km. Pour les véhicules similaires équipés d'un catalyseur, les émissions atteignent des niveaux plus faibles, de l'ordre de 0,4 g/km pour les moteurs fonctionnant au GPL à injection séquentielle et à l'essence. En revanche, les moteurs Diesel émettent encore des niveaux relativement élevés de NO_x pouvant atteindre 0,6 g/km, même équipés d'un catalyseur.

Les émissions de NO_x des véhicules GPL à injection séquentielle catalysés et non catalysés sont les plus élevées (Figure IV.7d), comparativement aux autres carburants. Ce constat qui est confirmé par plusieurs auteurs (Yang, Chien et al. 2007, Adam, Astorga et al. 2011, Lau, Hung et al. 2011, Huang, Lou et al. 2013) est dû principalement à la température élevée de combustion du GPL (900–1000°C) contre 500–800°C pour l'essence. De plus, pour les véhicules catalysés, le rapport stœchiométrique air/carburant du GPL de l'ordre de 15,5 (selon la composition du GPL) étant plus élevé que celui de l'essence (14,7) entraîne un excédent d'oxygène dans les gaz d'échappement du GPL, limitant de ce fait l'efficacité du catalyseur trois voies lors de la conversion des NO_x en azote (Yang, Chien et al. 2007).

Les essais réalisés avec des véhicules GPL en laboratoire sur banc à rouleaux, avec des cycles classiques tels que NEDC ou FTP 75 (Daham, Li et al. 2009, Oprešnik, Seljak et al. 2012, Kousoulidou, Fontaras et al. 2013) ne mettent pas en évidence les mêmes niveaux élevés de NO_x. L'explication vient du fait que les cycles utilisés n'incluent pas de fortes accélérations, sous estimant de fait les émissions de NO_x par rapport à celles obtenues dans un trafic réel.

Enfin, la diminution constatée des émissions de NO_x pour les véhicules GPL à injection séquentielle pourrait laisser penser à une baisse des performances du moteur. En effet, il est démontré selon Masi (Masi 2012) que les performances du moteur fonctionnant au GPL sont réduites aux régimes élevés, autrement dit aux grandes vitesses de roulage, en raison de la livraison insuffisante de GPL gazeux aux chambres de combustion. Les méthodes de mesure actuelles ne permettent pas de quantifier précisément le débit de carburant gazeux, contrairement à la technologie d'injection liquide séquentielle qui supprime cet inconvénient.

IV.2.3.2.2. Emissions de CO₂

Les émissions de CO₂ des véhicules non catalysés (Figure IV.8) sont plus élevées pour le GPL à injection séquentielle que pour le GPL à injection standard et l'essence. Ceci est principalement dû à une meilleure combustion du GPL dans le moteur (entraînant des émissions plus faibles de CO et de THC pour l'injection séquentielle). Le rapport air/carburant est mieux géré par l'injection séquentielle que l'injection standard, ce qui rend la combustion plus efficace.

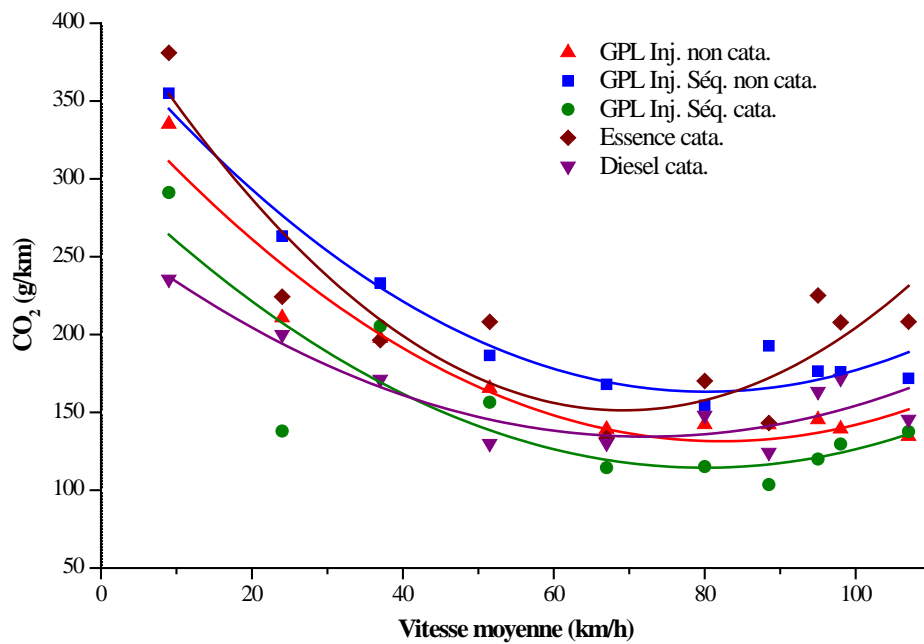


Figure IV.8 : Emissions de CO₂ des différentes catégories de véhicules

Pour les véhicules catalysés, ceux fonctionnant au Diesel demeurent encore les plus faibles émetteurs de CO₂ avec 162 g/km, contre 163 g/km émis par le GPL à injection séquentielle et 209 g/km pour l'essence.

Pour les deux carburants Diesel et GPL, les mesures en embarqué ont donné des émissions de CO₂ équivalentes avec ou sans catalyseur pour les deux types de kit d'injection. Des études antérieures sur banc à rouleaux (Díaz, Schifter et al. 2000, Ristovski, Jayaratne et al. 2005, Yang, Chien et al. 2007) ont mis en évidence des émissions de CO₂ plus faibles des véhicules GPL par rapport aux véhicules à essence. Cela est attribué à la forte proportion hydrogène/carbone du GPL par rapport à l'essence.

IV.2.3.3. Comparaison des émissions par catégorie de véhicules

Le facteur d'émission moyen d'une catégorie de véhicule, pour l'ensemble des vitesses pratiquées, est la moyenne des facteurs d'émission de chaque type de circuit ; pondérés par la part des kilométrages effectués en circuit : urbain ; périurbain et autoroutier et qui sont respectivement de 25, 30 et 45%., comme mentionné dans l'équation (III.21).

Le tableau IV.2 résume les niveaux moyens d'émissions obtenus pour l'ensemble des tests et des carburants de notre échantillon. Les émissions de véhicules roulant au GPL sans catalyseur à injection standard restent supérieures aux émissions de l'essence non catalysé. Les véhicules GPL équipés de kit à injection séquentielle multipoint peuvent respecter la norme Euro 3 et rivalisent avec les véhicules à essence catalysés. La comparaison avec le Diesel catalysé montre que seul le GPL à injection séquentielle multipoint avec catalyseur peut atteindre les

performances du Diesel catalysé qui reste performant en termes d'émissions de gaz polluants hors NOx et particules.

**Tableau IV.2 : Facteurs d'émissions moyens des véhicules
selon différents carburants et technologies**

Type de carburant		Catalysé	Facteur d'émission (g/km)			
			CO	HCT	NOx	CO ₂
Essence		non	10,69 ± 7,07	1,58 ± 0,96	1,51 ± 0,26	176,1 ± 44,6
		oui	0,81 ± 0,69	0,20 ± 0,18	0,30 ± 0,15	209,8 ± 68,1
Bicarburant	Essence	non	9,01 ± 5,02	1,27 ± 0,69	1,88 ± 0,38	204,9 ± 73,9
	GPL injection standard	non	11,81 ± 10,55	1,11 ± 0,84	1,60 ± 0,26	175,2 ± 62,1
	GPL injection séquentielle	non	1,20 ± 0,69	0,84 ± 0,55	2,11 ± 0,36	207,7 ± 61,3
		oui	0,51 ± 0,37	0,20 ± 0,24	0,44 ± 0,19	163,2 ± 57,0
Diesel		oui	0,75 ± 0,50	0,05 ± 0,05	0,52 ± 0,23	162,0 ± 34,9

La technologie de conversion GPL à injection séquentielle est donc essentielle pour réduire les niveaux d'émissions de polluants. L'efficacité de celle-ci permet d'obtenir de très faibles taux de CO, de HCT, mais pas de NOx.

Quant aux véhicules à bicarburant non équipés de convertisseurs catalytiques et roulant à l'essence, ils émettent des niveaux élevés de CO₂, conséquence d'une consommation de carburant plus élevée. Ceci a été observé pour tous les véhicules convertis au GPL équipés d'un système d'injection de base dit "standard". Ce n'est pas le cas pour les véhicules équipés d'un système d'injection séquentiel multipoint avec deux contrôleurs d'injection (ECU) propres aux deux carburants menant ainsi à une double optimisation indépendamment du combustible utilisé (Karamangil 2007, Li, Yang et al. 2010, Gumus 2011, Gumus and Ugurlu 2011, Masi 2012).

IV.2.4. Emissions à vitesse stabilisée

L'objectif de ce type de mesures d'émission en vitesses stabilisées est d'évaluer l'impact du niveau de ces dernières sur les émissions de monoxydes de carbone, d'hydrocarbures, d'oxydes d'azote et de dioxydes de carbone, à partir de données recueillies sur le terrain de deux véhicules de notre échantillon à bicarburant essence/GPL dont un non catalysé (Chevrolet Optra 2010) et le second catalysé (Renault Symbol 2011). La procédure de test est décrite dans le chapitre méthodologie (§ III.8.2.3).

A titre indicatif, la figure IV.9 représente les relevés des différentes vitesses stabilisées obtenus par GPS lors des essais de mesures d'émission réalisés avec le véhicule Optra. Le tableau IV.3 met en évidence les fluctuations de la vitesse de consigne inhérentes à la conduite manuelle du conducteur.

