

Titre: Émissions atmosphériques attribuables au transport routier pour une entreprise de service canadienne
Title: [Émissions atmosphériques attribuables au transport routier pour une entreprise de service canadienne](#)

Auteur: Éric Bélanger
Author: [Eric Bélanger](#)

Date: 2004

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bélanger, É. (2004). Émissions atmosphériques attribuables au transport routier pour une entreprise de service canadienne [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7174/>
Citation: [Bélanger, É. \(2004\). Émissions atmosphériques attribuables au transport routier pour une entreprise de service canadienne \[Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal\]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7174/](#)

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7174/>
PolyPublie URL: [https://publications.polymtl.ca/7174/](#)

Directeurs de recherche: Louise Millette, Bruno Detuncq, & Patrick Niquette
Advisors: [Louise Millette](#), [Bruno Detuncq](#), [Patrick Niquette](#)

Programme: Non spécifié
Program: [Non spécifié](#)

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES
ATTRIBUABLES AU TRANSPORT ROUTIER
POUR UNE ENTREPRISE DE SERVICE CANADIENNE

ERIC BÉLANGER
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE
ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
AVRIL 2004



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 0-612-91933-1

Our file *Notre référence*

ISBN: 0-612-91933-1

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canadä

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES
ATTRIBUABLES AU TRANSPORT ROUTIER
POUR UNE ENTREPRISE DE SERVICE CANADIENNE

présenté par: BÉLANGER Eric

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. DESJARDINS Raymond, M.Ing., président

Mme MILLETTE Louise, Ph.D., membre et directrice de recherche

M. DETUNCQ Bruno, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. NIQUETTE Patrick, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. HAUSLER Robert, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice et mon codirecteur de recherche, madame Louise Millette et monsieur Bruno Detuncq pour leur soutien et leur disponibilité tout au long de ma maîtrise. Mes remerciements vont également à Patrick Niquette, mon codirecteur de la *STEPPE* pour ses encouragements et sa flexibilité dans l'encadrement de mon travail. Je tiens à remercier l'entreprise initiatrice de ce projet pour le financement et l'accès à un poste de travail, ainsi que les membres de son personnel pour leur apport dans la concrétisation de cette étude. Je tiens également à remercier messieurs Raymond Desjardins et Robert Hausler pour avoir accepté de juger ce mémoire.

Un grand merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenu et encouragé dans ce travail.

RÉSUMÉ

L'étude s'est penchée sur l'analyse d'une portion des émissions atmosphériques pour une entreprise canadienne oeuvrant dans le domaine tertiaire. Les émissions des véhicules routiers de l'entreprise ont été évaluées par le biais d'une modélisation informatique et de travaux d'échantillonnage en conditions réelles.

Dans un premier temps, une étude approfondie des informations détenues par l'entreprise a été faite afin de relier la pollution atmosphérique aux caractéristiques du parc de véhicules étudié. Comme la composition de ce parc diffère passablement du parc typique nord-américain, cette caractérisation a permis d'éclairer les écarts entre la consommation de carburant et les taux d'émission de polluants des véhicules de l'entreprise par rapport aux mêmes véhicules dans un parc typique. Le parc de véhicules a été défini selon ses caractéristiques techniques, en terme d'âge moyen des véhicules, de kilométrage parcouru annuellement, de type et de quantité de carburant consommé. Les consommations et émissions moyennes des véhicules de la compagnie se sont révélées systématiquement supérieures à celles des véhicules d'un parc typique.

On a utilisé une approche macroscopique basée sur le déplacement moyen des véhicules pour évaluer les émissions de polluants. Le logiciel EPA MOBILE6.2 a permis de modéliser les polluants suivants : monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NO_x), hydrocarbures imbrûlés (HC), particules (PM_{10}), dioxyde de soufre (SO_2), ammoniac (NH_3) ainsi que six composés toxiques. Bien que le logiciel MOBILE soit typiquement utilisé pour des bilans d'émission de polluants à l'échelle d'une région ou d'un pays, la modélisation a conduit à des résultats semblables à ceux mesurés en conditions routières par télédétection.

L'analyse des gaz à effet de serre (GES) a été faite grâce au bilan des carbones pour le CO_2 , et par l'utilisation de facteurs d'émission pour l'oxyde nitreux (N_2O), le méthane (CH_4) et les hydrocarbures fluorés (HFC). Ce bilan a permis de comparer le niveau actuel des émissions à celui de l'année de référence du protocole de Kyoto, soit 1990. L'analyse démontre que l'entreprise est en bonne voie de respecter les exigences du protocole en ce qui concerne son parc de

véhicules. Compte tenu que la composition de l'entreprise a évolué au fil des années, on a tenu compte de ces mouvements organisationnels dans l'analyse des émissions atmosphériques.

Des travaux d'échantillonnage en conditions réelles ont été réalisés afin d'obtenir une compréhension plus fine de certains scénarios d'utilisation des véhicules. Un système d'analyse des gaz brûlés portatif de marque Galio a été utilisé à bord de 14 véhicules pour mesurer les émissions sans toutefois conduire à des résultats concluants. Deux scénarios ont été évalués sur le terrain lors de ces campagnes d'échantillonnage. L'essai au ralenti visait à mesurer l'impact de la climatisation sur les émissions d'un véhicule et l'essai routier tentait d'évaluer l'impact de l'ajout d'échelles sur le toit d'une mini-fourgonnette. Bien que les taux d'émission mesurés durant les campagnes d'échantillonnage soient inutilisables, un accroissement de 20% de la consommation de carburant a été mesuré lorsque les échelles sont en place pour l'essai routier.

Les difficultés rencontrées dans l'utilisation du système de mesure des gaz brûlés Galio compromettent la fiabilité des données recueillies lors de ces campagnes d'échantillonnage. Les composantes du système semblent bien fonctionner lorsqu'elles sont étalonnées en laboratoire en régime permanent, mais en conditions réelles (régime transitoire), les taux de polluants mesurés ne se rapprochent en rien des valeurs prévues par la littérature.

Cette étude a permis d'identifier des opportunités de gestion pour l'entreprise et propose des stratégies afin de réduire ses émissions atmosphériques, notamment la mise en place d'un programme annuel de suivi des émissions de l'entreprise. Les stratégies proposées pour la réduction des polluants s'appuient sur le choix et le mode d'utilisation des véhicules, ainsi que sur l'amélioration de la gestion des statistiques maintenues par l'entreprise pour son parc de véhicules. Un fait saillant de cette étude est que l'entreprise tient déjà à jour suffisamment d'indicateurs sur l'utilisation de son parc de véhicules pour évaluer de manière satisfaisante ses émissions atmosphériques, sans devoir recourir aux mesures expérimentales à ce stade-ci.

ABSTRACT

The study focused on atmospheric emissions analysis for a Canadian service industry. Specifically, the motor vehicle emissions have been evaluated through modeling analysis and real-world emissions measurement.

A detailed study has been conducted using the company database, to relate the vehicles characteristics to their emissions. The company fleet composition contrasting from a typical north-american fleet, this characterization has allowed to explain discrepancies found between fuel consumption and emissions for both fleet. The company fleet has been described in terms of annual mileage, quantity and type of fuel consumed, and fleet turnover. The fuel consumption and pollutant emissions have been found to be systematically higher than the average typical fleet.

A travel based macroscopic approach was used to evaluate emissions. The following pollutants were modelled using EPA MOBILE6.2 software: carbon monoxide (CO), oxides of nitrogen (NO_x), unburned hydrocarbons (HC), particulates (PM_{10}), sulfur dioxide (SO_2), ammonia (NH_3) and six hazardous air pollutant. Even if MOBILE is typically used for the modeling of large fleets at the state or country level, the simulation has produced similar results as those found in roadside remote sensing measurements.

The greenhouse gas (GHG) analysis has been done based on a carbon balance for the CO_2 , and by using specific emission factors for nitrous oxide (N_2O), methane (CH_4) and fluorohydrocarbon (HFCs). The actual company fleet GHG emissions have been compared against the reference year for Kyoto protocol, 1990. The analysis shows that the company fleet is in on the right track to meet the protocol target. The 1990s company spin-off has been taken into account to measure comparable level of activity in our GHG assessment.

Emissions measurement in real-world setting has been conducted to refine our understanding of particular driving mode. A Galio portable gas analyzer has been used to measure pollutant of 14 vehicles for two operating mode, without leading

to satisfactory results. The idle test was designed to assess the impact of air conditioning on emissions, while the on-road testing intended to estimate the impact of carrying ladders on a mini-van roof on fuel consumption and emissions. Although the emissions measurements are unusable, a 20% fuel consumption increase has been measured with the ladders on.

The difficulties encountered in using the gas analyzer jeopardize the experimental portion of our work. The system components seem to work well under laboratory calibration (steady state), but in real-world setting (transient state) the emissions rates measured have nothing to do with literature.

This study has identified management opportunities for the company and suggests specific strategies to reduce air pollution, namely the establishment of an annual emission follow-up program. The other strategies focus on car selection and operating mode of the vehicles, as well as enhancing the fleet data management. A key finding of this study is that the company already maintain enough fleet indicators to meet its emissions modelling needs without engaging in on-road emission measurements at this stage.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiv
LISTE DES UNITÉS	xvi
LISTE DES SYMBOLES CHIMIQUES	xvii
LISTE DES ANNEXES	xviii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE ET CADRE DE RÉFÉRENCE	3
1.1 Automobile et pollution atmosphérique	3
1.1.1 Dioxyde de carbone (CO ₂)	4
1.1.2 Monoxyde de carbone (CO)	5
1.1.3 Composés azotés	5
1.1.4 Composés organiques (volatils ou imbrûlés)	6
1.1.5 Les particules	7
1.1.6 L'ozone et la formation du smog	7
1.1.7 Autres polluants	7
1.2 Technologies de contrôle des émissions	9
1.2.1 Réduction des émissions à la source	10
1.2.2 Épuration post-combustion	11
1.2.3 Techniques antipollution pour les moteurs diesel	12
1.2.4 Durabilité du système de contrôle des émissions	13
1.3 Mesure des gaz brûlés	14
1.3.1 Instrumentation pour la mesure des gaz brûlés en laboratoire	14
1.3.2 Procédure d'essai sur dynamomètre (EPA)	15
1.4 Cadre Légal	16
1.4.1 Législation de la Ville de Montréal	17
1.4.2 Législation des provinces canadiennes	17

1.4.3	Législation fédérale	19
1.4.4	Législation des États-Unis	22
1.4.5	Législation californienne.....	25
1.4.6	Législation pour la communauté européenne	26
1.4.7	Protocole de Kyoto et implications	27
CHAPITRE 2 : QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS	29	
2.1	Étendue de l'étude	29
2.2	Cadre de référence	30
2.3	Collecte et analyse des banques de données disponibles	33
2.4	Caractéristiques des véhicules à l'étude	36
2.4.1	Distribution des véhicules selon le PNV	36
2.4.2	Distribution des véhicules selon la cylindrée	38
2.4.3	Émissions des génératrices embarquées à bord des véhicules	39
2.4.4	Distribution des véhicules selon l'âge.....	41
2.4.5	Kilométrage annuel et consommation de carburant	43
2.5	Évaluation des taux d'émission à l'aide du logiciel MOBILE.....	46
2.5.1	Polluants communément mesurés (CO, NO _x , HC)	47
2.5.2	Autres polluants atmosphériques : les particules, le SO ₂ et le NH ₃ .	50
2.5.3	Les composés toxiques	52
2.6	Comparaison avec la littérature.....	53
2.6.1	Programme AirCare	54
2.6.2	Mesures par télédétection, région de Denver.....	57
2.7	Évaluation des émissions de CO ₂ par le bilan du carbone	59
2.7.1	GES provenant de la combustion autres que le CO ₂	63
2.7.2	Impact énergétique et environnemental de la climatisation automobile.....	64
2.7.3	GES du secteur amont (industrie automobile et pétrolière)	67
2.8	Inventaire canadien des émissions atmosphériques	68
2.8.1	Gaz à effet de serre attribuables au transport	68
2.8.2	Principaux contaminants atmosphériques reliés au transport	70
2.9	Évolution des caractéristiques du parc automobile nord-américain.....	71
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE ET EXPÉRIMENTATION.....	77	
3.1	Méthodologie et équipements utilisés.....	77