Tableau IV.3 : Caractéristiques cinématiques des fluctuations de la vitesse de consigne

Vitesse de consigne (km/h)	30	40	50	60	80	100
Moyenne (km/h)	30,23	40,63	48,87	59,45	79,24	97,48
Ecart-type (km/h)	1,40	2,01	1,06	1,34	1,42	1,72
Min (km/h)	26,08	32,47	41,13	55,84	74,95	90,62
Max (km/h)	35,65	46,84	53,10	65,06	84,40	102,82

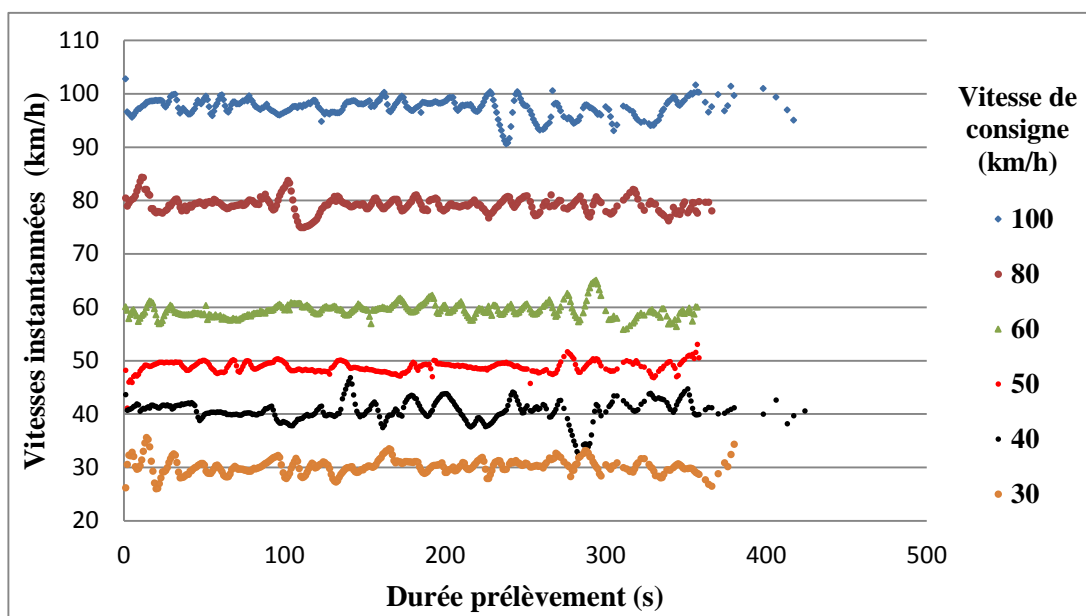


Figure IV.9 : Exemple de fluctuations des vitesses lors des prélèvements d'échantillons du véhicule Optra à vitesses stabilisées.

Les résultats d'essais de mesure d'émissions réalisés en vitesses stabilisées sur les deux véhicules sont représentés sur les figures IV.10 et IV.11. Celles-ci sont comparées avec les résultats de mesure des émissions en circulation réelle propres aux deux véhicules. Le premier constat à faire de cette comparaison pour l'ensemble des polluants et pour les deux technologies de véhicules, est que les niveaux d'émissions obtenus à vitesses stabilisées sont inférieurs à ceux obtenus en circulation réelle pour des niveaux de vitesses équivalents, avec cependant un rapprochement de ceux-ci pour les vitesses élevées, ce qui montre l'impact des accélérations.

De plus, on peut constater de faibles variations des niveaux d'émissions en vitesse stabilisée pour la plupart des polluants par rapport à celles obtenues en vitesses réelles, sauf pour les NOx. Ce constat est mis en évidence par les travaux de Rakha et El-Schawarby (Rakha and Ding 2003, El-Shawarby, Ahn et al. 2005), qui montrent une certaine constance des émissions de polluants à vitesses stabilisées comprises entre 50 et 90 km/h, à l'exception aussi des NOx. Notons que ces auteurs utilisent la consommation spécifique de carburant (en litre/km) au lieu du CO₂, qui sont en fait intimement liés par une relation linéaire.

Quant aux émissions de NOx, on constate en mode stabilisé pour le véhicule Optra que la carburation GPL à injection séquentielle émet moins de NOx que la carburation essence, à l'inverse du véhicule Symbol catalysé. Cela montre que sans catalyseur et avec l'injection séquentielle, on peut encore réduire les émissions de polluant en adoptant un mode de conduite régulier sur route.

Ce que l'on peut retenir de cette étude de mesures d'émission de polluant à vitesses stabilisées, c'est l'impact positif qu'aurait une conduite régulière dans l'intervalle de vitesses moyennes de 50 à 90 km/h qui correspondent à une circulation suburbaine et autoroutière. D'où l'intérêt des pouvoirs publics de mettre en place des mesures de limitation de vitesse sur les axes routiers. Rakha (Rakha and Ding 2003) montrent qu'une diminution de la vitesse limite de 106 km/h à 90 km/h permet d'entraîner des diminutions de 60% des émissions de HC, de 80% de CO et 40% de NOx.

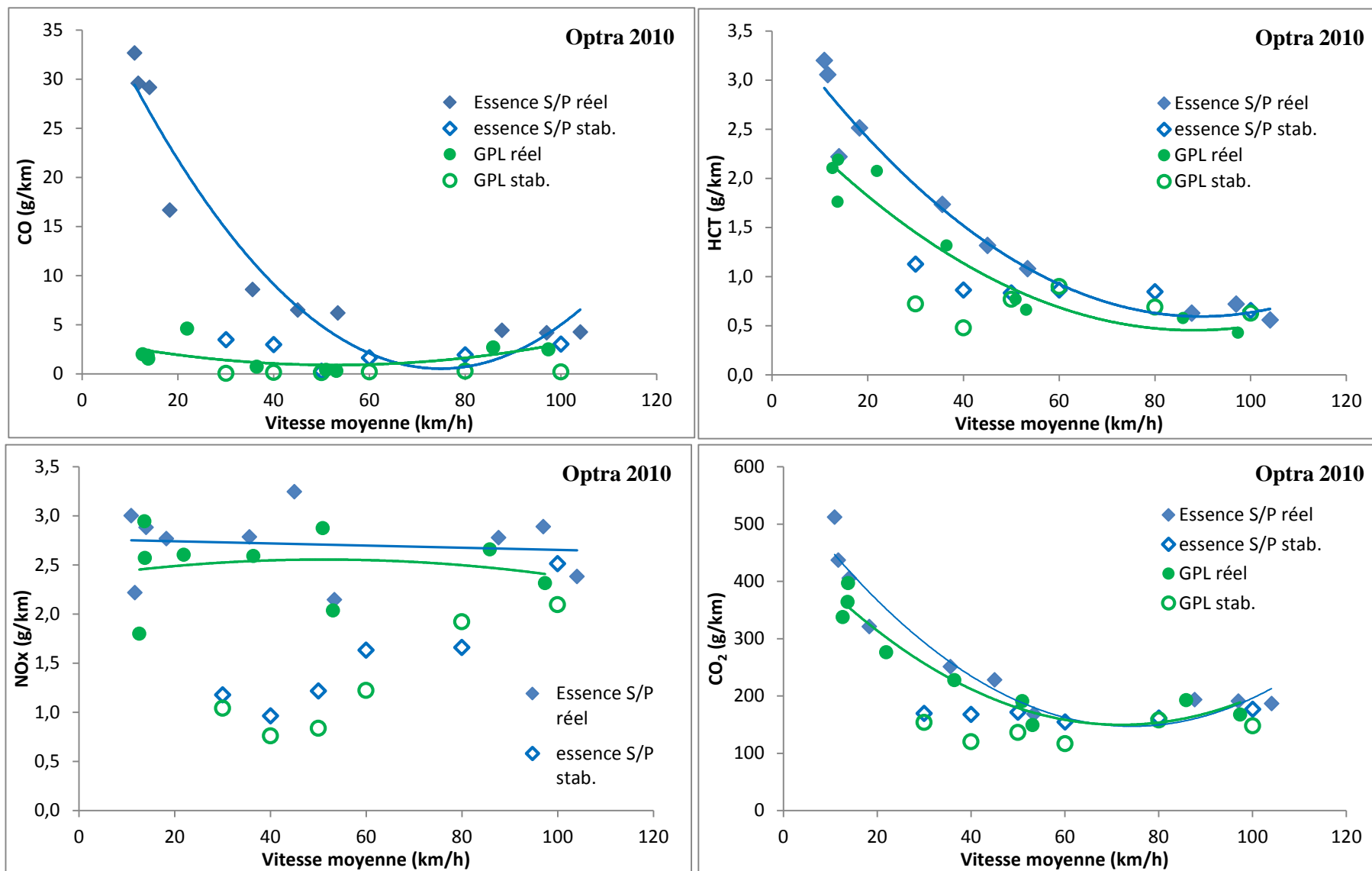


Figure IV.10: Comparaison des émissions réalisées en circulation réelle et à vitesses stabilisées pour le véhicule Optra non catalysé