3.1.1	Mesure des émissions à l'aide d'équipements embarqués	77
3.1.2	Description de l'équipement utilisé	81
3.2	Étalonnage et mise au point	82
3.2.1	Étalonnage statique de la sonde de pression du débitmètre	82
3.2.2	Étalonnage dynamique du débitmètre.....	84
3.2.3	Étalonnage du débitmètre par le fabricant	87
3.2.4	Réparations et correctifs	88
3.2.5	Étalonnage des analyseurs de gaz brûlés.....	88
3.3	Plan d'échantillonnage	90
3.3.1	Véhicules ciblés	91
3.3.2	Plan expérimental	92
3.4	Expérimentation.....	92
3.4.1	Tests au ralenti - impact de la climatisation sur les émissions	94
3.4.2	Tests sur route - modification à l'aérodynamisme du véhicule	97
CHAPITRE 4 : DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS	102
4.1	Discussion des résultats	103
4.2	Recommandations	105
CHAPITRE 5 : CONCLUSION	112
RÉFÉRENCES	113
ANNEXES	125

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Synthèse des normes d'émissions (véhicules légers)	23
Tableau 2.1 : Répartition des véhicules par classes d'émissions.....	37
Tableau 2.2 : Répartition des cylindrées par classes d'émissions.....	38
Tableau 2.3 : Émissions des génératrices embarquées	41
Tableau 2.4 : Âge des véhicules	42
Tableau 2.5 : Consommation de carburant	44
Tableau 2.6 : Taux d'émission de CO, NO _x et HC	48
Tableau 2.7 : Taux d'émission de particules, de SO ₂ et de NH ₃	51
Tableau 2.8 : Taux d'émission de composés toxiques (mg/km)	52
Tableau 2.9 : Étude par télédétection (Denver) et modélisation (TIC45)	58
Tableau 2.10 : Production de CO ₂ par classes de véhicules, 1990-2002	61
Tableau 2.11 : Émissions de GES par gaz pour l'an 2002	66
Tableau 2.12 : GES et transport routier au Canada pour l'an 2001.....	69
Tableau 2.13 : Principaux polluants liés au transport au Canada pour l'an 1995	70
Tableau 3.1 : Lecture de la sonde de pression à écoulement nul	87
Tableau 3.2 : Étalonnage des analyseurs de gaz brûlés	90
Tableau 3.3 : Exemple de plan d'échantillonnage.....	92
Tableau 3.4 : Taux d'émission pour un essai routier avec le système Galio	93
Tableau 3.5 : Résultat des tests au ralenti (base massique).....	95
Tableau 3.6 : Résultat des tests au ralenti (base volumique).....	96
Tableau 3.7 : Taux d'émission de polluants (essai routier)	98
Tableau 3.8 : Résultat des tests sur route.....	100
Tableau 4.1 : Bilan des émissions atmosphériques de TIC 45	105

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Comparaison des taux d'émission pour les automobiles.....	55
Figure 2.2 : Comparaison des taux d'émission pour les camionnettes.....	56
Figure 2.3 : Caractéristiques des automobiles, période 1975-2003.....	72
Figure 2.4 : Caractéristiques des camionnettes, période 1975-2003.....	73
Figure 2.5 : Répartition des types de camionnettes, période 1975-2003	74
Figure 3.1 : Étalonnage statique de la sonde de pression.....	83
Figure 3.2 : Installation pour l'étalonnage du débitmètre.....	84
Figure 3.3 : Mesure du débit volumétrique d'air en laboratoire	86

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACEA :	Association des constructeurs européens d'automobiles
ADEME :	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'Énergie
AQLPA :	Association québécoise de lutte contre la pollution atmosphérique
CAFE :	Corporate average fuel efficiency
CARB :	California air resources board
CEMT :	Conférence européenne des ministres des transports
CFR :	Code of federal regulations
CTE :	Centre de technologie environnementale d'Environnement Canada
CVS :	<i>Constant volume sampler</i>
	Système d'échantillonnage à volume constant
DOE :	Department of energy (États-Unis)
EC :	Environnement Canada
EGR :	<i>Exhaust gas recirculation</i>
	Recirculation des gaz d'échappement
EPA :	Environmental protection agency
ESAA :	Environmental services association of Alberta
FID :	<i>Flame ionization detector</i>
	Détecteur à ionisation de flamme
FTP :	Federal test procedure
GES :	Gaz à effet de serre
GRI :	Global reporting initiative
HWFET :	Highway fuel economy test
IPCC :	Intergovernmental panel on climate change Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat [GIEC]
LCPE :	Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)
LEV :	<i>Low emission vehicle</i>
	Véhicule produisant peu d'émissions
MENV :	Ministère de l'Environnement du Québec
MEF :	Ministère de l'environnement et de la faune du Québec

NDIR :	<i>Non dispersive infrared analyzer</i> Analyseur non dispersif à absorption dans l'infrarouge
OBD :	<i>On-board diagnostic</i> Système de diagnostic embarqué
OCDE :	Organisation de coopération et de développement économiques
PCV :	<i>Positive crankcase ventilation</i> Recyclage des gaz du carter
PNBV :	Poids nominal brut de véhicule
PNUE :	Programme des nations unies pour l'environnement
SAE :	Society of automotive engineers
SFTP :	Supplemental federal test procedure
STEPPE :	Station expérimentale des procédés pilotes en environnement
TPCC :	Taux pondérés de consommation de carburant
UDDS :	Urban dynamometer driving schedule
UNFCCC :	United Nations framework convention on climate change Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques [CCNUCC]
VUS :	Véhicule utilitaire sport
ZEV :	<i>Zero emission vehicle</i> Véhicule zéro-émission

LISTE DES UNITÉS

kg :	kilogramme
°C :	degré Celsius
µm :	micromètre
ppm :	partie par million
mg/kg :	milligramme par kilogramme
mm de Hg :	millimètre de mercure
kPa :	kilopascal
g/km :	gramme par kilomètre
g/mi :	gramme par mille
L/100km :	litre par 100 kilomètres
CFM :	pieds cubes par minute
ACFM :	pieds cubes réels par minute
kt. éq. CO ₂ :	kilotonne d'équivalent CO ₂
t/an :	tonne par an

LISTE DES SYMBOLES CHIMIQUES

- CFC : chlorofluorocarbone
CH₄ : méthane
CO : monoxyde de carbone
CO₂ : dioxyde de carbone
COV : composés organiques volatils
HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques
HC : hydrocarbures (imbrûlés)
HFC : hydrocarbure fluoré
MTBE : éther méthyltertiobutylique
NH₃ : ammoniac
NO : monoxyde d'azote
NO₂ : dioxyde d'azote
N₂O : oxyde nitreux
NO_x : oxides d'azote
O₃ : ozone
PM : *particulate matter*
particules
PM₁₀ : particule d'un diamètre inférieur à 10 µm
SO₂ : dioxyde de soufre

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : Mesure des gaz brûlés en laboratoire.....	125
ANNEXE B : Remarques générales concernant l'utilisation de MOBILE.....	131
ANNEXE C : Paramètres de modélisation du parc de TIC45	134
ANNEXE D : Calcul de rendement volumétrique.....	138
ANNEXE E : Liste des équipements et schéma de l'étalonnage.....	143
ANNEXE F : Fiche technique du système Galio.....	146

INTRODUCTION

La prise de conscience tardive, mais néanmoins essentielle de l'impact des activités humaines sur les écosystèmes et de manière plus générale, sur l'environnement, est à la base d'un éventail de mesures législatives et corporatives visant à encadrer le développement des communautés. Le réchauffement climatique, largement reconnu par la communauté scientifique internationale (*Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] 2001*), et la dégradation continue de la qualité de l'air au niveau du sol constituent des symptômes d'essoufflement du mode de vie préconisé par les populations dites développées.

Corollaire de cette prise de conscience, l'environnement devient de plus en plus un facteur d'évaluation pour les clients, investisseurs et partenaires du monde corporatif. Particulièrement sensibles à leur image, les entreprises s'engagent progressivement dans une refonte de leur manière de faire visant à considérer l'environnement non plus comme simple milieu dans lequel s'élabore une activité économique, mais plutôt comme composante en rétroaction avec leurs procédés.

Dans ce contexte, une entreprise de service canadienne de grande envergure a souhaité mieux connaître sa contribution aux gaz à effet de serre [GES] et à la pollution de l'air. Ce mémoire fait état des connaissances acquises sur la situation actuelle et l'évolution de cette entreprise, explique les approches retenues pour quantifier ses émissions atmosphériques, propose des recommandations à l'intention des gestionnaires, en plus de situer cette analyse dans les cadres juridique, institutionnel et international applicables.

Les émissions atmosphériques de l'entreprise sont d'origines diverses : huile à chauffage, transports, utilisation de solvants, systèmes de climatisation, production d'électricité en zone non-reliée (physiquement séparée du réseau de distribution d'électricité), etc. Le présent travail s'intéresse aux émissions résultant de l'utilisation des véhicules routiers, qu'on estime à 35% des émissions annuelles de GES de l'entreprise (Ouedraogo G. 2003).

Plus spécifiquement, le but de cette étude consiste à :

- évaluer la production de GES par le traitement des données disponibles;
- estimer la production de polluants par l'utilisation d'équipements de mesure des gaz brûlés et par modélisation informatique;
- formuler pour l'entreprise des stratégies de réduction pour le CO₂ et les autres polluants.

Le bilan de GES couvre les années 1990, 2001 et 2002. La mesure des polluants en situation réelle se limite à quatre composés (CO, HC, NO_x et CO₂) pour une fraction du parc de véhicules et la modélisation informatique est appliquée à l'année 2002 pour une gamme étendue de polluants. D'autres aspects importants des émissions atmosphériques sont abordés sommairement de manière non exhaustive, compte tenu qu'ils dépassent le cadre du présent document.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE ET CADRE DE RÉFÉRENCE

Ce premier chapitre dresse un portrait des aspects techniques de la pollution automobile. Un inventaire des principaux polluants atmosphériques liés à l'utilisation des véhicules est présenté en début de chapitre. La seconde section analyse la formation des polluants et explore quelques techniques de contrôle des émissions au niveau du véhicule. La méthodologie pour la mesure des gaz brûlés est ensuite présentée et le chapitre se termine sur la législation encadrant les émissions des véhicules routiers.

1.1 Automobile et pollution atmosphérique

Cette section dresse un inventaire des principaux polluants émis par les véhicules, situe cette contribution parmi les sources anthropiques majeures et explique brièvement le rôle de ces polluants dans les phénomènes atmosphériques (réchauffement climatique et formation de smog).

On entend par polluant « toute substance présente dans l'environnement en concentration supérieure à sa concentration naturelle ou au seuil maximum fixé par règlement, et préjudiciable à l'environnement à des doses plus ou moins élevées » (Termium 2003). Le vocable polluants atmosphériques réunit toutes les substances, naturelles ou artificielles, susceptibles d'être aéroportées : gaz, particules solides, gouttelettes liquides ainsi que différents mélanges de ces formes. Il se dégage deux grandes classes de polluants :

- primaires : émis directement par des sources identifiables;
- secondaires : produits dans l'atmosphère par interaction entre les constituants présents, avec ou sans activation photochimique.

Les polluants considérés dans le cadre de cette étude sont les polluants primaires provenant directement de l'échappement des moteurs des véhicules automobiles et les pertes par évaporation. Les polluants émis par le secteur amont (production des combustibles et des véhicules) ainsi que le secteur aval (fin de vie des véhicules) ne sont qu'abordés brièvement au passage.

Parmi les polluants primaires propres à la combustion d'hydrocarbures, on retrouve les composés carbonés, les composés azotés, les composés organiques (volatils, irritants ou odorants), les composés soufrés et les particules. La vapeur d'eau, produit final de combustion de la plupart des combustibles, n'est naturellement pas considérée. Les polluants secondaires sont principalement l'ozone et les acides nitrique et sulfurique (issus de l'oxydation dans l'atmosphère des NO_x et du SO₂).