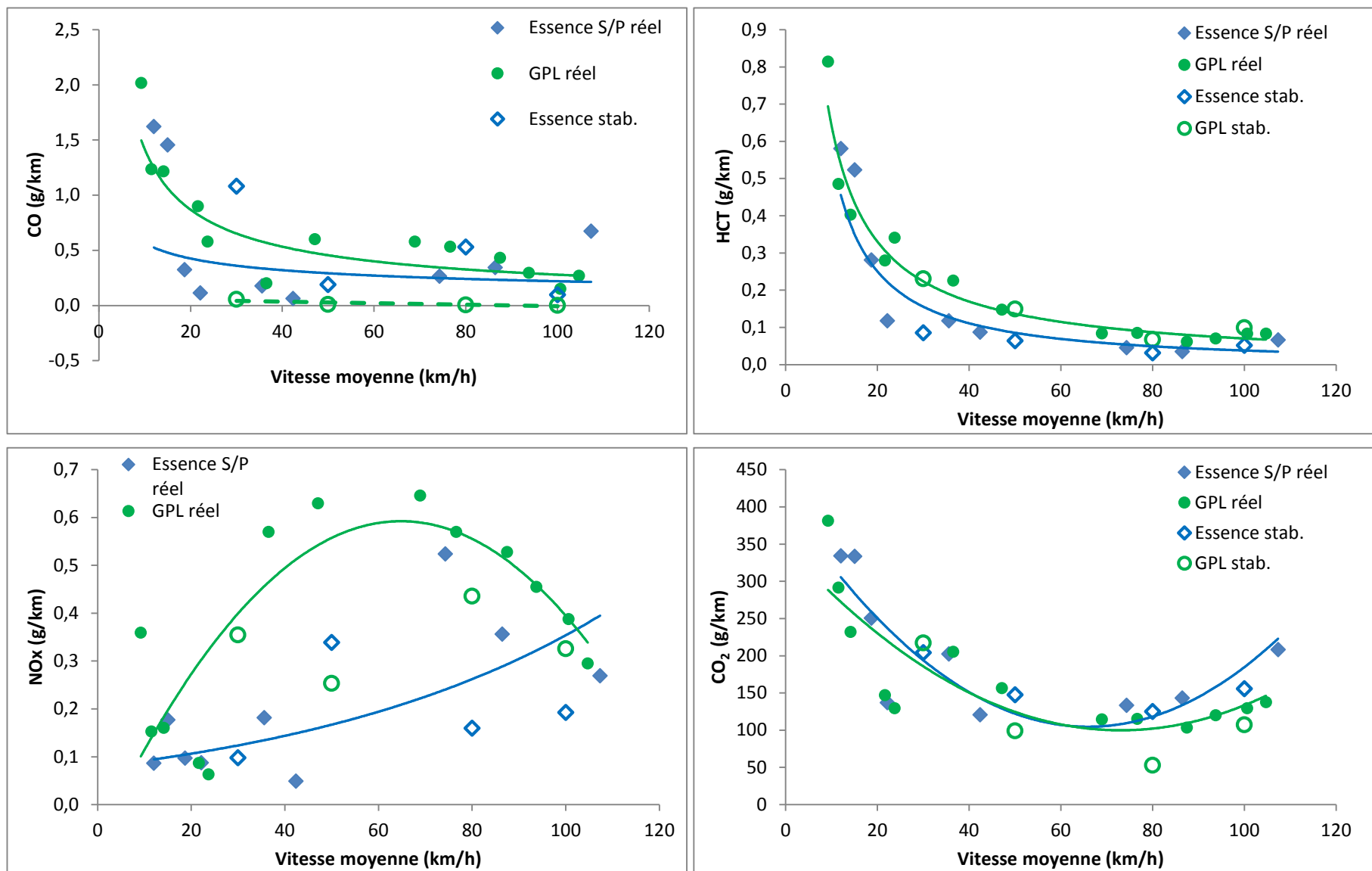


Figure IV.11: Comparaison des émissions réalisées en circulation réelle et à vitesses stabilisées pour le véhicule Symbol catalysé

IV.2.5. Normes d'émission

Au cours de la décennie passée, une baisse graduelle des valeurs des facteurs d'émission de polluants règlementés est constatée dans les pays développés. Celle-ci fait suite à l'introduction de réglementations de plus en plus strictes matérialisées par l'amélioration des technologies de dépollution existantes, telles que l'optimisation de l'apport des métaux précieux dans les catalyseurs et la réduction du temps d'activation de ces derniers avec pour conséquences de plus faibles émissions au démarrage à froid. Cependant des études réalisées par Jung (Jung, Lee et al. 2011) à partir de tests sur banc d'essais effectués sur un échantillon de 76 véhicules particuliers de différents âges et modèles sur le cycle FTP-75, montrent que les émissions de CO₂ demeurent insensibles au kilométrage du véhicule, autrement dit de son âge mais varient de manière quasi-proportionnelle avec le poids nominal brut de ce dernier et de sa cylindrée. Ntziachristos (Ntziachristos and Samaras 2000) avait déjà montré cette non sensibilité du CO₂ au kilométrage à partir d'une étude de synthèse regroupant les données d'émission de 402 véhicules testés sur 33 types de cycles de conduite au niveau de 8 laboratoires européens

Pour notre part, la figure IV.12 qui regroupe les émissions individuelles de CO₂ des 5 véhicules bicarburation AVEO de notre échantillon roulant à l'essence, confirme cette non sensibilité des émissions de CO₂ avec l'âge du véhicule. L'Aveo 2010 avec un kilométrage de 67 000 km émet autant de CO si ce n'est plus que l'Aveo 2004 avec un kilométrage de 179 000 km.

Par ailleurs, l'absence de norme d'émission est commune à de nombreux pays en développement (Almasri, Muneer et al. 2011, Hu, Wu et al. 2012). Ainsi, les véhicules sont soit importés, soit fabriqués sur place, mais sans norme imposée d'émission de polluants.

Dans notre cas, pour pallier cette absence de norme des véhicules testés, nous comparons les niveaux d'émissions par véhicule de notre échantillon aux émissions de véhicules similaires de norme d'émissions bien définie, en l'occurrence celles de la base de données d'émission européenne Artemis (André, Rapone et al. 2006).

Une telle comparaison a été effectuée par (Chan, Ning et al. 2004) entre des mesures d'émissions réelles sur route à Hong Kong et les valeurs calculées à partir d'une base de données du Royaume-Uni. Pour notre part, avec les caractéristiques (marque, modèle, âge, carburant, puissance, kilométrage) de notre échantillon de 17 véhicules testés (Tableau .III.1), les niveaux d'émission de chaque véhicule ont été comparés aux émissions des véhicules équivalents de la base de données européenne Artemis pour déterminer la norme Euro correspondante, qualifiée de pseudo-norme Euro (Joumard, André et al. 2007, Boughedaoui, Kerbach et al. 2008).

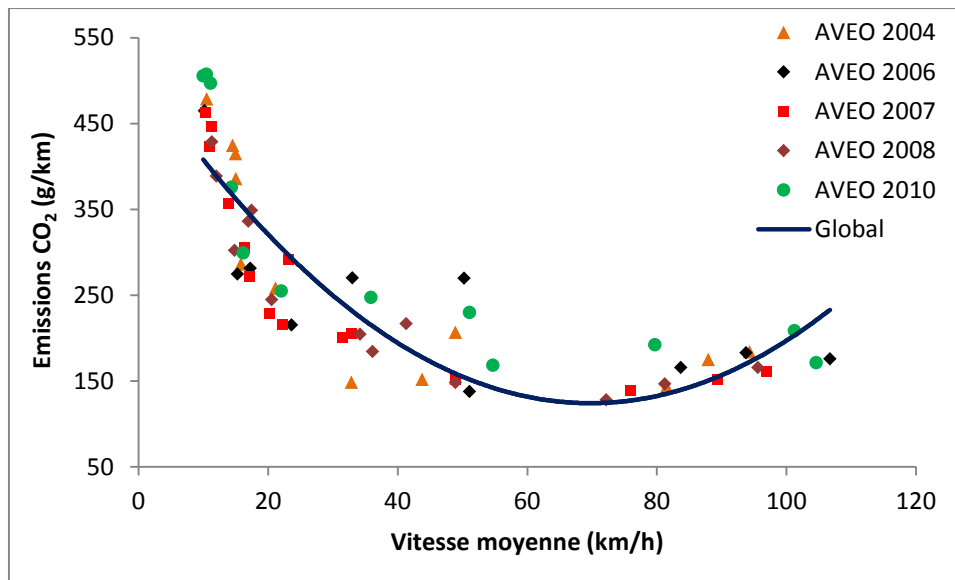


Figure IV.12 : Emissions de CO₂ de la série de véhicules AVEO à essence.

Le critère dégagé pour qu'un véhicule de l'échantillon appartienne à une pseudo-norme Euro (i) est que, pour tous les polluants considérés, les émissions mesurées doivent être comprises dans l'intervalle délimité par les 2 courbes d'Artemis relatives aux normes Euro (i) et Euro (i+1) en fonction de la vitesse moyenne. En conséquence, les véhicules de l'échantillon ont été classés en trois catégories de pseudo normes Euro : 10 véhicules comme pseudo-norme Euro 0, 2 véhicules comme pseudo-norme Euro 1 et 5 véhicules comme pseudo-norme Euro 2.

Les véhicules GPL non catalysés équipés d'un système d'injection standard arrivent difficilement à satisfaire la norme Euro 1, alors que ceux non catalysés équipés du système d'injection séquentielle pourrait être conformes à la norme Euro 3 en ce qui concerne les HCT (Figure IV.7b). Les émissions des véhicules GPL catalysés à injection séquentielle sont de 0,05, 0,27 et 0,43 g/km pour le CO, THC et NO_x respectivement, ce qui est proche de celles trouvées par Lau et al. (2011) pour un véhicule équivalent Euro 3. On voit donc que l'utilisation de la technologie d'injection séquentielle pour un véhicule GPL permet à elle seule de monter d'une norme ou deux par rapport à son homologue à essence.

Cette classification montre que parmi tous les véhicules testés commercialisés en Algérie pour les années 2010 et 2011, beaucoup d'entre eux sont proches de la norme Euro 0, correspondant aux véhicules commercialisés avant 1993 en Europe. Ce retard dans la conformité à la norme est observée dans de nombreux pays où les normes d'émission ne sont pas appliquées pour les véhicules neufs (Hu, Wu et al. 2012) . La croyance générale que les véhicules répondent aux normes de mise sur le marché du pays de fabrication est irréaliste, car les constructeurs automobiles exportent leurs véhicules en conformité avec la réglementation du pays

d'importation : les normes ne sont pas des normes de fabrication, mais des normes de mise sur le marché ou de commercialisation finale. Par conséquent, le renouvellement d'un parc de véhicules sans tenir compte de la norme d'émission ne pourrait contribuer systématiquement à réduire la pollution atmosphérique.

IV.2.6. Maintenance véhicules

Les rapports CO/CO₂ et HCT/CO₂ expriment la part (en pourcentage) des imbrûlés et constituent un bon indicateur de l'état de maintenance des véhicules utilisé pour l'évaluation de l'entretien du fonctionnement du moteur (Pierson, Gertler et al. 1996, Chiang, Tsai et al. 2008). En raison du vieillissement des véhicules et de leur faible niveau d'entretien, le pot catalytique se détériore au fil du temps avec pour conséquences des émissions plus élevées en CO, HCT et NO_x. Le tableau IV.4 résume les valeurs de ces ratios pour notre échantillon de véhicules. Les rapports CO/CO₂ et HCT/CO₂ pour tous les véhicules non catalysés sont respectivement de 5,3% et 0,67%. Ils sont plus élevés que leurs équivalents issus de la base de données d'Artemis. Leurs niveaux d'entretien est proche de ceux des véhicules Euro 0 exploités en Europe, selon la base de données d'Artemis.