1.1.1 Dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone est un produit final de combustion de tout combustible carboné (biomasse, bois, charbon, pétrole et dérivés pétroliers) et des métabolismes aérobies (respiration).

Présent en très faible quantité dans l'atmosphère (moins de 0,05%), le CO₂ est néanmoins essentiel à l'équilibre thermique sur terre par son rôle de gaz à effet de serre. L'augmentation de la demande énergétique d'un nombre grandissant d'humains couplé à un élargissement de la variété des gaz relâchés dans l'atmosphère sont désormais reconnus comme une menace pour cet équilibre (Nations Unies 1992). Comme rien ne se perd ni ne se crée, les hydrocarbures (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.) ayant longuement mûris au sein de l'écorce terrestre se trouvent massivement relâchés par l'activité humaine, libérant du coup des quantités considérables de CO₂ depuis le début de l'ère préindustrielle. Le déséquilibre se situe dans le temps et dans l'espace; des millions d'années de pétrissage thermique et d'accumulation de matière carbonée sont relâchés en moins de 200 ans par une poignée de nations industrialisées.

La fonction chlorophyllienne dans les végétaux terrestres et marins assure la transformation du CO₂ gazeux en solides carbonés, mais ce cycle naturel ne semble pas suffire pour compenser l'activité anthropique. C'est du moins l'une des conclusions du *Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]*, groupe d'experts mandaté par les Nations Unies pour étudier l'évolution du climat terrestre. Leurs analyses démontrent que la concentration de CO₂ a augmenté de 31% dans l'atmosphère depuis 1750 (IPCC 2001). Bien que le CO₂ soit visé par le

protocole de Kyoto, il ne fait pas partie des émissions réglementées pour les véhicules. Par contre, l'émission de CO₂ étant directement proportionnelle à la consommation de carburant, certains pays ou communautés ont choisi d'intervenir à ce niveau.

1.1.2 Monoxyde de carbone (CO)

Le CO est un gaz toxique, de densité voisine de celle de l'air et sans odeur, qui naît généralement dans des conditions de combustion trop riche (excès d'essence par rapport à la stoechiométrie). De plus, une faible concentration de CO est due à la dissociation à haute température du CO₂, et ce peu importe les conditions stoechiométriques. Le CO est essentiellement engendré dans les processus de combustion (combustibles fossiles, biomasse, etc.). Seul une faible part provient de métabolismes anaérobies semblables à ceux générant du méthane.

La réactivité atmosphérique du monoxyde de carbone favorise son élimination au cours du temps : les ions hydroxydes (OH⁻) l'oxydent en CO₂ par un mécanisme impliquant le NO (Degobert 1992a).

1.1.3 Composés azotés

Les polluants azotés reliés à la combustion d'hydrocarbures sont principalement le NO et le NO₂. Regroupés sous le vocable d'oxydes d'azote, ceux-ci sont produits par la combustion des carburants à haute température. Prédominant à l'émission (90 à 95% des NO_x formés), le NO est rapidement oxydé en NO₂ dans l'atmosphère (Wark et Warner 1981, p. 378). Les NO_x sont en partie oxydés en nitrates que les pluies ramènent au sol sous forme de pluies acides. Le rôle significatif des NO_x dans la formation du smog photochimique (Haagen-Smit 1952) est à la base du resserrement de certaines normes d'émissions des véhicules.

Le tiers des émissions de NO_x à l'échelle du Globe serait d'origine humaine (Degobert 1992a). Au Québec, 80% des émissions anthropiques de NO_x proviennent du transport (Ministère de l'environnement et de la faune [MEF] 1997). L'adoption du convertisseur catalytique à trois voies, rendue obligatoire

par règlement, a grandement influencé la réduction de 17% des NO_x enregistrée au Québec entre 1975 et 1994 (MEF 1997, p. 18-19).

La mesure des NO_x pour un échantillon de gaz d'échappement s'en tient habituellement au NO et au NO₂, et la somme des quantités est présentée comme si le NO était présent sous forme de NO₂. Néanmoins, une fraction de N₂O est également produite. La recherche indique que « tous les véhicules équipés d'un convertisseur catalytique, quel que soit le modèle, produisent systématiquement plus de N₂O que ceux dépourvus de ce système » (Environnement Canada [EC] 2003a, p.38).

1.1.4 Composés organiques (volatils ou imbrûlés)

Cette catégorie concerne tous les composés à base de carbone, excepté le CO et le CO₂ traités séparément. Les émissions d'hydrocarbures émis par le transport sont de deux natures : les pertes par évaporation (ex : gaz de carter, fuites du circuit de carburant, événements) et la combustion incomplète générant des hydrocarbures imbrûlés ou partiellement brûlés dans l'échappement. Ces derniers sont habituellement dénotés HC, alors que les pertes par évaporation sont dénommées composés organiques volatils [COV].

L'*Environmental protection agency* des États-Unis [EPA] définit un COV comme un composé organique qui, une fois libéré dans l'atmosphère, peut y demeurer pendant un temps suffisamment long pour participer à des réactions photochimiques, et dont la tension de vapeur est généralement supérieure à 0,133 kPa aux conditions (20°C et 101,3 kPa) normales (États-Unis 2003c).

Bien qu'une partie des hydrocarbures imbrûlés puisse participer à des réactions photochimiques, le terme HC réfère plutôt à l'origine du polluant et à sa méthode de mesure en vue d'appliquer une norme. Ce qu'englobe le terme HC varie au fil des amendements apportés par l'EPA à la loi originale. La tendance observée dans la réglementation de l'EPA est de mettre l'emphase sur les polluants actifs dans la formation du smog, en plus d'encadrer de manière plus précise les normes pour

certains polluants jugés prioritaires. Selon la méthode de mesure utilisée, les HC se subdivisent en sous catégories présentées à l'Annexe B de ce mémoire.

1.1.5 Les particules

Le terme particule [PM] réfère à des aérosols créés par la dispersion dans l'air de solides et de liquides atomisés, poudres ou gouttelettes, et renvoie aux notions de poussières, fumées, suies, brumes, brouillards et smog (Degobert 1992a). Mis à part les poussières minérales engendrées par l'usure de la chaussée, des pneumatiques et des garnitures de freins, les PM issues du transport sont principalement organiques. Ces particules, réglementées, proviennent de la combustion incomplète des carburants, favorisée par la présence de mélanges trop riches. Ces émissions sont surtout produites par les moteurs diesel, particulièrement lorsque aucun dispositif (piège à particules ou filtre) n'est présent. Le terme particules en suspension concerne habituellement les PM₁₀ (diamètre inférieur à 10 µm), caractérisées par une vitesse de sédimentation lente.

1.1.6 L'ozone et la formation du smog

Essentiellement présent dans la stratosphère où il assure le filtrage du rayonnement UV-B (280-320µm), l'ozone [O₃] est cependant problématique au niveau du sol. L'ozone troposphérique est un oxydant qui résulte de réactions photochimiques complexes entre des polluants précurseurs (majoritairement les NO_x et les COV), en présence de rayonnement solaire (Haagen-Smit 1952). Le terme SMOG (contraction des mots *smoke* et *fog*) décrit la soupe chimique composée d'ozone, de substances particulières primaires (pollen et poussières) et secondaires (oxydes de soufre, ammoniac et COV). Des phénomènes météorologiques tels que de fortes chaleurs ou la présence de masses d'air stagnant favorisent la formation de smog (Labelle 1998).

1.1.7 Autres polluants

Divers autres polluants sont émis par les transports en quantité moindre, mais dont l'impact est notable. Par exemple, les hydrocarbures aromatiques polycycliques [HAP] (majoritairement contenus dans les fumées de moteurs

diesel), les composés soufrés (surtout sous forme de SO₂), les additifs au plomb dans les carburants encore sous dérogation, des métaux provenant de l'attrition des pots catalytiques (ex : platine, palladium, rhodium), ainsi que tout autre additif (ex : cadmium, zinc, manganèse) présent dans le carburant ou les lubrifiants (Degobert 1992a) D'autres polluants inhabituels peuvent aussi apparaître en cas de déréglage.

Découlant de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) [LCPE], le Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs (Canada 2003a, p. 29-30) accorde une importance particulière à certains polluants jugés d'intérêt prioritaire :

Le règlement réduira les émissions de composés organiques volatils (COV), de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes d'azote (NO_x), de particules (PM) et certains polluants atmosphériques qui apparaissent sur la Liste des substances toxiques de l'annexe 1 de la LCPE (1999) (p. ex., le benzène, le butadiène-1,3, l'acétaldéhyde, l'acroléine et des particules inhalables de 10 microns ou moins (PM₁₀) qui proviennent des véhicules routiers et des moteurs) et protégera ainsi notre environnement et notre santé. Le règlement réduira aussi les émissions de formaldéhyde, une substance dont l'ajout à l'annexe 1 a été suggéré. [...] Le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et le butadiène-1,3, en plus d'avoir des effets néfastes directs sur la santé humaine, jouent un rôle avec d'autres COV réactifs dans la formation de l'ozone au niveau du sol.

La prochaine section permet de faire le lien entre les polluants générés dans un moteur à combustion interne et les techniques applicables pour réduire ces émissions.

1.2 Technologies de contrôle des émissions

Cette section reprend les polluants définis à la section précédente, et lie leurs processus de formation aux stratégies de contrôle et de réduction correspondantes. L'accent est mis sur le moteur à allumage commandé, le moteur de type diesel étant peu discuté, ce qui reflète l'état des publications sur le sujet.

Les polluants émis par les moteurs résultent d'une combustion incomplète et d'un équilibre thermochimique imparfait. Les moteurs à allumage commandé (moteur typiquement à essence) sont sensibles au ratio air/carburant et tout éloignement de la valeur stoechiométrique se répercute sur la quantité de polluants émis. En mélange riche (excès de carburant), la formation de CO et de HC est favorisée par le manque d'oxygène pour oxyder les molécules de carburant, en plus de laisser inutilisée une partie de l'énergie contenue dans le combustible. À l'opposé, un mélange pauvre (excès d'air) fait chuter la température et la pression des gaz de combustion, ce qui entraîne une diminution du travail généré par cycle moteur. L'excès d'oxygène favorise la formation de NO_x, et bien qu'une partie retourne sous forme de N₂ et O₂ lors du refroidissement subséquent des gaz brûlés, une portion des NO_x demeure dans les gaz d'échappement. La formation de NO_x est favorisée par les hautes températures, ce qui prévaut aux abords de la stoechiométrie. À la stoechiométrie, il y a également génération de polluants par dissociation et combustion incomplète.

Des analyses d'émissions pour une voiture sans système antipollution (datant des années soixante) indiquent la répartition suivante des polluants (Wark et Warner 1981, p. 426):

- émissions à l'échappement : 100% du CO, 100% des NO_x, 62% des HC et 90% des PM;
- émissions du carter : 20% des HC et 10 % des PM;
- évaporation du réservoir d'essence : 9% des HC;
- évaporation au carburateur : 9% des HC.

Basé sur ce constat, la réduction des polluants ne peut être atteinte qu'en réduisant à la fois les émissions à la source et en adoptant des méthodes

d'épuration post-combustion. Le cheminement des technologies de contrôle des émissions est relaté ci-après, en fonction de ces deux approches. Le cas des moteurs à essence est traité en premier, suivi des moteurs diesel.

1.2.1 Réduction des émissions à la source

La première mesure de réduction des émissions a été exigée par la Californie (Fay et Golomb 2002) avec le recyclage des gaz de carter (*Positive crankcase ventilation [PCV]*). Il consiste à relier le carter à l'admission du moteur en vue d'aspirer ses vapeurs pour les brûler avec les gaz frais afin d'en éviter le relâchement dans l'atmosphère. Dans la mesure du possible, toute autre fuite potentielle du moteur est contrôlée de manière similaire.

Deux autres méthodes usuelles pour réduire la formation des polluants à la source sont le contrôle du ratio air/carburant et la recirculation des gaz d'échappement (*Exhaust gas recirculation [EGR]*). En place depuis le début des années 1980, l'injection de carburant électroniquement contrôlée permet un dosage précis du mélange air/carburant. Une sonde d'oxygène (sonde lambda) placée dans l'échappement avant le convertisseur catalytique permet d'informer un module électronique des ajustements requis pour tendre vers un mélange idéal. Ceci permet de réduire sensiblement les HC et le CO. Les systèmes plus récents utilisent une seconde sonde lambda tout juste à la sortie du convertisseur catalytique pour détecter toute déficience en oxygène dans le procédé de catalyse. La recirculation des gaz d'échappement, par pompage ou séquençage des valves, dilue les gaz frais et diminue la température maximale atteinte lors de la combustion, réduisant de ce fait les NO_x. Ce procédé est utilisé lorsque le moteur est en charge réduite afin de ne pas compromettre sa puissance et son couple maximum. Les paramètres de design du moteur ont aussi une influence marquée sur les émissions, comme par exemple le ratio surface/volume de la chambre de combustion ou le retard de l'allumage.

La réduction des émissions passe également par le contrôle de l'évaporation du carburant. Ces émissions, dites fugitives, sont responsables d'une bonne partie des COV dans l'air ambiant. Les émissions proviennent du relâchement dans

l'atmosphère de la vapeur emmagasinée dans le réservoir de carburant ou dans le système d'alimentation. Les variations atmosphériques de température, de pression et l'ouverture du réservoir lors du remplissage favorisent ce processus. Pour prévenir ces émanations, un filtre au charbon actif est installé dans la ligne d'évent reliant la partie supérieure du réservoir à l'atmosphère. Ce filtre emmagasine les vapeurs d'hydrocarbures, qui seront éventuellement purgées et brûlées avec les gaz frais.

En plus des dispositifs à bord des véhicules, diverses mesures permettent de limiter les émanations de COV provenant du carburant. Parmi celles-ci, citons la récupération des vapeurs lors des transferts de carburant (station-service et dépôt pétrolier), la réglementation sur la tension de vapeur du carburant et la limitation du débit à la pompe.

1.2.2 Épuration post-combustion

L'épuration catalytique est un procédé post-combustion permettant d'oxyder le CO et les HC en CO_2 et H_2O , en plus de réduire les NO_x en N_2 et O_2 . Ce processus est rendu possible par l'utilisation d'une surface imprégnée d'un catalyseur où les molécules peuvent se transformer, le tout protégé à l'intérieur du pot catalytique. Les systèmes actuels requièrent une température supérieure à 250°C et l'utilisation d'agents catalyseurs tels que platine, palladium et rhodium intégrés dans une matrice d'alumine. Une grande surface de contact (structure alvéolaire) est nécessaire pour assurer une transformation rapide des polluants. Le volume du pot catalytique est d'environ la moitié de la cylindrée du moteur. Le convertisseur est inactif jusqu'à ce que les gaz d'échappement l'aient suffisamment réchauffé (température d'amorçage), la durée variant selon le type de conduite et sa position dans la ligne d'échappement. Pour diminuer les émissions au démarrage par temps froid, la préchauffe électrique du pot catalytique ou l'ajout d'un pré-convertisseur près du moteur est parfois réalisé.

Depuis 1995, une garantie de huit ans ou 130 000 kilomètres couvre cet équipement contre les défauts de fonctionnement pour les véhicules passager. En théorie, un convertisseur catalytique devrait durer la vie complète du véhicule. La

contamination ou la dégradation thermique le rendent inopérant. Des ratés à l'allumage peuvent expulser une charge de gaz imbrûlés (air et combustible) qui s'enflamme dans le pot catalytique, endommageant celui-ci de manière irréversible. Le système de diagnostic embarqué [OBD] surveille continuellement les ratés et informe le conducteur en cas de dysfonctionnement. Pour assurer la longévité du pot catalytique, le moteur doit être maintenu dans la plage de fonctionnement appropriée (ratio air/carburant) et ne pas brûler d'huile. Des impuretés dans le carburant (plomb, soufre, phosphore) peuvent s'associer avec les métaux précieux et former un film qui empêche le contact entre la surface catalytique et les gaz, rendant inopérant de manière définitive le pot catalytique. Les restrictions sur les teneurs en plomb et en soufre découlent directement du désir de contrer cet effet d'empoisonnement.

1.2.3 Techniques antipollution pour les moteurs diesel

Ce qui précède concerne les moteurs à allumage commandé. La réduction des émissions pour les moteurs diesel diffère quelque peu. En moyenne, le moteur diesel émet moins de HC et de CO qu'un moteur à essence grâce à son fonctionnement en mélange pauvre, mais d'avantage de NO_x favorisé par l'excès d'oxygène. Compte tenu du fait que le mélange air-carburant ne s'effectue pas avant l'admission comme dans un moteur à essence, mais plutôt directement dans la chambre de combustion tout juste avant son allumage, le mélange présente des inhomogénéités. Une portion du carburant brûle en déficience d'oxygène donnant naissance à des particules carbonées solides (suie), parfois recouvertes de HAP. Des modifications du moteur (ex : injection directe du carburant, augmentation de la pression d'injection, recirculation des gaz brûlés) contribuent à diminuer ces inconvénients.

La réduction catalytique des NO_x est moins efficace que dans le cas d'un moteur à essence, car les gaz d'échappement de moteur diesel contiennent moins de molécules d'hydrogène disponibles pour la réduction des oxydes d'azote dans le convertisseur catalytique. Bien que le convertisseur oxyde une partie des PM contenues dans l'échappement, l'utilisation de filtres ou de pièges à particules devient nécessaire avec le resserrement des normes d'émissions. Finalement, la

composition du carburant affecte aussi les émissions, particulièrement la teneur en soufre. Transformé en SO₂ lors de la combustion, ce polluant ralentit la réduction du NO dans le pot catalytique.

1.2.4 Durabilité du système de contrôle des émissions

Afin d'évaluer la durée de vie des convertisseurs catalytiques, et de manière plus générale la durabilité du système antipollution dans son ensemble, les statistiques d'échec aux tests inspection/maintenance ont été analysées. Ces programmes rendent obligatoire l'inspection des émissions pour les véhicules routiers en service. L'étude se limite à la situation canadienne.

Le programme AirCare (Colombie-Britannique) affiche un taux d'échec de 16% pour l'ensemble des véhicules testés depuis sa mise en place en 1992. Pour les inspections de l'année 2002, un taux d'échec de 18% pour les véhicules antérieurs à l'année de modèle 1992 a été enregistré (Gourley, Stewart, Wong et Loo 2003). Les items le plus souvent remplacés sont dans l'ordre la sonde lambda, le convertisseur catalytique, les bougies et le filtre à air. Pour les véhicules de 1992 à 2002, le taux d'échec moyen est de 7% et le convertisseur catalytique est en première position des pièces les plus remplacées. Les autres réparations touchent principalement les dépôts de combustion, le temps d'allumage, le système d'injection d'air et d'essence et le système EGR.

Pour les véhicules dotés de la technologie actuelle de gestion des moteurs et du contrôle d'émissions, une durée de vie moyenne suggérée est de 240 000km (Gourley 2004) pour le convertisseur catalytique. On entend ici par durée de vie que le convertisseur fonctionne à un niveau suffisant pour réussir un test semblable au AirCare, soit le cycle IM240 (voir la section 2.6.1 : *Programme AirCare*). Aucune donnée fiable n'a pu être obtenue pour évaluer cette longévité dans le contexte québécois. Compte tenu que les conditions climatiques et la quantité de déglaçant épandu sur les routes constituent des conditions plus sévères que celles prévalant en Colombie-Britannique, cette longévité est peut-être moindre en sol québécois.

Le programme ontarien d'inspection des émissions Drive Clean affiche un taux d'échec de 14,7% pour les véhicules légers depuis sa mise en place en 1999 (Drive Clean 2003b). Le service à la clientèle a été contacté afin d'obtenir des renseignements sur les réparations les plus fréquentes suite à ces échecs. Les diagnostics des véhicules ayant échoué le test d'émission n'étant pas répertoriés dans le programme Drive Clean, ces statistiques n'ont pu être obtenues.

La mesure des polluants en laboratoire, sa technique et les exigences légales qui y sont rattachées font l'objet de la prochaine section.

1.3 Mesure des gaz brûlés

Cette section, ainsi que l'Annexe A, présentent l'instrumentation et la technique pour la mesure de gaz brûlés en laboratoire. Bien que la portion expérimentale de cette maîtrise se déroule plutôt en conditions réelles et utilise un équipement de mesure portatif, la compréhension de la méthodologie en laboratoire permet d'encadrer l'échantillonnage sur route et de mieux saisir ses forces et limitations. La mesure des gaz brûlés hors laboratoire n'est pas spécifiquement définie dans la réglementation, ce qui augmente le flou autour de cette pratique. La section 3.1.1 : *Mesure des émissions à l'aide d'équipements embarqués* décrit plus en détail cette technique.

La mesure de gaz brûlés en laboratoire est encadrée par des normes et des procédures afin de permettre la répétabilité et la comparaison des résultats. La méthodologie en vigueur en Amérique du Nord pour la mesure des gaz brûlés émane de techniques utilisées dans les laboratoires fédéraux et gouvernementaux des différents états américains. Les industries automobile et pétrolière contribuent également à la mise en place de procédures similaires. Dans la littérature consultée, deux sources s'imposent comme références; la réglementation de l'EPA et la *Society of automotive engineers [SAE]*.

1.3.1 Instrumentation pour la mesure des gaz brûlés en laboratoire

Suite à une revue approfondie des techniques et procédures en vigueur, la SAE a établi divers documents traitant de la mesure des gaz brûlés et de sujets

connexes. La documentation, mise à jour de manière trimestrielle, est un guide de bonnes pratiques (*SAE recommended practice*) permettant d'uniformiser la méthodologie et d'assurer une base de comparaison fiable. La recommandation SAE J254 (SAE 1993) spécifie l'instrumentation et les techniques relatives à la mesure des émissions d'échappement de moteur à essence pour véhicules passagers et camionnettes. Les recommandations SAE J177 (SAE 1995b) et SAE J215 (SAE 1995a) expliquent la procédure pour les moteurs diesel. L'Annexe A de ce mémoire résume les aspects techniques pour la mesure de gaz brûlés en laboratoire, les particularités des principales méthodes d'analyse, ainsi que la méthodologie sur banc d'essai.

1.3.2 Procédure d'essai sur dynamomètre (EPA)

Les essais décrits ci-dessous sont utilisés aux États-Unis et au Canada pour évaluer les émissions des véhicules neufs et en service. En vue de ces essais, un échantillon représentatif du parc de véhicules de chaque manufacturier est réservé, les véhicules testés à l'état neuf servant éventuellement pour les tests en service. Ce survol de la mesure des émissions se base sur la réglementation de l'EPA, publiée dans le *Code of federal regulations [CFR]* (États-Unis 2003a, 2003b).

Plusieurs procédures d'essai existent à travers le monde pour mesurer les émissions des véhicules. Ces procédures reproductibles permettent la comparaison des taux d'émission entre différents véhicules, en évitant les multiples interférences propres à la conduite sur route. Une procédure courante est la *Federal test procedure [FTP]* de l'EPA.

La mesure des polluants en laboratoire nécessite l'utilisation d'un dynamomètre à châssis, complété par un système de collecte et d'analyse des gaz d'échappement (voir l'Annexe A). La vitesse du véhicule est réglée selon un abaque indiquant la vitesse cible pour chaque instant du test. Dans la procédure FTP, cet abaque est le cycle *EPA Urban dynamometer driving schedule* (États-Unis 2003b, annexe I). Ce cycle simule un déplacement type de 18 kilomètres dans

une zone urbaine. Le parcours est ponctué d'arrêts départs et le véhicule est conditionné avant le test (réchauffage et stabilisation).

Pour tenir compte de l'augmentation draconienne des émissions en conditions particulières, le *Supplemental federal test procedure [SFTP]* vient compléter le FTP depuis 2001. Le test, composé de deux cycles de conduite, vise à mesurer l'impact sur les émissions de la conduite agressive (haute vitesse et fortes accélérations, cycle US06) et de l'utilisation de la climatisation (cycle SC03). Une fois ces tests complétés, les résultats sont comparés aux normes d'émissions en vigueur pour le véhicule à l'essai. D'autres tests sont également définis, par exemple la mesure des émissions au ralenti, et les pertes par évaporation.