Des niveaux de maintenance médiocres ont été observés pour des véhicules utilitaires légers à partir de mesures d'émissions effectuées à bord (Boughedaoui, Kerbachi et al. 2008). Même dans le cas de véhicules GPL récents, de nombreuses études ont révélé qu'un faible niveau d'entretien avait pour effets de fortes émissions de polluants, conduisant à la perte de l'avantage environnemental du GPL. Pour notre étude, rapportons le cas du véhicule Chevrolet Cruze essence pourtant récent (2010) qui a été retiré de notre échantillon de véhicules, car très gros émetteur de polluants, avec des concentrations à l'échappement de CO au cours des tests supérieures à celles de CO₂, synonyme d'une très mauvaise combustion de carburant. Le tableau IV.5 présente à titre indicatif les niveaux de concentration d'échantillons de gaz d'échappement récoltés par mini-CVS dans des sacs Tedlar, de trois véhicules essence, dont un non catalysé (Toyota Yaris) et deux disposant d'un pot catalytique (Chevrolet Cruze et Renault Symbol). On voit que le véhicule Chevrolet présente des taux très élevés de CO et HCT par rapport aux deux autres véhicules, au point que l'analyseur de CO est arrivé à sa pleine échelle de 4% (40 000 ppm) de CO pour les trajets suburbain et autoroutier.

**Tableau IV.4 : Indicateurs de maintenance de l'échantillon de véhicules
comparés à ceux de la base de données d'Artemis**

Type de carburation	Catalysé	Année	Mesures		Artemis		
			Ratio (%)				
			CO/CO ₂	HCT/CO ₂	Norme	CO/CO ₂	HCT/CO ₂
Essence (monocarburation)	non	1989 - 2011	5,67 ± 2,23	0,85 ± 0,34	Euro 0 (Essence)	9,16 ± 4,01	1,253 ± 0,610
	oui	2006 - 2011	0,24 ± 0,13	0,09 ± 0,07	Euro 1 (Essence)	1,04 ± 0,25	0,084 ± 0,022
Essence (bicarburation)	non	2004 - 2010	4,25 ± 1,07	0,59 ± 0,13	Euro 2 (Essence)	0,43 ± 0,10	0,035 ± 0,011
	oui	2011	0,36 ± 0,19	0,05 ± 0,03	Euro 3 (Essence)	0,47 ± 0,29	0,011 ± 0,004
GPL Injection Standard (bicarburation)	non	2004 - 2010	5,94 ± 3,26	0,58 ± 0,27	Euro 4 (Essence)	0,21 ± 0,15	0,007 ± 0,002
GPL Injection Séquentielle (bicarburation)	non	2010 - 2011	0,63 ± 0,40	0,38 ± 0,16	Euro 1 (Essence)	0,21 ± 0,08	0,021 ± 0,011
	oui	2011	0,34 ± 0,16	0,10 ± 0,06	Euro 2 (Diesel)	0,13 ± 0,10	0,017 ± 0,008
Diesel	oui	1998 - 2010	0,44 ± 0,21	0,03 ± 0,02	Euro 3 (Diesel)	0,04 ± 0,03	0,009 ± 0,004

La cause en est le dysfonctionnement du pot catalytique, suite à l'utilisation par le propriétaire du véhicule d'essence plombé au lieu d'essence sans plomb. La fonction de dépollution de ce véhicule devenue caduc par l'utilisation de l'essence plombée a rendu le véhicule beaucoup plus polluant qu'un véhicule non équipé d'un pot catalytique. Il y a lieu de rappeler que le plomb est reconnu comme un poison des catalyseurs.

Par la suite, le propriétaire de ce véhicule récent a supprimé le pot catalytique pour éviter les désagréments de conduite tels que le manque de puissance et les fortes émanations de fumées à l'échappement du véhicule. Ainsi, la sur-pollution de l'essence plombée pour les véhicules catalysés échappe à bon nombre de conducteurs.

Tableau IV.5 : Surémission des polluants CO et HCT du véhicule Chevrolet Cruze catalysé par rapport aux véhicules Toyota Yaris non catalysé et Renault Symbol catalysé.

Test	CO2 (%)			CO (ppm)			HCT (ppm)		
	Cruze 2010	Yaris 2011	Symbol 2010	Cruze 2010	Yaris 2011	Symbol 2010	Cruze 2010	Yaris 2011	Symbol 2010
Ralenti	0,51	0,263	0,52	1725	50	0	188	7,1	52,1
Urbain	0,915	0,537	0,664	2860	1233	0	954	202	3,26
Suburbain	1,319	1,111	1,205	> 40 000	1210	2	726	330	7,41
Autoroutier	1,727	2,037	2,39	> 40 000	2760	5	822	460	10,6

Ceci pose la problématique de l'entretien maintenance des véhicules en Algérie en termes de qualification des garagistes et de la qualité des pièces de rechange. L'apparition de concessionnaires représentants des constructeurs sur le marché national a permis d'améliorer sensiblement la maintenance des seuls véhicules récents. Cependant, les coûts élevés des services offerts rendent très limité le recours à leur service d'entretien et maintenance à ce jour.

IV.2.7. Conclusion

Les résultats d'émissions sur route ont mis en évidence que le type de kit de conversion GPL utilisé est déterminant quant aux niveaux d'émissions obtenus. Pour les kits d'injection de premières générations dits à "injection standard", les émissions générées sont supérieures dans l'ensemble à celles des véhicules à essence. En revanche, les kits de conversion dits à "injection séquentielle

multipoint", installés sur des véhicules non catalysés, voient leurs niveaux d'émission de CO et HCT rivaliser avec les véhicules à essence catalysés de norme Euro 1 et Euro 2.

Le seul aspect environnemental négatif pour les véhicules GPL à injection séquentielle catalysés est l'émission plus élevée de NOx par rapport aux véhicules à essence catalysés, mais qui reste néanmoins équivalente ou même inférieures à celles des véhicules Diesel (Kim, Choi et al. 2013). Cette surémission est inhérente à la température élevée de combustion du GPL dans le moteur. Donc au final, les émissions très limitées de particules par les véhicules GPL qui restent équivalentes ou inférieures à celles d'un véhicules Diesel doté d'un filtre à particules (FAP) rend ces premiers plus écologiques que leur homologues Diesel (Ristovski, Jayaratne et al. 2005, Kim, Choi et al. 2013).

La comparaison des émissions de chaque véhicule de notre échantillon avec ceux de la base Artemis selon les caractéristiques de motorisation et la présence ou non de système de dépollution a permis de leur attribuer une pseudo-norme. Ainsi, les 17 véhicules de l'échantillon ont été classés en trois catégories de pseudo normes Euro : 10 véhicules non catalysés essence et GPL à injection standard en norme pseudo-Euro 0, deux véhicules comme pseudo-norme Euro 1 et cinq véhicules comme pseudo-norme Euro 2.

L'aspect entretien et maintenance des véhicules de tout âge est primordial pour la limitation des émissions polluantes, particulièrement pour les véhicules non catalysés roulant au GPL avec la technologie d'injection séquentielle, qui a montré de bonnes aptitudes à limiter les émissions de CO et HCT aux niveaux des véhicules catalysés.

Conclusion générale

Ce travail a permis de déterminer pour la première fois en Algérie les émissions unitaires de polluants d'un échantillon de 17 véhicules légers de différents types de carburation (essence, diesel et GPL) et technologies (catalysé ou non, type d'injection) et ce, dans des conditions réelles de circulation. A cet effet, un système embarqué dénommé "mini-CVS" a été utilisé pour la collecte des gaz d'échappement. Cette technique d'échantillonnage s'est révélée une méthode alternative fiable et économique par rapport à la méthode de laboratoire dite "CVS". La technique du mini-CVS embarqué à bord d'un véhicule présente indéniablement l'avantage d'éliminer les problèmes et les incertitudes posés par la reproduction des conditions réelles de conduite en laboratoire, particulièrement la représentativité des cycles de conduite ainsi que les conditions de route (pente et rugosité de la route, conditions météo, etc...). Tous ces paramètres ont une influence certaine dans la quantification des émissions.

Néanmoins, face à ces avantages, il faut mettre en balance toutes les contraintes et imprécisions dans la mesure des émissions, dues à l'extrême simplicité du mini-CVS. Le respect de certaines conditions dans l'emploi du mini-CVS permet toutefois d'assurer que les mesures d'émission obtenues sont représentatives des émissions réelles avec une marge d'erreur n'excédant pas les 10% selon d'autres utilisateurs du dispositif.

Les niveaux d'émission de polluants ont été étudiés par rapport à la carburation, la technologie du moteur, et la norme d'émission européenne Euro.

Les mesures faites sur route ont été précédées de mesures au ralenti à chaud. Les différents tests réalisés au ralenti révèlent la bonne aptitude des véhicules GPL non catalysés à injection séquentielle à réguler les émissions aux bas régimes pour tous les polluants, ce qui les rend performants autant que leurs homologues catalysés. En revanche les autres véhicules non catalysés essence et GPL (à injection standard), restent de gros émetteurs de polluants dans les situations de congestion de trafic.

Les résultats d'émissions sur route ont mis en évidence pour les véhicules non catalysés à bicarburation roulants au GPL que le type d'injection est déterminant quant aux niveaux des émissions obtenus. Pour les kits d'injection dits "standard", les émissions générées sont supérieures dans l'ensemble à leurs homologues à essence. En revanche, les kits d'injection dits "séquentielle multipoint" installés sur des véhicules non catalysés voient leurs niveaux d'émission de CO et HCT rivaliser avec les véhicules à essence catalysés de norme Euro 1 et Euro 2.

Le seul aspect environnemental négatif pour les véhicules GPL à injection séquentielle catalysés ou non est l'émission élevée des NOx par rapport aux véhicules à essence, mais qui reste néanmoins équivalente à celles des véhicules Diesel. Cette surémission est inhérente à la température élevée de combustion du GPL dans le moteur. Donc au final, les émissions très limitées de particules par les véhicules GPL, contrairement aux véhicules Diesel, les rendent plus écologiques que ces derniers.

Nous avons pu constater que de nombreux véhicules neufs importés sont dépourvus de système de dépollution et donc demeurent aussi polluants que les véhicules anciens. Cela indique que les véhicules importés par les pays en développement ne répondent pas systématiquement aux dernières normes en vigueur dans le pays du constructeur. L'application des normes d'émission de polluants par le pays importateur est le seul moyen d'introduire des technologies plus propres et de réduire les émissions des véhicules.

La comparaison des émissions de chaque véhicule de notre échantillon avec ceux de la base européenne Artemis, selon les caractéristiques de motorisation et la présence ou non de système de dépollution, a permis de leur attribuer une pseudo-norme. Ainsi, les 17 véhicules de l'échantillon ont été classés en trois catégories de pseudo normes Euro : 10 véhicules non catalysés essence et GPL à injection standard en norme pseudo-Euro 0, deux véhicules comme pseudo-norme Euro 1 et cinq véhicules comme pseudo-norme Euro 2.