Différents paramètres sont contrôlés et notés lors d'un test pour assurer la reproductibilité, à savoir la composition du carburant utilisé, les conditions ambiantes ainsi que les paramètres détaillés permettant de retracer le bon fonctionnement du système de collecte et d'analyse des gaz brûlés.

La prochaine section présente la législation encadrant les émissions des véhicules, et situe les concepts introduits en début de chapitre dans une perspective de réglementation.

1.4 Cadre Légal

Comme souligné à quelques reprises, la diminution des émissions de polluants par les véhicules passe par la réglementation. Cette section propose une revue de la législation relative à la pollution de l'air visant les propriétaires de véhicules, les constructeurs, et les services s'y rattachant. Le survol débute aux niveaux municipal et provincial, aborde ensuite les similitudes entre la législation étasunienne et canadienne, pour enfin se terminer avec le protocole de Kyoto soulignant le caractère global de ces questions.

1.4.1 Législation de la Ville de Montréal

La Communauté urbaine de Montréal a adopté en décembre 1986 le Règlement 90 relatif à l'assainissement de l'air. L'article 3.06 du Règlement (Montréal 1986) stipule :

Personne ne peut garder en marche pendant plus de quatre (4) minutes le moteur d'un véhicule stationné à l'extérieur à moins de 60 mètres de toute ouverture ou prise d'air murale d'un immeuble, sauf lorsque le moteur est utilisé à accomplir un travail hors du véhicule ou à réfrigérer des aliments.

Les plaintes sont logées par des citoyens ou référées par le service de Police de Montréal. Sept inspecteurs du service de l'environnement de la Ville de Montréal sont chargés de l'application des règlements relatifs à la qualité de l'air et de l'eau pour toute l'île de Montréal. Pour une première offense, une lettre d'avis est envoyée au conducteur. En cas de récidive, une poursuite est entamée et des amendes variant entre 100 et 1000\$ sont prévues au règlement. Une personne responsable du traitement des plaintes en poste depuis trois ans au service de l'environnement a signalé qu'aucune amende n'a été donnée durant cette période (Chevalier 2004). Des révisions au règlement en vue de faciliter son application sont en pourparlers au niveau de la Communauté métropolitaine de Montréal. Le même règlement exige depuis 1998 la récupération des vapeurs lors des transferts de carburant (dépôt pétrolier et station-service).

1.4.2 Législation des provinces canadiennes

Au Québec, la Loi sur la qualité de l'environnement (Québec 1978) édicte des obligations quant aux émissions à l'air. Divers règlements viennent encadrer l'application de cette loi. L'article 96.1 du Règlement sur la qualité de l'atmosphère (Québec 1985) stipule:

Tout véhicule automobile léger d'un modèle postérieur à 1985 offert en vente, exposé pour fin de vente, vendu ou utilisé au Québec doit être pourvu d'un appareil en état de fonctionnement qui réduit l'émission d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote dans l'atmosphère.

L'article 96.2 interdit l'enlèvement des appareils antipollution. Comme seule une infraction à l'article 96.2 est possible de sanctions, il est raisonnable de penser que nombre de véhicules dont les composantes antipollution sont en place mais

hors d'usage demeurent en circulation. Pour l'année 2002, le programme de vérification des émissions de la Colombie-Britannique fait état de 5181 véhicules, soit 0,73% du total échantillonné, dépourvus de convertisseur catalytique (Gourley, Stewart, Wong et Loo 2003). Comme aucun programme de vérification des émissions n'est implanté au Québec, on peut s'attendre à ce que cette proportion y soit plus élevée. La plupart des provinces canadiennes interdisent toute modification des dispositifs antipollution, bien que certaines, comme le Manitoba, tolèrent encore cette pratique.

Une requête judiciaire est en voie d'être déposée à la Commission de coopération environnementale [CCE] par une coalition ad hoc visant à forcer Québec à appliquer les articles 96.1 et 96.2 du Règlement sur la qualité de l'atmosphère (Bisson 2003). La CCE est une organisation internationale créée par le Canada, le Mexique et les États-Unis en vertu de l'Accord de libre-échange nord-américain [ALENA].

L'article 66.12 du Règlement sur les produits pétroliers (Québec 1999) précise par ailleurs que « Nul ne peut utiliser un produit pétrolier de la classe 1 (ex : essence ou diesel) comme nettoyeur ou comme solvant ». Le projet de Règlement sur les halocarbures (Québec 2002) remplaçant le Règlement sur les substances appauvrissant la couche d'ozone, précise les modalités de remplacement, de récupération et de disposition des réfrigérants des systèmes d'air climatisé.

De plus, des lignes directrices (n'ayant pas force de loi) sont publiées par le ministère de l'environnement du Québec, telles que « Les critères de qualité de l'air » spécifiant les seuils acceptables pour divers polluants atmosphériques ou le « guide de bonnes pratiques pour la gestion des véhicules hors d'usage ». Un programme d'inspection obligatoire des émissions des véhicules routiers pourrait éventuellement être mis en application au Québec. Le « programme de promotion de l'inspection, l'entretien et l'efficacité énergétique des véhicules routiers au Québec » développé par l'Association québécoise de lutte contre la pollution atmosphérique [AQLPA] (AQLPA 2001) s'inspire de programmes similaires implantés en Colombie-Britannique, en Ontario et dans plus de 30 états

américains. L'AQLPA administre également le projet pilote « Faites de l'air » qui vise à retirer de la circulation jusqu'à 2000 véhicules (1988 ou plus vieux) moyennant une compensation à partir de l'automne 2003 (AQLPA 2003).

Pour l'Ontario, le chapitre E.19 de la Loi sur la protection de l'environnement de 1990 prohibe l'utilisation d'un véhicule automobile dont le dispositif antipollution a été retiré (Ontario 1990). L'alinéa 2 de l'article 23 stipule que le système en question doit fonctionner conformément aux règlements lorsque le moteur ou le véhicule automobile est en marche. Conséquemment à cette loi, le programme Air pur Ontario (Drive Clean 2003b) rend obligatoire l'inspection des émissions pour les véhicules routiers en service dans certaines régions de l'Ontario. Mis en place en 1999, le programme spécifie les seuils d'émissions (CO, NO_x, HC) à respecter en fonction de l'année de construction et du type de véhicule. Le renouvellement de l'immatriculation du véhicule est conditionnel à la réussite du test, et la périodicité de ces inspections varie de un à deux ans selon le type de véhicule.

Aux prises avec de sérieux problèmes de pollution de l'air et de smog dans la vallée du bas Fraser, la Colombie-Britannique a adopté dès 1992 un programme inspection/maintenance pour les véhicules routiers immatriculés dans cette zone. Les HC, CO et NO_x sont mesurés, ainsi que l'opacité des fumées diesel (AirCare 2003). Le programme est complété par un plan de mise à la ferraille volontaire, appelé *Scrap-it program*. Ces initiatives sont appuyées par des lois (*Motor vehicle act* et *Waste management act*) ainsi que les règlements en découlant (*Motor vehicle emissions reduction regulation* et *Motor vehicle emission control warranty regulation*).

1.4.3 Législation fédérale

La réglementation canadienne concernant les émissions des véhicules routiers est en quelque sorte une vitrine bilingue des normes précédemment adoptées aux États-Unis. La première norme d'émission est adoptée en 1971 sous la Loi sur la sécurité automobile, et vise seulement le CO (Ministère de l'environnement et de la faune [MEF] 1997). En 1974, de nouvelles normes sont adoptées pour le CO, et les HC sont réglementés pour la première fois. L'arrivée des premiers

convertisseurs catalytiques par oxydation (CO et HC) nécessitant une essence ne contenant pas ou peu d'additifs au plomb, le *Règlement sur l'essence sans plomb* est adopté en 1974. Une nouvelle série de limites est introduite en 1987 pour le CO et les HC, auxquelles s'ajoute le contrôle des NO_x rendu possible par les convertisseurs catalytiques à trois voies. Cette évolution suit la progression des normes étasuniennes, parfois avec un certain retard et une relaxation des exigences d'application.

Depuis 1988, les normes fédérales canadiennes et les méthodes d'essai applicables sont intégralement alignées sur les normes fédérales de l'EPA des États-Unis et mises en œuvre grâce à des règlements et des protocoles d'entente volontaires (Canada 2001b) avec les fabricants de véhicules et de moteurs (Canada 2003a, p. 33). Ces ententes visent essentiellement à s'assurer que les véhicules vendus au Canada soient équipés des mêmes dispositifs de surveillance et de contrôle des émissions et que les émissions de véhicules neufs soient identiques aux modèles étasuniens. Précédemment sous l'autorité législative de la Loi sur la sécurité automobile administrée par Transports Canada, le contrôle des émissions des véhicules routiers est sous la charge d'Environnement Canada depuis le 31 mars 2000 en vertu des dispositions prévues dans la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) [LCPE].

Le programme fédéral pour des véhicules, des moteurs et des carburants moins polluants englobe une série de mesures visant à réduire la pollution de l'air au Canada (Canada 2001a). Parmi celles-ci, le *Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs* (Canada 2003b) spécifie les normes d'émissions pour les véhicules neufs à partir du 1^{er} janvier 2004. Ce rehaussement des exigences a engendré l'obligation de considérer les carburants et le système de contrôle des émissions comme un système intégré. Les règlements sur les carburants présentés ci-dessous émanent de la LCPE, soit de la section 4 « combustibles » et de la section 5 « émissions des véhicules, moteurs et équipements » :

- *Règlement sur le soufre dans l'essence;*
- *Règlement sur le soufre dans le carburant diesel;*

- *Règlement sur le débit de distribution de l'essence et de ses mélanges;*
- *Règlement fédéral sur les halocarbures;*
- *Règlement sur le benzène dans l'essence;*
- *Loi sur les normes de consommation de carburant des véhicules automobiles.*

Le *Règlement sur le soufre dans l'essence* limite la quantité de soufre à 300 mg/kg de carburant pour la période du 1^{er} octobre 2003 au 31 décembre 2004, puis à 80 mg/kg à partir du 1^{er} juin 2005. Le *Règlement sur le soufre dans le carburant diesel* impose une limite de 500 mg/kg jusqu'au 31 mai 2006, subséquemment abaissée à 15 mg/kg de carburant. Depuis le 1^{er} février 2001, le *Règlement sur le débit de distribution de l'essence et de ses mélanges*, limite le débit de distribution à partir du pistolet à 38 litres par minute en vue de limiter les émissions par évaporation et éclaboussures lors du plein de carburant. Le *Règlement fédéral sur les halocarbures* interdit, à compter du 1^{er} janvier 2000, d'utiliser un halocarbure prohibé (définit à l'annexe 1 du règlement) dans un système de climatisation conçu pour les passagers d'un véhicule automobile. Ce qui implique, par exemple, que les chlorofluorocarbones [CFC] ne peuvent être réutilisés pour faire la maintenance d'un système défectueux. Depuis le 1^{er} juillet 1999, le *Règlement sur le benzène dans l'essence* interdit la vente d'essence contenant du benzène en une concentration supérieure à 1,0% en volume. Le benzène fait partie des substances qui ont été déclarées toxiques aux termes de la LCPE (1999). La *Loi sur les normes de consommation de carburant des véhicules automobiles*, votée en 1982, n'a jamais été mise en vigueur. Cette loi est une version canadienne du *Corporate average fuel efficiency [CAFE]* des États-Unis.

En plus de ces règlements, le fédéral a adopté des mesures d'écologisation pour son propre parc de véhicules automobiles, telles la Loi sur les carburants de remplacement, et la Politique sur la gestion du parc automobile (1996). Le parc automobile fédéral compte environ 23 700 véhicules, et 2500 véhicules neufs sont acquis chaque année (Canada 2004), ce qui en fait une flotte propice à l'expérimentation de nouvelles technologies.