Les mesures d'émissions menées à différentes vitesses stabilisées ont mis en évidence l'impact positif de réduction des émissions de polluants qu'aurait une conduite régulière dans l'intervalle de vitesses moyennes de 50 à 90 km/h, qui correspondent à une circulation suburbaine et autoroutière. D'où l'intérêt des pouvoirs publics de mettre en place les infrastructures nécessaires pour fluidifier le trafic avec : des voies à sens unique, des ralentisseurs répondants aux normes standards dans les centres urbains, des ronds-points et feux tricolores aux intersections et des mesures coercitives de limitation de vitesses (radars, brigades mobiles et caméras de surveillance).

L'aspect entretien et maintenance des véhicules de tout âge est primordial pour la limitation des émissions polluantes, particulièrement pour les véhicules non catalysés roulant au GPL avec la technologie d'injection séquentielle qui a montré de bonnes aptitudes à limiter les émissions de CO et HCT aux niveaux des véhicules catalysés.

L'État qui vient d'imposer aux concessionnaires l'introduction d'un quota annuel de 10% de véhicules dédiés au GPLc et dont 80%, au moins, à équiper en Algérie avec un kit GPL, n'a malheureusement pas indiqué le type de technologie GPL adéquat à mettre en place. Aussi cette

mesure, aussi louable soit-elle, risque de n'avoir qu'un impact limité sur la réduction de la pollution automobile.

Les résultats obtenus serviront à l'élaboration de l'inventaire global des émissions de polluants issus du trafic routier à l'échelle nationale.

Une suite à donner à ce travail serait de l'étendre en augmentant le nombre de véhicules légers testés pour améliorer la précision des facteurs d'émissions unitaires et tenir compte de situations plus variées de conduite sur route. Des mesures sur bus, dont la quasi-totalité roule au Diesel en Algérie, seraient aussi importantes à mener compte tenu de la problématique de la pollution qui règne dans les grandes agglomérations. Enfin, il y aurait aussi intérêt de mener une synthèse des émissions unitaires de pays nord-africains similaires à l'Algérie ; à l'image de ce qui est communément fait dans les pays développés.

Bibliographie

- Adam, T. W., C. Astorga, M. Clairotte, M. Duane, M. Elsasser, A. Krasenbrink, B. R. Larsen, U. Manfredi, G. Martini, L. Montero, M. Sklorz, R. Zimmermann and A. Perujo (2011). "Chemical analysis and ozone formation potential of exhaust from dual-fuel (liquefied petroleum gas/gasoline) light duty vehicles." *Atmospheric Environment* **45**(17): 2842-2848.
- ADEME (2007). "Les normes Euro pour limiter les émissions de polluants des véhicules neufs." http://www.energies-davenir.com/bibliotheque-ea/parc_vehicule_deplacement_personnels/normes_euro_vehicules_ademe.pdf.
- Almasri, R., T. Muneer and K. Cullinane (2011). "The effect of transport on air quality in urban areas of Syria." *Energy Policy* **39**(6): 3605-3611.
- André, J. M. (2005). "Vehicle emission measurement collection of the ARTEMIS database." INRETS report, n°LTE 0504, Bron, France, 27 p., <http://www.inrets.fr/ur/lte/publications/publications-pdf/Joumard/A3312reportJMALTE0504.pdf>.
- André, M. (2004). "The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions." *Science of the Total Environment* **334-335**: 73-84.
- André, M. and U. Hammarström (2000). "Driving speeds in Europe for pollutant emissions estimation." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **5**(5): 321-335.
- André, M., M. Rapone, N. Adra, I. Pollak, M. Keller and I. Mc Crae (2006). *Traffic characteristics for the estimation of pollutant emissions from road transport*: 89pp.
- Autogassolutions (2014). "The art of LPG conversion." <http://www.autogassolutions.co.uk/autogas-library/lpg-system-generations>.
- Azzoug, S. (2012). "Le GPL Carburant, quelle place dans le modèle national de consommation des carburants routiers ?" Dépêche portail CDER du 13 septembre 2012, <http://portail.cder.dz/spip.php?article2620>.
- Bailey, J. C., K. Gunary, B. Schmidl and M. L. Williams (1990). "Speciated hydrocarbon emissions from a sample of UK vehicles on the road over a range of speeds." *Science of the Total Environment* **93**: 199-206.
- Bayraktar, H. and O. Durgun (2005). "Investigating the effects of LPG on spark ignition engine combustion and performance." *Energy Conversion and Management* **46**(13-14): 2317-2333.
- Beevers, S. D. and D. C. Carslaw (2005). "The impact of congestion charging on vehicle speed and its implications for assessing vehicle emissions." *Atmospheric Environment* **39**(36): 6875-6884.
- Bishop, G. and D. Stedman (1996). "Measuring the emissions of passing cars." *Accounts of Chemical Research* **29**(10): 489-495.
- Boughedaoui, M. (2007). Thèse de Doctorat d'Etat : "Etude des émissions polluantes issues du trafic routier en Algérie", Ecole Nationale Polytechniques, Alger, 18 Décembre 2007.
- Boughedaoui, M., R. Kerbach and R. Joumard (2008). "On-Board Emission Measurement of High-Loaded Light-Duty Vehicles in Algeria." *Journal of the Air & Waste Management Association* **58**(1): 45-54 , <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.3158.3151.3145>.

Boughedaoui, M., R. Kerbachi, D. Kessali and R. Joumard (2004). "Mesure de la Pollution Plombifere dans l'air Ambiant d'Alger [Measurement of Lead Pollution in the Ambient Air of Algiers]." *Pollution Atmosphérique* **181**: 105-111.

CG Gas (2009). http://www.cggas.co.uk/lpg_systems.htm

Chan, T. L., Z. Ning, C. W. Leung, C. S. Cheung, W. T. Hung and G. Dong (2004). "On-road remote sensing of petrol vehicle emissions measurement and emission factors estimation in Hong Kong." *Atmospheric Environment* **38**(14): 2055-2066.

Chaumerliac, V. (1995). Thèse de Dostorat : "Commande multivariable d'un moteur à allumage commandé : Amélioration du rendement sous différentes contraintes", Institut national des sciences appliquées de Toulouse, Toulouse, France, 09 Mars 1995.

Chiang, H.-L., J.-H. Tsai, Y.-C. Yao and W.-Y. Ho (2008). "Deterioration of gasoline vehicle emissions and effectiveness of tune-up for high-polluted vehicles." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **13**(1): 47-53.

Daham, B., H. Li, G. Andrews and K. Ropkins (2009). "Comparison of Real World Emissions in Urban Driving for Euro 1-4 Vehicles Using a PEMS." SAE Technical Paper: 01-0941.

De Haan, P. and M. Keller (2004). "Modelling fuel consumption and pollutant emissions based on real-world driving patterns: the HBEFA approach." *International journal of environment and pollution* **22**(3): 240-258.

De Vlieger, I. (1997). "On board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars." *Atmospheric Environment* **31**(22): 3753-3761.

Degobert, P. (1992). "Automobile et Pollution." Editions Technip, Paris, 1992, 509 p.

Díaz, L., I. Schifter, E. López-Salinas, E. Gamas, R. Rodriguez and S. Avalos (2000). "Optimizing automotive LPG blend for Mexico City." *Fuel* **79**(1): 79-88.

Driassa, N. (2008). Mémoire de Magister : "Développement de l'inventaire des émissions de polluants issues du trafic routier en Algérie", Département de génie mécanique, Université Saad Dahlab Blida, Algérie, Juin 2008.

El-Shawarby, I., K. Ahn and H. Rakha (2005). "Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **10**(1): 13-30.

ÉPA (2012). "Dépenses en santé (total) (% du PIB), Algérie."

<http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=3&codeStat=SH.XPD.TOTL.ZS&codePays=DZA&codeTheme2=3&codeStat2=x&codePays2=DZA&langue=fr>.

Franco, V., M. Kousoulidou, M. Muntean, L. Ntziachristos, S. Hausberger and P. Dilara (2013). "Road vehicle emission factors development: A review." *Atmospheric Environment* **70**(0): 84-97.

Frey, H. C., N. M. Roupail, A. Unal and J. D. Colyar (2001). "Measurement of On-Road Tailpipe CO, NO, and Hydrocarbon Emissions Using a Portable Instrument." Annual Meeting of the Air & Waste Management Association, June 24-28, 2001.

Frey, H. C., A. Unal, N. M. Roupail and J. D. Colyar (2003). "On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument." *Journal of the Air and Waste Management Association* **53**(8): 992-1002.