1.4.4 Législation des États-Unis

Tout comme les États-Unis n'ont cessé d'étendre l'automobilisme à l'excès en bâtissant une nation liée de manière ombilicale à l'automobile, ce sont les premiers à avoir dû contrôler les émissions de cette marée polluante. Une expertise reconnue internationalement au niveau de la pollution de l'air, appuyée par des moyens de recherche majeurs et une industrie automobile prolifique, en font une référence en matière de normes d'émissions automobile.

Le Clean Air Act est la loi encadrant tout ce qui touche à la pollution de l'air aux États-Unis. Votée par le congrès en 1963 et amendée à plusieurs reprises par la suite, la première réglementation (CO, HC, NO_x) pour les émissions de véhicules routiers apparaît dans le Clean Air Act de 1970. Originellement prévue pour les véhicules de l'année de modèle 1975, elle ne sera appliquée intégralement qu'en 1981, suite à la demande de l'industrie automobile (EPA 2003).

Les règlements découlant de l'application du Clean Air Act sont répertoriés dans le *Code of federal regulations [CFR]*. Ce texte législatif regroupe l'ensemble des règlements publiés par les départements exécutifs et les agences du gouvernement fédéral des États-Unis. La partie 86 du titre 40 (*Protection of environment*) du CFR contient l'ensemble des règlements applicables au contrôle des émissions de véhicules routiers, les procédures d'essai et de certification des émissions (États-Unis 2003a, 2003b). L'organisme de réglementation responsable du titre 40 est l'EPA.

Le tableau 1.1, adapté du livre *Energy and the environment* (Fay et Golomb 2002), présente un aperçu historique des normes d'émissions pour les véhicules légers à l'état neuf, ainsi que les avènements technologiques majeurs ayant permis de rencontrer ces exigences. On entend par véhicule léger celui qui pèse moins de 3856 kg, principalement conçu pour le transport de personnes et dont le nombre désigné de places assises est d'au plus douze. Les normes inscrites au tableau sont basées sur le cycle de conduite de la procédure FTP-75.

Les normes d'émissions de particules [PM] sont pour les véhicules diesel. L'impact de la limitation de la consommation de carburant par le *Corporate average fuel efficiency [CAFE]* est discuté à la suite du tableau. Le recyclage des gaz du carter [PCV] a été imposé dès 1963 par la Californie, pour être étendu par la suite au reste des États-Unis. La recirculation des gaz d'échappement [EGR] suivra dix ans plus tard. Les convertisseurs catalytiques à oxydation équipent les modèles dès 1975, mais la réduction catalytique des NO_x n'apparaît systématiquement qu'à partir de 1981. L'adoption du convertisseur catalytique à 3 voies oblige à son tour un contrôle plus précis du ratio air/carburant rendu possible par l'injection électronique, couplée à une surveillance continue des anomalies du système antipollution assurée par le système de diagnostic embarqué [OBD].

Tableau 1.1 : Synthèse des normes d'émissions (véhicules légers)

année	NO _x	CO	PM	HC	CAFE	technologies
		g/km			L/100km	
1963						PCV (Californie)
1968		20,5		2,0		
1971		29,2		2,9		cartouche à charbon
1972						valve EGR
1974	1,9	24,2		2,1		
1975					17,0	pot catalytique 2 voies
1977	1,2	9,3		0,9		
1978	1,2	9,3		0,9	13,0	
1979	1,2	9,3		0,9	12,4	
1980	1,2	4,3		0,3	11,8	
1981	0,6	2,1		0,3	10,7	pot catalytique 3 voies,
1982	0,6	2,1	0,4	0,3	9,8	OBD-0 et sonde lambda
1987	0,6	2,1	0,1	0,3		
1988	0,6	2,1	0,4	0,3		OBD-I
1994	0,2	2,1	0,05	0,3		OBD-II

Il est à retenir de ce tableau que la législation adoptée a largement guidé les réductions d'émissions, à un rythme dicté par les capacités et l'adhésion de l'industrie automobile. Bien que le resserrement des normes d'émissions a permis une diminution de la pollution par véhicule, l'augmentation du nombre de véhicules et du nombre de kilomètres parcourus amoindrit les gains technologiques réalisés. Pour la limitation de la consommation de carburant, et

donc des émissions de CO₂, la norme CAFE a permis un certain progrès. Adopté suite à la crise énergétique de 1973, le CAFE a permis de faire passer la consommation moyenne des nouveaux véhicules de 17L/100km en 1975 à environ 10L/100km en 1982. Depuis ce temps, la consommation a peu changé, et les innovations technologiques servent d'avantage à augmenter la puissance et le poids des véhicules pour une même consommation plutôt que de simplement réduire cette consommation. L'évolution des caractéristiques du parc automobile nord américain est détaillée à la section 2.9 : *Évolution des caractéristiques du parc automobile nord-américain.*

Aux États-Unis, les règlements définissant les émissions de véhicules routiers et la composition des carburants sont appliquées par phases successives, dénommés TIER. Les normes TIER 0 couvrent la période de 1988 à 1994. Il est à noter que deux séries de normes n'apparaissent pas au tableau ci-dessus, soit la norme TIER1 (échelonnée sur la période 1996-2003) et la norme TIER2. La mise en application de TIER2 se fera progressivement de 2004 à 2009, années durant lesquelles une portion toujours croissante des véhicules d'un manufacturier devra répondre à la norme TIER2, le reste demeurant régit par TIER1. Cette nouvelle réglementation donne la flexibilité aux manufacturiers de certifier leur parc de véhicules (véhicules légers, camionnettes et véhicules moyens à passagers d'une même année) dans 11 classes d'émissions différentes (États-Unis 2003b, p. 465). Lorsque les règlements seront intégralement mis en vigueur en 2009, l'ensemble de ces catégories de véhicules, pour une même entreprise, sera assujetti à une seule moyenne de NO_x de 0,043 g/km. Le règlement exige que ces normes soient respectées à l'état neuf ainsi que pour la durée de vie utile totale, soit une période de 10 ans ou 192 000 km dans le cas d'un véhicule ou camion léger (Canada 2003a, p. 36). Les tests de véhicules neufs ou en service sont encadrés légalement, ainsi que les responsabilités du manufacturier (ex : respect des garanties, rappel en cas de système défectueux). Un système de points transférables intra et inter compagnies permettra de marchander tout gain excédent la norme de NO_x applicable à la moyenne du parc (Canada 2003a, p.38).

La norme TIER2 crée une nouvelle classe, soit le véhicule moyen à passagers dont le poids nominal brut [PNBV] est inférieur à 4356 kg, ce qui permet de soumettre les véhicules utilitaires sport au même ensemble de normes d'émissions que les véhicules légers. Le PNBV est le poids théorique maximal d'un véhicule chargé. En augmentant la capacité de charge de véhicules voués au transport de passagers (ex : durcissement des suspensions, augmentation de l'espace de rangement), les manufacturiers ont certifié depuis plusieurs années ces véhicules selon des normes d'émissions moins strictes que pour un véhicule passager typique.

1.4.5 Législation californienne

Le Clean Air Act établit les normes de pollution de l'air pour le pays, et chaque état doit fournir un plan (*State implementation plan*) contenant les règlements et mesures permettant de se conformer à la loi fédérale. Des états peuvent choisir d'adopter des normes plus sévères, comme c'est le cas de la Californie.

Aux prises avec de sérieux problèmes de qualité de l'air, la Californie a instauré dès 1966 un programme de vérification des HC et du CO pour les véhicules routiers. Le *California Air Resources Board [CARB]* a depuis ce temps devancé la plupart des législations fédérales en matière de normes d'émissions, de système de contrôle, de composition des carburants et d'incitatifs à produire des véhicules moins polluants. Jusqu'en 2003, la norme LEV (*Low Emission Vehicle*) réglemente les émissions, graduellement remplacée par la norme LEV II qui devrait s'étendre sur la période 2004-2010. La norme TIER2 de l'EPA constitue une reprise de ce programme.

Plusieurs programmes sont en place afin de diminuer la pollution de l'air liée à l'automobile (CARB 2003a), voici les principaux :

- *smog check program* (programme inspection/maintenance);
- *in-use compliance program* (complément du *smog check program*);
- *smoking vehicles hotline* (délation de véhicules fautifs);
- *voluntary accelerated vehicle retirement* (mise à la ferraille anticipée);
- *report an idling bus or idling commercial vehicle near a school* (délation et réglementation interdisant la marche au ralenti près des écoles);

- *truck idling reduction program* (incitatifs et solutions pour réduire la marche au ralenti des camions lourds);
- *California's zero emission vehicle [ZEV] program.*

Ce dernier programme vise la commercialisation de véhicules n'ayant pas ou peu d'émissions à l'échappement. Adopté en 1990, le programme exigeait pour l'année 2003 que 10% des véhicules produits pour la vente en Californie rencontrent le critère ZEV. Cette exigence a été différée à 2005, mais les fabricants peuvent accumuler des crédits pour les véhicules produits avant 2005 (CARB 2003b).

Dans son discours inaugural du 17 novembre 2003, le gouverneur de la Californie a annoncé sa première résolution, soit d'abolir l'augmentation de taxes de 300% en vigueur à l'achat d'une automobile. Une taxe progressive constitue pourtant une mesure efficace de limitation de la possession automobile, particulièrement si les sommes sont réinvesties dans l'amélioration de la mobilité pour les modes de déplacement non automobiles. La recherche montre que le nombre de passager-kilomètre (nombre de passagers multiplié par le nombre de kilomètres parcourus) est directement proportionnel à la possession automobile (Gilbert 2000).

1.4.6 Législation pour la communauté européenne

La communauté européenne a adopté en 1970 ses premières normes d'émissions pour lutter contre la pollution d'origine automobile. Dans un document intitulé « l'évolution des émissions des véhicules », la Conférence européenne des ministres des transports [CEMT] dresse l'évolution des normes de l'Union européenne (CEMT 2000). La législation européenne y est mise en relation avec les normes des États-Unis. Il se dégage de cette comparaison que la législation européenne insiste d'avantage sur la réglementation des émissions des camions lourds que celle des États-Unis, tout en intégrant des normes d'émissions de véhicules passagers comparables aux normes fédérales étasuniennes.

La législation antipollution européenne est renforcée par la mise en application de divers programmes tel que l'engagement de l'Association des constructeurs

europeens d'automobiles [ACEA], concernant la réduction des émissions de CO₂ des voitures particulières neuves. Les 13 manufacturiers représentés par cette association se sont engagés volontairement, suite à la proposition du Parlement européen et du Conseil de l'Union européenne, à viser une moyenne de 140 g de CO₂ par kilomètre d'ici 2008 (ACEA 2002). Ceci représente une consommation de carburant de 5,8L/100km, soit environ la moitié du parc automobile nord-américain.

1.4.7 Protocole de Kyoto et implications

La convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques [CCNUCC] lie juridiquement plus de 185 pays dans l'atteinte d'un objectif commun : « stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (Nations Unies 1992). Le protocole de Kyoto représente un amendement à la convention, et fixe un objectif consolidé de réduction des émissions de gaz à effet de serre [GES] d'au moins 5% sous la valeur de 1990 au cours de la période d'engagement de 2008-2012. De plus, chaque pays de l'annexe I du protocole (pays industrialisés membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques [OCDE]) a son propre objectif de réduction chiffré, 6% dans le cas du Canada. Le protocole de Kyoto devient juridiquement contraignant lorsque (*United Nations framework convention on climate change* [UNFCCC] 1997) :

- au minimum 55 pays auront ratifié le protocole;
- parmi ces signataires, les pays visés (annexe I du protocole) doivent totaliser au moins 55% des émissions (année de référence : 1990) de tous les pays de l'annexe I.

En mars 2004, la première condition est remplie avec 120 pays signataires. Par contre, les pays visés à l'annexe I ne représentent que 44,2% des émissions de 1990, certains émetteurs de GES majeurs demeurant en retrait tels que la Fédération de Russie (17,4% des émissions mondiales de GES pour 1990), les États-Unis (36,1% des émissions mondiales de GES pour 1990) ou l'Australie

(UNFCCC 2003a). Ces deux derniers ont fait connaître publiquement leur intention de ne pas ratifier le protocole de Kyoto.