- Freyssenet, M. (2013). "Parc automobile mondial, par continent et par pays, 1898-2011. ." <http://freyssenet.com/files/Parc%20automobile%20mondial,%20par%20continent%20et%20pays,%201898%202011.xlsx>.
- Friedlingstein, P., R. Andrew, J. Rogelj, G. Peters, J. Canadell, R. Knutti, G. Luderer, M. Raupach, M. Schaeffer and D. van Vuuren (2014). "Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets." *Nature Geoscience* **7**(10): 709-715.
- Gamas, E. D., L. Diaz, R. Rodriguez, E. LÃ³pez-Salinas, I. Schifter and L. Ontiveros (1999). "Exhaust emissions from gasoline- and LPG-powered vehicles operating at the altitude of Mexico City." *Journal of the Air and Waste Management Association* **49**(10): 1179-1189.
- Gomez, C. (2015). "Marché mondial de l'automobile." http://www.gbm.scotiabank.com/English/bns_econ/auto_f.pdf.
- Guerzoni, S. and E. Molinaroli (1998). Les poussières sahariennes. Magazine : Pour la Science N° **247- Mai 1998**.
- Guibet, J.-C. (1997). "Carburants et moteurs." Tome 2, Editions Technip, Paris, 1997, 417 p.
- Gumus, M. (2011). "Effects of volumetric efficiency on the performance and emissions characteristics of a dual fueled (gasoline and LPG) spark ignition engine." *Fuel Processing Technology* **92**(10): 1862-1867.
- Gumus, M. and A. Ugurlu (2011). "Application of phase change materials to pre-heating of evaporator and pressure regulator of a gaseous sequential injection system." *Applied Energy* **88**: 4803-4810.
- Guo, H., Q. Zhang, Y. Shi and D. Wang (2007). "On-road remote sensing measurements and fuel-based motor vehicle emission inventory in Hangzhou, China." *Atmospheric Environment* **41**(14): 3095-3107.
- Hausberger, S., M. Rexeis, M. Zallinger and R. Luz (2009). "Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3." University of Technology, Graz, Report Nr. I-20/2009 Haus-Em **33**(08): 679.
- Holmèn, B. A. and D. A. Niemeier (1998). "Characterizing the effects of driver variability on real-world vehicle emissions." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **3**(2): 117-128.
- Hu, J., Y. Wu, Z. Wang, Z. Li, Y. Zhou, H. Wang, X. Bao and J. Hao (2012). "Real-world fuel efficiency and exhaust emissions of light-duty diesel vehicles and their correlation with road conditions." *Journal of Environmental Sciences* **24**(5): 865-874.
- Huang, C., D. Lou, Z. Hu, Q. Feng, Y. Chen, C. Chen, P. Tan and D. Yao (2013). "A PEMS study of the emissions of gaseous pollutants and ultrafine particles from gasoline- and diesel-fueled vehicles." *Atmospheric Environment* **77**(0): 703-710.
- Huo, H., Z. Yao, Y. Zhang, X. Shen, Q. Zhang, Y. Ding and K. He (2012). "On-board measurements of emissions from light-duty gasoline vehicles in three mega-cities of China." *Atmospheric Environment* **49**: 371-377.
- ICTT (2013). "World-harmonized light-duty vehicles test procedure (WLTP)." ICCT Policy update, 14 November 2013, http://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_PolicyUpdate_WLTP_Nov2013.pdf and http://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9dure_d%27essai_mondiale_harmonis%C3%A9e_pour_les_voitures_particul%C3%A8res_et_v%C3%A9hicules_utilitaires_1%C3%A9gers.
- IEA (2012 a). "International Energy Agency – Statistics- World Balances for 2012." <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=WORLD&product=Balances&year=2012>.

- IEA (2012 b). "World Energy Outlook 2012."
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/French.pdf>.
- IHEST (2012). "Concentration des gaz à effet de serre de l'année 0 à l'année 2005."
http://www.ihest.fr/la-mediatheque/dossiers-123/l-energie-situation-et/energie-et-changement-climatique?id_mot=.
- IPCC (2014). "The IPCC's Fifth Assessment Report (AR5)."
http://www.ipcc.ch/pdf/press/ipcc_leaflets_2010/ipcc_ar5_leaflet.pdf.
- Joumard, R., J. M. André, M. Rapone, M. Zallinger, N. Kljun, Z. Samaras, S. Roujol, J. Laurikko and M. Weilenmann (2007). "Emission factor modelling and database for light vehicles." EU project ARTEMIS deliverable 3, INRETS report LTE 0523, Bron, France 237 pp , https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/916945/filename/Artemis_deliverable_916943_LTE910523_adobe916947.pdf.
- Joumard, R., M. André, R. Vidon, P. Tassel and C. Pruvost (2000). "Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars." *Atmospheric Environment* **34**(27): 4621-4628.
- Jung, S., M. Lee, J. Kim, Y. Lyu and J. Park (2011). "Speed-dependent emission of air pollutants from gasoline-powered passenger cars." *Environmental Technology* **32**(11): 1173-1181.
- Karamangil, M. (2007). "Development of the auto gas and LPG-powered vehicle sector in Turkey: A statistical case study of the sector for Bursa." *Energy Policy* **35**(1): 640-649.
- Kerbachi, R., N. Oucher, A. Bitouche, N. Berkouki, B. Demri, M. Boughedaoui and R. Joumard (2009). "Pollution par les particules fines dans l'agglomération d'Alger." Ghardaïa, Algeria 16-18 February 2009: 31 ,
http://www.researchgate.net/profile/Jorge_Rogat/publication/237544682_Promoting_Sustainable_Transport_in_Latin_America_through_Mass_Transit_Technologies/links/237544680c239605344eb237544686f5680600000.pdf#page=56806000037.
- Kim, J., K. Choi, C.-L. Myung, Y. Lee and S. Park (2013). "Comparative investigation of regulated emissions and nano-particle characteristics of light duty vehicles using various fuels for the FTP-75 and the NEDC mode." *Fuel* **106**(0): 335-343.
- Klingenberg, H. (1996). "Automobile Exhaust Emission Testing." Springer Verlag Editor, Berlin, 1996.
- Ko, Y.-W. and C.-H. Cho (2006). "Characterization of large fleets of vehicle exhaust emissions in middle Taiwan by remote sensing." *Science of The Total Environment* **354**(1): 75-82.
- Kousoulidou, M., G. Fontaras, L. Ntziachristos, P. Bonnel, Z. Samaras and P. Dilara (2013). "Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors." *Atmospheric Environment* **64**(0): 329-338.
- Labalette, J. and A. Trouvilliez (2008). "Le CO₂ d'origine anthropique et volcanique."
<http://lgge.osug.fr/IMG/fparrenin/courses/2008-2009/paleoclimats/Labalette-Trouvilliez.pdf>.
- Lai, C. H., C. C. Chang, C. H. Wang, M. Shao, Y. Zhang and J. L. Wang (2009). "Emissions of liquefied petroleum gas (LPG) from motor vehicles." *Atmospheric Environment* **43**(7): 1456-1463.
- Laid, Y., M. Atek, R. Oudjehane, L. Filleul, L. Baough, N. Zidouni, M. Boughedaoui and J. Tessier (2006). "Impact sanitaire de la pollution de l'air par les PM10 dans une ville du sud: le cas d'Alger." *Int J Tuberc Lung Dis* **10**(12): 1406-1411.

- Lamara, Y. (2010). "Le GPLc, vers un nouveau départ." Salon international des énergies renouvelables, des énergies propres et du développement durable « era 2010 », Tamanrasset, du 19 au 21 octobre 2010.
- Lau, J., W. T. Hung and C. S. Cheung (2011). "On-board gaseous emissions of LPG taxis and estimation of taxi fleet emissions." *Science of The Total Environment* **409**(24): 5292-5300.
- Le Guern, F. (1982). "Les débits de CO₂ et de SO₂ volcaniques dans l'atmosphère." *Bulletin of Volcanology* **45**(3): 197-202.
- Lelieveld, J., C. Barlas, D. Giannadaki and A. Pozzer (2013). "Model calculated global, regional and megacity premature mortality due to air pollution." *Atmos. Chem. Phys* **13**: 7023-7037.
- Lenaers, G. (1994). "A dedicated system for on-the-road exhaust emission measurements on vehicles." 3rd Intern. Symposium "Transport and Air Pollution", Avignon, France, 6-10 June-1994.
- Lenaers, G. (1996). "On-board real life emission measurements on a 3 way catalyst gasoline car in motor way-, rural-and city traffic and on two Euro-1 diesel city buses." *Science of the Total Environment* **189**: 139-147.
- Lenaers, G. and I. D. Vlieger (1997). "The on-board emission measurements on petrol-driving car and diesel city buses." *International Journal of Vehicle Design* **18**(3/4 (special issue)): 368-378.
- Li, G., L. Li, Z. Liu, Z. Li and D. Qiu (2007). "Real time NO emissions measurement during cold start in LPG SI engine." *Energy Conversion and Management* **48**(9): 2508-2516.
- Li, X. Q., L. K. Yang, M. Pang and X. J. Liang (2010). "Effect of LPG Injection Methods on Engine Performance." *Advanced Materials Research* **97**: 2279-2282.
- Lim, M., G. Ayoko, L. Morawska, Z. Ristovski, E. Jayaratne and S. Kokot (2006). "A comparative study of the elemental composition of the exhaust emissions of cars powered by liquefied petroleum gas and unleaded petrol." *Atmospheric Environment* **40**(17): 3111-3122.
- Lüthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer and K. Kawamura (2008). "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present." *Nature* **453**(7193): 379-382.
- Maatoug, M., M. Ait Hammou and M. Sarmoum (2011). "Intérêt de Biosurveillance végétale de la pollution atmosphérique pour les pays en émergence. Exemple de l'Algérie." *Pollution Atmospherique* **3**: 71.
- Masi, M. (2012). "Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fuelled with LPG (liquefied petroleum gas)." *Energy* **41**(1): 252-260.
- Medener (2014). Rapport Medener : "Tendances de l'efficacité énergétique dans les pays du bassin Méditerranéen" Avril 2014, http://www.presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2014/04/F_Tendances-de-l%E2%80%99efficacit%C3%A9-%C3%A9nerg%C3%A9tique-Med-_FR.pdf.
- MEM (2015). "Statistiques - Bilan Énergétique National 2013." <http://www.mem-algeria.org/francais/index.php?page=bilan-des-realizations-2>.
- NASA (2009). "NASA Researchers Explore Lightning's NOx-ious Impact on Pollution, Climate." http://www.nasa.gov/topics/earth/features/nox_lightning.html.
- Ntziachristos, L. and Z. Samaras (2000). "Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and influencing parameters." *Atmospheric Environment* **34**(27): 4611-4619.