Les six gaz à effet de serre (ou famille de gaz) visés par le protocole sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), les hydrocarbures fluorés (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6).

Des organismes externes viennent faciliter l'application de la Convention, tel que le *Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]*. Le IPCC, regroupant plus de deux mille scientifiques et professionnels de recherche, a pour mandat de fournir de l'information sur les changements climatiques afin d'encadrer les recommandations de la Convention. Produits aux cinq ans, leurs rapports se divisent en trois thèmes : fondements scientifiques (IPCC 2001), impacts et adaptation et mesures d'atténuation. Bien que les conclusions ne fassent pas l'unanimité, le principe de précaution (article 3 de la Convention) demande de ne pas différer l'adoption de mesures visant à prévenir ou atténuer les causes du changement climatique (Nations Unies 1992).

Le survol du contexte législatif permet de saisir l'évolution de la réglementation ainsi que les impacts au niveau des émissions découlant de mesures contraignantes. Il en ressort des lacunes, notamment quant à la réglementation limitant la consommation de carburant, et de ce fait la production de CO_2 . Également, plusieurs polluants potentiellement nocifs demeurent non réglementés. Le second chapitre est consacré à l'analyse du parc de véhicules en service pour la compagnie à l'étude. Les concepts introduits sur la formation des polluants et les technologies de contrôle s'y rattachant sont intégrés et mis en pratique dans une modélisation informatique des émissions du parc de véhicules.

CHAPITRE 2 : QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS

Le chapitre I situait le contexte législatif, les polluants ainsi que les méthodes de mesure des gaz brûlés propres aux émissions des véhicules routiers. Le présent chapitre décrit la démarche suivie dans cette maîtrise afin de quantifier les émissions de polluants atmosphériques de l'entreprise ayant initié le projet. Cette démarche regroupe trois étapes distinctes :

- analyse des banques de donnée de l'entreprise;
- modélisation des taux d'émission du parc de véhicules actuel;
- évaluation des émissions de CO₂ selon la méthode du bilan du carbone.

2.1 Étendue de l'étude

Un bilan environnemental complet des émissions atmosphériques englobe aussi bien les émissions internes (découlant directement de l'exercice de la mission de l'organisme), les émissions connexes (issues d'entreprises sous-traitantes nécessaires pour réaliser cette mission) que les émissions externes (entreprises affiliées, dont les activités sont facultatives à la mission de l'organisme). Une quatrième classe à considérer est celle des émissions indirectes, à savoir les émissions reliées au transport des employés, les émissions issues de l'approvisionnement en biens et services, l'élimination des biens en fin de vie (ex : démolition de bâtiments, collecte et transport des matières résiduelles, sites d'enfouissement), etc. Cette approche, qui tend vers l'analyse du cycle de vie, semble nécessaire pour rendre compte de l'impact global des activités et ainsi éviter la nationalisation des externalités d'une entreprise. Le but ultime étant de fonctionner de manière cohérente avec des principes de pérennisation dans un monde qui, malgré ce qu'il y paraît, offre des ressources limitées et des conditions environnementales déjà perturbées.

La portée de cette étude ne permet pas de couvrir toutes ces facettes. La présente analyse se concentre donc seulement sur une portion des émissions internes, tout en formulant des recommandations ayant une incidence sur les émissions connexes et indirectes. Dans le texte, l'entreprise initiatrice du projet est renommée TIC45 afin de garantir la confidentialité de ses informations.

Les éléments internes susceptibles de contribuer aux émissions atmosphériques découlant des différentes activités de TIC45 se divisent en trois catégories :

- procédés de combustion;
- utilisation de produits chimiques volatils;
- conditionnement de l'air.

La présente étude vise à analyser les émissions atmosphériques résultant des procédés de combustion, plus spécifiquement des véhicules routiers. Seules les émissions durant le séjour des véhicules au sein de l'entreprise sont prises en compte; les émissions résultant de la fabrication (véhicules ou carburant), acquisition, réparation ou mise au rebut ne sont pas comptabilisées. Un ordre de grandeur de ces émissions indirectes est tout de même fourni à la section 2.7.3 : *GES du secteur amont (industrie automobile et pétrolière)*.

Les données de la période 2001-2002 ont été analysées pour le parc de véhicules de l'entreprise. Le bilan de CO₂ a été produit durant les années pour lesquelles l'entreprise a fourni des données de consommation de carburant, soit 1990, 2001 et 2002. L'année 1990 a été investiguée afin d'établir d'éventuelles cibles de réduction de CO₂ cohérentes avec le protocole de Kyoto. La modélisation des taux d'émission (CO, HC, NO_x, SO_x, particules et composés toxiques) du parc de véhicules se limite à deux scénarios, soit au 1^{er} janvier 2002 et au 1^{er} juillet 2002. Ce choix est dicté par le logiciel de modélisation utilisé et par la disponibilité d'informations détaillées décrivant le parc automobile. L'orientation de l'analyse des émissions atmosphériques de TIC45 découle de l'intention initiale derrière le projet, tel que décrit à la section ci-après.

2.2 Cadre de référence

Ce travail est guidé par la volonté de l'entreprise de s'inscrire dans la démarche de réduction des GES prônée par le protocole de Kyoto, mais également par le besoin de produire un bilan environnemental et de maintenir une bonne performance en réponse aux questionnaires commandés par des sociétés de placements verts. Comme la démarche de Kyoto suppose une comparaison des

niveaux d'émissions avec une année de référence (1990), la reconstitution du cheminement de l'entreprise durant cette période est nécessaire afin de comparer des situations équivalentes. Le contexte récent de rationalisation, spécifiquement le cas de l'impartition, pose le problème du report des impacts environnementaux sur une tierce partie. Ainsi, un gain environnemental net pour une entreprise peut n'être en fait qu'un déplacement de la pollution, pour peu que l'activité de la cellule sous-traitante (émissions connexes) soit nécessaire à la poursuite de la mission de l'entreprise mère.

TIC45 ayant considérablement modifié sa structure organisationnelle par le biais de l'impartition au cours de la dernière décennie, une procédure est élaborée ci-dessous pour pallier au problème. Elle se base sur la méthodologie mise en place par le protocole de Kyoto pour l'échange d'unités de réduction des émissions (UNFCCC 2003b). Le protocole de Kyoto prévoit des mécanismes visant à prendre en compte la problématique du déplacement de cellules de production vers des pays peu industrialisés, offrant une main d'œuvre à moindre coût, et dont le respect des normes environnementales cède le pas au besoin pressant de faire des affaires. Afin d'atteindre les réductions visées par le protocole au meilleur coût possible, divers mécanismes sont prévus tel que le *Joint implementation* offrant la possibilité de réaliser des projets réduisant les émissions dans un pays où les coûts d'implantation sont moindres. Jusqu'à 2,5% de ces réductions est alors transférable au total de GES du pays promoteur du projet.

Le but étant de cheminer vers une réduction globale de la pollution, il est proposé d'ajouter aux émissions actuelles de GES de TIC45 les émissions des cellules sous-traitantes dont la mission était remplie en 1990 par des employés alors au sein de la compagnie mère. Cette méthode, intégrant des impacts environnementaux connexes, trouve écho dans les questionnaires visant à évaluer la performance environnementale des entreprises, sujet traité ci-après.

L'évaluation de la performance environnementale des institutions gagne en notoriété depuis quelques années. Diverses approches sont proposées par les firmes faisant la promotion de ces évaluations. Un questionnaire récemment

soumis à TIC45 provenait du *Global Reporting Initiative [GRI]*. Le GRI est un organisme collaborant avec le programme des Nations Unies pour l'environnement [PNUE], dont la mission est de produire et de faire connaître des lignes directrices pour l'estimation de la durabilité des institutions. Divers partenaires financiers permettent au GRI de demeurer indépendant, tels que *Ford*, *GM*, *Coca-Cola*, *Nike*, *British American Tobacco* et autres.

Par le biais des questionnaires du GRI, les institutions peuvent rapporter sur une base volontaire leur performance dans les trois domaines clés du développement durable : environnemental, social et économique. Par la suite, ces informations peuvent aiguiller une démarche d'amélioration continue dans l'entreprise, être utilisées à des fins de comparaison par des firmes d'investissement éthique, ou encore promouvoir une certaine image auprès du public (GRI 2004).

Dans la section « Énergie » du questionnaire du GRI (GRI 2002, p.50-51), les consommations d'énergie indirectes (amont/aval) de l'institution sont demandées à titre d'indicateurs supplémentaires. La section « Émissions, effluents et déchets » demande de rapporter les émissions (de GES) « qui sont la conséquence des activités de l'organisation, mais proviennent de sources détenues ou contrôlées par une autre entité. » Ceci s'accorde avec la démarche retenue pour l'analyse des émissions atmosphériques de TIC45.

Le GRI diffuse le nom des organismes voulant publier la réalisation de leurs rapports de durabilité, en plus de fournir un lien Internet vers ces rapports. Le contenu des rapports n'est pas validé par le GRI et cette publication n'assure pas que l'entreprise a observé les lignes directrices. Le questionnaire du GRI souligne la portée des bilans environnementaux (GRI 2002, p.3) en ces termes :

Le secteur financier intègre lentement mais sûrement les rapports de développement durable à sa palette d'outils d'analyse. Suscités en partie par la demande croissante de fonds éthiques ou socialement responsables parmi les investisseurs, de nouveaux indices « socialement responsables » apparaissent chaque année. Parallèlement, l'étude de la relation entre l'engagement des entreprises en matière de développement durable et la création de valeur pour l'actionnaire (*shareholder value*) progresse. Les liens entre la performance en matière de développement durable et les facteurs clés de création de valeur tels que l'image de marque, la

réputation et l'évaluation des actifs font prendre conscience aux marchés financiers de l'existence de nouveaux outils permettant d'appréhender et de prévoir la création de valeur sur les marchés de capitaux.

Bien que cet extrait n'épuise pas le sens de la démarche, le paradoxe au cœur de l'expression développement durable est soulevé. Le mot développement implique généralement une croissance, le plus souvent matérielle dans nos sociétés, alors que le mot durable renvoie à une notion de permanence, de long terme. Or, la création de valeur ne peut être perpétuée à l'infini dans un monde aux ressources limitées, souvent mal réparties. Il serait dommageable que des concepts visant à la base à rééquilibrer les disparités sociales et prévenir les abus environnementaux et économiques soient récupérés à des fins mercantiles par des privilégiés perpétuant le modèle de dominance économique actuel. L'engagement dans la voie du développement durable demeure un libre choix pour les entreprises, puisque aucune règle comptable n'a été adoptée à ce jour pour tenir compte du social ou de l'environnement de manière systématique.

La section suivante rend compte de la première portion des travaux de maîtrise, soit la construction de bases de données à partir des données primaires de l'entreprise en vue de faciliter les modélisations subséquentes. Les données primaires nécessaires pour répondre aux exigences du GRI et du protocole de Kyoto ont été recueillies et traitées.

2.3 Collecte et analyse des banques de données disponibles

TIC45 dispose de bases de données centralisées regroupant des informations sur l'ensemble des appareils et véhicules gérés par sa division Gestion du parc automobile. Cette division de TIC45 est chargée de l'acquisition, de l'entretien et du suivi de tous les équipements dotés d'un moteur. Comme la division offre également des services de gestion automobile à d'autres entreprises, on a effectué un tri des informations afin de comptabiliser dans le bilan de TIC45 seulement les émissions atmosphériques qui sont la conséquence des activités de l'organisation.

La première base de données, nommée « carburant », est un carrefour des informations sur l'utilisation des véhicules alimentée par les employés de l'entreprise. On y retrouve des données sur la consommation de carburant, le descriptif du véhicule, le dernier relevé du kilométrage, etc. Parallèlement à ces informations, une autre base de données, soit celle nommée « véhicules », donne la description complète de chaque véhicule composant le parc (année de modèle, marque, poids, options ajoutées, etc.). En combinant les différentes informations, une synthèse de la consommation de carburant a été faite en cours de maîtrise. Voici quelques unes des difficultés qui ont rendu difficile cette tâche de pré-traitement :

- dénominations multiples et erronées pour un même carburant;
- kilométrage parcouru consigné sur une base volontaire;
- absence d'information sur le temps de ralenti.