- OCDE (2010). "Perspectives des transports 2010." Editions OCDE 2010, <http://www.internationaltransportforum.org/pub/pdf/10OutlookF.pdf>.
- OCDE (2013). Rapport annuel sur les Principes directeurs de l'OCDE à l'intention des entreprises multinationales 2012 : "Médiation et recherche de consensus" – Editions OCDE - 31 Janvier 2013.
- OICA (2012). "Motorization rate 2012 – Worldwide." <http://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>.
- Oprešnik, S. R., T. Seljak, F. Bizjan and T. Katrašnik (2012). "Exhaust emissions and fuel consumption of a triple-fuel spark-ignition engine powered passenger car." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **17**(3): 221-227.
- Orselli, J. (1992). "Energies nouvelles pour l'automobile." Ed. Paradigme, 1992, Caen, France, 164 p.
- Panapress (2003). <http://www.panapress.com/Bouteflika-preoccupe-par-les-accidents-de-la-route-en-Algerie--13-717083-18-lang1-index.html>.
- Pelkmans, L. and P. Debal (2006). "Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **11**(4): 233-241.
- Pierson, W. R., A. W. Gertler, N. F. Robinson, J. C. Sagebiel, B. Zielinska, G. A. Bishop, D. H. Stedman, R. B. Zweidinger and W. D. Ray (1996). "Real-world automotive emissions— Summary of studies in the Fort McHenry and Tuscarora mountain tunnels." *Atmospheric Environment* **30**(12): 2233-2256.
- Plassat, G. (2005). "TOME 1 Les technologies des moteurs de véhicules lourds et leurs carburants." Collection: Données et références, © ADEME Editions, Paris janvier.
- Potter, C. J. (1987). "The on-the-road measurement of emissions from gasoline and diesel engined vehicles." *Pollution Atmosphérique* **29**(special issue): 57-69.
- Pujadas, M., L. Núñez, J. Plaza, J. C. Bezares and J. M. Fernández (2004). "Comparison between experimental and calculated vehicle idle emission factors for Madrid fleet." *Science of The Total Environment* **334-335**: 133-140.
- Rakha, H. and Y. Ding (2003). "Impact of stops on vehicle fuel consumption and emissions." *Journal of Transportation Engineering* **129**(1): 23-32.
- Ristovski, Z. D., E. R. Jayaratne, L. Morawska, G. A. Ayoko and M. Lim (2005). "Particle and carbon dioxide emissions from passenger vehicles operating on unleaded petrol and LPG fuel." *Science of the Total Environment* **345**(1-3): 93-98.
- Rubino, L., P. Bonnel, R. Hummel, A. Krasenbrink and U. Manfredi (2007). "Mobile measurement of pollutant emissions and fuel consumption of road vehicles in real-world driving situations using portable emission measurement systems (PEMS)." Final report - Joint Research Centre. Ispra, Italy, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.204.5226&rep=rep1&type=pdf>.
- Samaras, Z., T. Zachariadis, R. Joumard, D. Hassel, F.-J. Weber and R. Rijkeboer (2001). "An Outline of the 1994-1998 European Inspection and Maintenance Study: Part I—Design, Tests, and Results of Experimental Methods." *Journal of the Air & Waste Management Association* **51**(6): 913-938.
- Schürmann, D. and J. Staab (1990). On-the-road measurements of automotive emissions. *Science of the Total Environment*. **93**: 147-157.
- Selles, L. (2005). "Emissions des véhicules dans l'Union Européenne et dans le monde." http://www.senat.fr/opecest/auditions_voiture/commission_europeenne-l_selles.ppt.

- Snelgrove, D. G. (1996). An investigation into the influence of LPG (Autogas) composition on the exhaust emission and fuel consumption of 3 bi-fueled Renault vehicles. SAE technical Paper. **961170**.
- Staab, J. and D. Schurmann (1987). "Measurement of automobile exhaust emissions under realistic road conditions." SAE Technical Paper **871986**.
- UN-ECE (2014). "Proposal for a new global technical regulation on the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)." World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations 162nd session Geneva, 11-14 March 2014, <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29/ECE-TRANS-WP29-2014-027e.pdf>.
- Van Ruymbeke, C., J. P. Guitton, R. Vidon and C. Pruvost (1993). "Test d'une méthode alternative de mesures des émissions de polluants des voitures particulières Testing of an alternative method of pollutant emission measurement for passenger cars." *The Science of The Total Environment* **134**(1-3): 197-209.
- Watson, H. C. and P. X. Phuong (2007). Why liquid phase LPG port injection has superior power and efficiency to gas phase port injection, SAE Technical Paper 2007-01-3552.
- Weilenmann, M., J. Y. Favez and R. Alvarez (2009). "Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories." *Atmospheric Environment* **43**(15): 2419-2429.
- Weiss, M., P. Bonnel, R. Hummel, U. Manfredi and R. Colombo (2011). "Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS)." JRC Scientific and Technical Reports, Joint Research Centre, Ispra, Italy, http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/docs/2011_pems_jrc_62639_en.pdf.
- Weiss, M., P. Bonnel, R. Hummel, A. Provenza and U. Manfredi (2011). "On-Road Emissions of Light-Duty Vehicles in Europe." *Environmental Science & Technology* **45**(19): 8575-8581.
- Weiss, M., P. Bonnel, J. Kühlwein, A. Provenza, U. Lambrecht, S. Alessandrini, M. Carriero, R. Colombo, F. Forni, G. Lanappe, P. Le Lijour, U. Manfredi, F. Montigny and M. Sculati (2012). "Will Euro 6 reduce the NOx emissions of new diesel cars? - Insights from on-road tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS)." *Atmospheric Environment* **62**: 657-665.
- WHO (2014). "7 millions de décès prématurés sont liés à la pollution de l'air chaque année." <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/fr/>.
- WHO (2015). "Pollution de l'air." http://www.who.int/topics/air_pollution/fr/.
- WLPGA (2012). "Autogas Incentive Policies", World Liquid Petroleum Gas Association, Revised & updated 2012: 117p.
- WMO (2008). "Guide to meteorological instruments and methods of observation." http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf.
- WMO (2014). "2014 en passe de devenir l'une des années les plus chaudes, voire la plus chaude, jamais enregistrée." https://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_1009_fr.html.
- Yang, H.-H., S.-M. Chien, M.-T. Cheng and C.-Y. Peng (2007). "Comparative Study of Regulated and Unregulated Air Pollutant Emissions before and after Conversion of Automobiles from Gasoline Power to Liquefied Petroleum Gas/Gasoline Dual-Fuel Retrofits." *Environmental Science & Technology* **41**(24): 8471-8476.

Annexes

Annexe 1 : Fiche de mesure sur route

Fiche mesures sur route du / /

Propriétaire Véhicule	Matricule	Marque	Modèle	Carburant	Kilométrage
					km

Paramètres	AUTOROUTIER			SUB-URBAIN			URBAIN 1			URBAIN 2		
	Circuit 1	Circuit 2	Circuit 3	Circuit 1	Circuit 2	Circuit 3	Circuit 1	Circuit 2	Circuit 3	Circuit 1	Circuit 2	Circuit 3
Vol. initial volucompteur (m3)												
Débit échantillon (l/mn)												
Début essai à												
Début kilométrage												
Marche GPS												
Fin essai à												
Arrêt GPS												
Fin kilométrage												
Durée essai chrono (s)												
Vol. final volucompteur (m3)												
Distance trajet (km)												
Vitesse moy (km/h)												
Température ambiante (°C)												
Humidité (%)												
Polluants	Air dilution											
HCm (ppm)												
HCT (ppm)												
CO (ppm)												
CO2 (%)												
NO (ppm)												
NOx (ppm)												

Annexe 2 : Fiche de mesures en mode ralenti

Fiche mesures ralenti d'un véhicule à bicarburant essence /GPL

Propriétaire Véhicule	Matricule	Marque	Modèle	Carburant	Kilométrage
					km

Paramètres			Ralenti Chaud 1		Ralenti Chaud 2	
			GPL	Essence	GPL	Essence
Date						
heure						
Vol. initial volucompteur (m ³)						
Débit échantillon (l/mn)						
Durée essai chrono (min)						
Vol. final volucompteur (m ³)						
Température ambiante (°C)						
Humidité (%)						
Polluants	Air dilution 1	Air dilution 2				
HCm (ppm)						
HCt (ppm)						
CO (ppm)						
CO2 (%)						
NO (ppm)						
NOx (ppm)						
Observations sur le test de ralenti						

Annexe 3 : Fiche de mesures d'émissions sur route à vitesses stabilisées

Fiche mesures émissions sur route à vitesse stabilisées d'un véhicule à bicarburant essence/GPL

Propriétaire Véhicule	Matricule	Marque	Modèle	Carburant	Kilométrage
					km

Paramètres	V= 30km/h 3 ^{ème} rapport		V=40km/h 3 ^{ème} rapport		V=50km/h 4 ^{ème} rapport		V=60km/h 4 ^{ème} rapport		V= 70km/h 5 ^{ème} rapport		V=80km/h 5 ^{ème} rapport		V=100km/h 5 ^{ème} rapport	
	GPL	Essence	GPL	Essence	GPL	Essence	GPL	Essence	GPL	Essence	GPL	Essence	GPL	Essence
Vol. Initial volucompteur (m3/h)														
Débit échantillon (l/mn)														
Début essai à														
Début kilométrage														
Marque GPS														
Fin essai à														
Arrêt GPS														
Fin kilométrage														
Distance trajet (km)														
Durée essai chrono (s)														
Vol. final volucompteur (m3)														
Volume (m ³)														
Débit volucompteur (m ³ /h)														
Volume total gaz dilué (m ³)														
Vitesse moy (km/h)														
Vitesse moy GPS (km/h)														
Température ambiante (°C)														
Humidité (%)														
Polluants	Air dilution													
HCM (ppm)														
HCl (ppm)														
CO (ppm)														
CO2 (%)														
NO (ppm)														
NOx (ppm)														

Annexe 4 : Les Trames NMEA

A.4.1. Présentation

Le standard NMEA (National Marine & Electronics Association) est défini ici comme étant le protocole de transmission des données entre les instruments et équipements électroniques liés au GPS.

Les données sont transmises sous forme de trames. Chaque trame commence par le caractère \$, suivi par les lettres GP pour Global Positioning System, puis un groupe de 3 lettres pour l'identifiant de la trame.

Les deux trames identifiées par notre GPS sont :

- **GGA** : pour GPS Fix et Date.
- **RMC**: pour données minimales exploitables spécifiques.

Chaque trame est composée d'un certain nombre de champs séparés par une "virgule". Le rôle de la virgule est d'être le séparateur de champs, qui permet la dé-concaténation des données dans le programme de traitement des données par le tableur Excell.

A.4.2. Identification des trames

A.4.2.1. La trame : GGA

\$GPGGA,123519,4807.038,N,01131.324,E,1,08,0.9,545.4,M,46.9,M, , *42

Signification des champs :

- 123519** = Acquisition du FIX à 12:35:19 UTC
- 4807.038,N** = Latitude 48 deg 07.038' N
- 01131.324,E** = Longitude 11 deg 31.324' E
- 1** = Fix qualification : (0 = non valide, 1 = Fix GPS, 2 = Fix DGPS)
- 08** = Nombre de satellites en poursuite.
- 0.9** = DOP (Horizontal dilution of position) Dilution horizontale.
- 545.4,M** = Altitude, en Mètres, au-dessus du MSL (mean see level) niveau moyen des Océans.
- 46.9,M** = Correction de la hauteur de la géoïde en Mètres par rapport à l'ellipsoïde
- (Champ vide)** = nombre de secondes écoulées depuis la dernière mise à jour DGPS.
- (Champ vide)** = Identification de la station DGPS.
- *42** = Checksum

A.4.2.2. La trame : RMC

\$GPRMC,225446,A,4916.45,N,12311.12,W,000.5,054.7,191194,020.3,E*68

Signification des champs :

- 225446** = Heure du Fix 22:54:46 UTC
- A** = Alerte du logiciel de navigation (A = OK, V = warning (alerte)
- 4916.45,N** = Latitude 49 deg. 16.45 min North
- 12311.12,W** = Longitude 123 deg. 11.12 min West
- 000.5** = vitesse sol, Noeuds
- 054.7** = cap (vrai)
- 191194** = Date du fix 19 Novembre 1994
- 020.3,E** = Déclinaison Magnétique 20.3 deg Est
- *68** = checksum obligatoire

Annexe 5: Base LVEM d'ARTEMIS
(Joumard, André et al. 2007)

Tableau A5.1 : Number of vehicles and tests measured by each laboratory in the Artemis LVEM database. The tests are summed at the level of cycles.

Laboratory	Country	Number of Vehicles	Number of Tests
ADAC	Germany	39	117
CNR-IM	Italy	13	457
EMPA	Switzerland	203	3838
Ford	Germany	1	14
IFP	France	4	98
INRETS	France	180	2294
KTI	Hungary	5	237
LAT	Greece	73	1026
MTC	Sweden	9	439
RW TUEV	Germany	293	1867
Shell	United Kingdom	4	643
TNO-Automotive	The Netherlands	1629	4508
TRL	United Kingdom	127	998
TUEV Rheinland	Germany	217	1417
TUG	Austria	21	290
VTT	Finland	29	581
Total (all laboratories)		2847	18824

Tableau A5.2: Number of vehicles per emission standard and per fuel type in the Artemis LVEM database.

emis. standard	petrol	LPG	CNG	diesel	biodiesel	Total
pre-Euro 1	901			231		1132
Euro 1	1227	7		68		1302
Euro 2	169	3		64		236
Euro 3	100	2	1	54	2	159
Euro 4	15		1	2		18
total	2412	12	2	419	2	2847

Annexe 6 : Equations de la fonction d'émission (Joumard, André et al. 2007)

Equation généralisée de la fonction d'émission y_i du polluant i en fonction de la vitesse x :

$$y_i = \frac{a + c.x + e.x^2}{1 + b.x + d.x^2} + \frac{f}{x}$$

Tableau A.6.1 : Valeurs des paramètres de la fonction d'émission par polluant et type de carburant:

Fuel	Pol.	Em. Std.	Equation	a	b	c	d	e
Petrol	CO	Euro 1	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	11.15320657	0.128685358	-0.101503184	-0.000946631	0.000676883
		Euro 2	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	60.5256484	3.499185561	0.152041368	-0.025212142	-0.000168436
		Euro 3	$(a+cx)/(1+bx+dx^2)$	71.70537699	35.40666116	11.44056269	-0.248305435	
	HC	Euro 1	$(a+cx)/(1+bx+dx^2)$	1.349382393	0.177893263	-0.006773162	-0.001272345	
		Euro 2	$(a+cx)/(1+bx+dx^2)$	4108199.712	1659966.156	-14511.33287	-10274.30718	
		Euro 3	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	0.055738489	0.036523691	-0.001102637	-0.000187725	1.25168E-05
	NOx	Euro 1	$a+cx+ex^2$	0.524738843		-0.010032005		9.3607E-05
		Euro 2	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	0.283553945	-0.023390896	-0.008689173	0.000443086	0.000114496
		Euro 3	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	0.092949654	-0.012205513	-0.001490763	3.97074E-05	6.52593E-06

Fuel	Pol.	Em. Std.	Eng. cap.	Equation	a	b	c	d	e	f
diesel	CO	Euro 1	All	$a+cx+ex^2$	0.995787107		-0.018772272		0.000108897	
		Euro 2	All	$a+cx+ex^2$	0.899711748		-0.017417942		8.77264E-05	
		Euro 3	All	$a+cx+ex^2+f/x$	0.168637914		-0.002924642		1.24692E-05	1.095523771
	HC	Euro 1	<2.0	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	0.142282293	0.013776793	-0.002007015	-1.89805E-05	1.14818E-05	
			>2.0	$a+cx+ex^2$	0.159093324		-0.002460623		1.2138E-05	
		Euro 2	<2.0	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	0.161234564	0.074607063	-0.001206231	-0.000335154	3.6292E-06	
			>2.0	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	50057.71156	38026.82833	8033.150994	1150.215685	-26.61240156	
		Euro 3	<2.0	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	0.096521338	0.103000188	-0.000238314	-7.23554E-05	1.93331E-06	
			>2.0	$a+cx+ex^2$	0.09124181		-0.001682045		8.93739E-06	
	NOx	Euro 1	All	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	3.095607924	0.141192269	-0.006175676	-0.000503115	0.000421523	
		Euro 2	All	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	2.398097386	0.076699891	-0.011576236	-0.000499938	0.000119971	
		Euro 3	All	$(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2)$	2.816405992	0.198187904	0.066873591	-0.001431755	-0.000463021	

Annexe 7 : Caractéristiques cinématiques des typologies de circulation (Joumard, André et al. 2007)

Tableau A.7.1. Caractéristiques cinématiques des 15 typologies de circulation

Reference Test Pattern number and characteristics			Speed (km/h)			Stops		Accelerations		
			Average	Running speed	Max. Speed	duration (%)	Frequency / km	Average positive acc.	Acc. /km	Strong acc./km
7	Urban	Stop&go	7,1	11,1	41	35,4	16,3	0,70	10,6	1,7
3	Urban	Congested, stops	8,7	20,8	46	58,2	10,2	0,98	6,8	5,1
2	Urban	Congested, low speeds	11,7	14,4	40	18,6	16,7	0,83	16,7	4,8
1	Urban	Dense	16,9	23,7	55	28,7	5,2	0,82	8,0	2,2
4	Urban	Free-flowing	21,5	23,9	44	10,3	4,3	0,80	11,5	4,3
5	Urban	Free-flow, unsteady	31,6	34,6	58	8,5	2,3	0,84	5,2	1,7
6	Rural	Low speed	43,1	44,3	69	2,7	0,5	0,62	3,6	0,5
11	Rural	Unsteady	58,0	60,0	101	3,4	0,3	0,71	3,1	0,5
9	Rural	Steady	65,9	65,9	84	0,0	0,0	0,69	0,6	0,0
10	Rural	Main roads, unsteady	78,5	78,5	112	0,0	0,0	0,58	1,3	0,0
8	Rural	Main roads	87,6	87,6	104	0,0	0,0	0,38	0,5	0,0
14	Motorway	Unsteady	103,5	103,5	128	0,0	0,0	0,63	1,8	0,2
15	Motorway	Stable	115,3	115,3	146	0,1	0,02	0,13	0,06	0,0
13	Motorway		118,8	118,8	132	0,0	0,0	0,53	0,4	0,02
12	Motorway	High speed	124,6	124,6	150	0,0	0,0	0,48	0,5	0,02

La fonction d'émission (FE) généralisée du modèle 2, pour un polluant est une équation polynomiale (d'ordre 3 à 5) de type :

$$FE \text{ (g/km)} = a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + a_4V^4 + a_5V^5$$

où V est la vitesse moyenne en km/h.

Cette fonction sera utilisée pour le calcul des facteurs d'émission du CO₂ et des autres polluants (CO, HCT et NO_x) pour les véhicules de la norme Euro (ou pré-Euro).

Tableau A.7.2. : Paramètres pour le calcul des émissions unitaires.

poll.	fuel	eng. size	emis. st.	shape	order	a ₀	a ₁ (x 100)	a ₂ (x 10 ⁴)	a ₃ (x 10 ⁶)	a ₄ (x 10 ⁸)	a ₅ (x 10 ¹⁰)
CO ₂	petrol	1.4-2 l	pre Euro	Polyn.	5	651.7	-3857.4	11781.8	-17414.1	12247.4	-3265.0
			Euro 1	Polyn.	5	670.9	-3566.4	9913.8	-13327.0	8578.9	-2105.0
			Euro 2	Polyn.	5	709.2	-3739.9	9864.6	-12420.5	7413.7	-1667.0
			Euro 3	Polyn.	4	561.3	-2131.9	4130.1	-3447.4	1060.1	
	diesel	<2 l	Euro 1	Polyn.	4	393.5	-1404.4	2833.6	-2476.7	808.3	
			Euro 2	Polyn.	4	433.5	-1642.2	3290.2	-2819.0	890.1	
			Euro 3	Polyn.	4	412.0	-1449.1	2818.8	-2388.6	750.2	
CO	petrol	all	pre Euro	Polyn.	4	58.406	-285.959	596.918	-536.230	176.000	
HC	petrol	all	pre Euro	Polyn.	4	5.57576	-19.06828	29.83329	-21.15120	5.66600	
NO _x	petrol	all	pre Euro	Polyn.	3	1.53321	-1.47482	0.82264	0.98000		

Annexe 7 (suite)

(Joumard, André et al. 2007)

Tableau A.7.3. : Emissions de polluants CO, HCT et NO_x (g/km) selon les 15 typologies de circulation des véhicules de la base Artemis de la norme Euro 0

Typologie de circulation	Vitesse Moyenne (km/h)	Essence - Euro 0		
		CO	HCT	NO _x
1 Urban dense	17	21.873	3.221	1.447
2 Congested urban, low speeds	12	26.857	3.327	1.217
3 Congested urban, stops	9	33.682	4.234	1.768
4 Free-flowing urban	22	19.936	2.456	1.051
5 Free-flow urban, unsteady	32	16.434	2.344	1.241
6 Rural	43	8.969	1.020	0.641
7 Stop and go	7	49.482	4.530	1.166
8 Main roads	88	3.326	0.377	1.019
9 Rural steady	66	6.678	0.769	1.010
10 Main roads, unsteady	79	11.199	1.189	2.041
11 Rural unsteady	58	11.039	1.434	1.413
12 Motorway, high speed	125	14.800	0.795	3.073
13 Motorway	119	16.141	1.071	2.700
14 Motorway, unsteady	104	14.569	1.198	2.220
15 Motorway, stable	115	9.650	0.586	1.901
<i>Number of data</i>		<i>1123</i>	<i>1123</i>	<i>1122</i>