La dénomination multiple pour les carburants impose la mise à jour de tous les champs contenant des expressions fautives, et le remplacement par des termes convenus tels que essence et diesel. Le problème du kilométrage oblige à faire certaines estimations, ce qui peut réduire la fidélité des analyses subséquentes. La seule valeur fiable est la lecture de l'odomètre effectuée lors d'un entretien mécanique. La date de cette lecture étant connue ainsi que l'année de modèle, il est possible d'estimer une moyenne kilométrique annuelle pour chaque classe de véhicule. Néanmoins, cette technique ne permet pas de connaître de manière fiable la consommation (L/100km) particulière des véhicules. Au mieux, elle peut fournir une moyenne globale de consommation pour chaque classe de véhicules du parc en combinant ces résultats avec les volumes de carburant consommé. La marche au ralenti (véhicule stationnaire, mais moteur fonctionnant) vient également fausser ces estimations, en consommant du carburant sans qu'il n'y ait de kilométrage enregistré. De plus, le ralenti vient interférer avec la planification, basée sur le kilométrage parcouru, des entretiens préventifs. Par exemple, la marche au ralenti dégrade l'huile moteur sans qu'il n'y paraisse à l'odomètre. Les estimations de TIC45 suggèrent que la marche au ralenti représente plus du quart du temps total de fonctionnement des véhicules (Mcmillan 2003). La consommation horaire de carburant au ralenti étant évaluée au quart de la

consommation enregistrée sur essais routiers standardisés (Chagnon 1995), L'impact de ce temps de ralenti serait donc une surconsommation de carburant de l'ordre de 6%.

Pour ces raisons, et pour assurer une gestion plus serrée des déplacements, certaines flottes de véhicules sont équipées de systèmes de collecte de données à bord des véhicules. Depuis peu, une partie des véhicules de la flotte de TIC45 sont équipés de tels systèmes afin d'évaluer les possibilités de gestion en découlant. Des données telles que les paramètres surveillés par le système de diagnostic embarqué [OBD] (débit d'air frais à l'admission du moteur, position du papillon, régime du moteur en tours/minute, vitesse du véhicule, etc.) sont ainsi accessibles. Cette collecte d'informations est souvent référencée de manière spatiale à l'aide de la technologie GPS. Du coup, la quantité d'informations disponible est décuplée. La difficulté est de savoir à quelle fréquence relever ces informations et de les traiter de manière sensée afin d'en faire ressortir les tendances propres à éclairer la gestion d'un parc. Par exemple, dans le cas du temps de marche au ralenti pour la conduite en ville, une fraction importante du ralenti est due à l'attente aux feux de circulation ou à la congestion routière. Dix-huit pourcent de la durée du parcours « cycle urbain » utilisé par le *U.S. Department of Energy [DOE]* pour vérifier l'économie de carburant est de la marche au ralenti (*U.S. Department of Energy [DOE]* 2004). Il est donc essentiel de mailler les informations disponibles (géographiques et paramètres véhicule) et d'interpréter leur évolution dans le temps afin de distinguer entre un usage abusif du ralenti et un usage normal.

La section suivante présente le résultat des travaux d'analyse effectués pour caractériser le parc de véhicules de TIC45 en termes d'attributs et de statistiques d'utilisation.

2.4 Caractéristiques des véhicules à l'étude

Une synthèse regroupant des indicateurs liés aux émissions est proposée, afin de créer des sous-groupes significatifs pour éclairer le processus de gestion du parc automobile. La majorité de ces informations servent aussi à fournir les données nécessaires à la modélisation des polluants à l'aide de l'outil informatique MOBILE conçu par l'EPA. Ces analyses ont été réalisées par le traitement des données brutes fournies par l'entreprise.

2.4.1 Distribution des véhicules selon le PNBV

En vue d'évaluer les émissions des véhicules à l'aide d'une simulation informatique, une classification des véhicules est utilisée. Les classes sont basées sur le poids nominal brut du véhicule [PNBV] (carrosserie, conducteur, carburant, options de base, passagers et matériel transporté). Ces classes sont similaires aux catégories définies dans la réglementation TIER0 et TIER1 de l'EPA pour la réglementation des émissions (États-Unis 2003a, p.225). Rappelons que ces réglementations couvrent la période 1987 à 2003, ce qui englobe les années de modèle à l'étude. Comme les seuils d'émissions prescrits par règlement pour les véhicules neufs et en service sont basés sur de telles classes, il est logique de baser la modélisation des polluants sur ces critères. En effet, il est raisonnable de croire qu'un manufacturier cherche à rencontrer la norme, sans pour autant la dépasser. Le traitement de fichiers décrivant les spécifications des véhicules de l'entreprise a été nécessaire afin d'assigner ces classes dans la base de données « carburant ».

Le tableau 2.1 donne la répartition du nombre de véhicules dans chaque classe d'émissions pour TIC45 (émissions internes), ses deux principales entreprises sous-traitantes dénommées A et B (émissions connexes), ainsi que pour ses entreprises affiliées regroupées dans autre (émissions externes). Ces données représentent le nombre de véhicules ayant enregistré au moins un plein de carburant durant les douze mois couverts par la base de données « carburant ». Sauf mention contraire, le poids indiqué entre parenthèses est le PNBV. La mention LVW signifie le poids de véhicule chargé, ALVW est la moyenne du poids à vide et du PNBV. Un tableau synthèse de ces dénominations est présenté à

l'annexe B de ce mémoire. Les données présentées ci-dessous couvrent la période de juillet 2001 à juin 2002 et l'année de référence 1990.

Tableau 2.1 : Répartition des véhicules par classes d'émissions

classe	description (poids en livre)	TIC45		A	B	autre
		1990	2002			
ldgv	véhicule utilitaire léger à essence	660	1391	68	146	158
ldgt1	camionnette essence (0-6000, lvw:0-3750)	548	-	-	-	24
ldgt2	camionnette essence (0-6000, lvw:3751-5750)	4802	2826	1455	366	408
ldgt3	camionnette essence (6001-8500,alvw:0-5750)	1749	1507	1315	58	1097
ldgt4	camionnette essence (6001-8500,alvw:>5751)	-	82	-	-	13
hdgv2b	camion lourd essence (8501-10000)	2883	1511	44	825	402
hdgv3	camion lourd essence (10001-14000)	17	6	-	60	9
hdgv4	camion lourd essence (14001-16000)	103	4	-	-	-
hdgv8a	camion lourd essence (33001-60000)	10	-	-	2	-
hddv2b	camion lourd diesel (8501-10000)	-	-	-	1	11
hddv3	camion lourd diesel (10001-14000)	47	14	-	2	2
hddv4	camion lourd diesel (14001-16000)	122	325	1	222	94
hddv5	camion lourd diesel (16001-19500)	-	5	-	76	10
hddv8a	camion lourd diesel (33001-60000)	398	6	-	209	52
hddv8b	camion lourd diesel (>60000)	-	-	-	4	-
		Total	11339	7677	2883	1971
						2280

Une précision s'impose quant à la description des véhicules. La classe LDGV (véhicule utilitaire léger) englobe les véhicules automobiles conçus pour le transport de passagers, mais exclu les mini-fourgonnettes (LDGT2), les véhicules utilitaires sport (LDGT2-3-4) ou tout autre type de véhicule passager à mi-chemin entre l'automobile et la camionnette.

Les entreprises A et B ont été incluses afin de mieux cerner la composition et l'évolution du parc. Le tableau 2.1 montre que TIC45 possède une flotte principalement composée de fourgonnettes et de camions à essence, et que moins de 5% des véhicules utilisent du diesel. L'entreprise A opère une flotte similaire, alors que la flotte de l'entreprise B comporte une plus grande proportion de camions lourds. Suite à l'impartition des années 1990, une bonne partie des véhicules à consommation de carburant et à pollution plus élevées sont passés de l'entreprise mère aux entreprises connexes A et B.

2.4.2 Distribution des véhicules selon la cylindrée

Cette analyse donne un aperçu de la consommation de carburant selon la cylindrée et la classe de véhicule. Un maillage entre les classes d'émissions et les cylindrées des véhicules permet d'analyser la représentativité des classes basées sur le PNBV. Le tableau 2.2 donne le résultat de cette analyse, soit la fraction de carburant consommée et enregistrée pour chaque cylindrée durant la période de juillet 2001 à juin 2002.

Tableau 2.2 : Répartition des cylindrées par classes d'émissions

classe	cylindrée (litres)								autre	Total
	3,0	3,3	3,9	4,0	4,3	5,2	5,7	7,3 diesel		
ldgv	0,68								0,32	0,123
ldgt2	0,54	0,17	0,04	0,10					0,15	0,273
ldgt3			0,39		0,01		0,48		0,12	0,214
ldgt4				0,25	0,01		0,16		0,58	0,012
hdgv2b					0,01	0,06	0,92		0,01	0,282
hdgv3						0,13	0,87		0,00	0,001
hdgv4								1,00		~0
hddv3								1,00	0,00	0,004
hddv4								0,92	0,08	0,090
hddv5								0,93	0,07	0,001
hddv8a									1,00	0,001
Total	0,23	0,05	0,09	0,02	0,03	0,36	0,03	0,09	0,10	1

Le Total (pondéré par la consommation de carburant) donne la proportion de carburant enregistrée durant l'année pour chaque cylindrée ou chaque classe

d'émissions. Par exemple, 12,3% du carburant a été consommé par les véhicules de la classe LDGV, classe elle-même composée à 68% de moteurs d'une cylindrée de 3,0 litres. De plus, les véhicules munis de moteurs de 3,0 litres totalisent 23% du carburant consommé.

Mis à part les camionnettes de classes LDGT3 et LDGT4, les cylindrées varient peu à l'intérieur d'une même classe d'émissions. Un classement basé sur le PNV permet donc d'englober les variations des cylindrées de manière satisfaisante. Ces recouplements mettent en relief que seulement 9% du carburant utilisé est de type diesel (essentiellement par les véhicules de la classe HDDV4), plus du tiers des cylindrées sont d'un volume de 5,2 litres et les classes composant l'essentiel de la consommation de carburant sont dans l'ordre décroissant HDGV2B, LDGT2 et LDGT3. Comme on le verra un peu plus loin, ces classes présentent une consommation de carburant et des taux de pollution plus élevés que la moyenne des véhicules du parc nord-américain.

2.4.3 Émissions des génératrices embarquées à bord des véhicules

L'analyse détaillée nécessaire pour connaître la répartition des cylindrées a permis indirectement d'évaluer la consommation de génératrices embarquées à bord de certains types de véhicules. Compte tenu que cet équipement est peu réglementé quant à ses émissions atmosphériques, une brève analyse est réalisée dans le cadre de ce travail pour donner un ordre de grandeur des polluants émis et en situer l'importance par rapport aux émissions des véhicules routiers.

Dans la base de données « carburant », des véhicules munis d'un moteur diesel présentent des consommations d'essence. Après vérification, l'essence sert à alimenter des génératrices à bord de ces véhicules. Ces génératrices fournissent une source d'énergie électrique auxiliaire lorsque requis par les travaux. L'analyse a permis de relier la quantité de carburant consommée par les génératrices à la consommation du véhicule. Pour les trois classes concernées (HDDV3, HDDV4 et HDDV5), les génératrices embarquées consomment en moyenne l'équivalent de 11,2% du total de carburant (essence et diesel confondus) enregistré pour le véhicule. Basé sur les données reproduites au *Tableau 2.5 : Consommation de*

carburant, ceci permet d'affirmer qu'environ 221 000 litres d'essence a été utilisé par ces génératrices durant la période de juillet 2001 à juin 2002. La consommation à pleine charge pour ce modèle de génératrice (4,5 kilowatts de puissance) étant de 3 litres d'essence par heure (Onan 1995) on obtient un temps de fonctionnement annuel total d'environ 74 000 heures.

La réglementation concernant les émissions des équipements hors route, comme les génératrices, est accessible dans les textes de lois des États-Unis (États-Unis 2003d). En vertu de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) [LCPE], Environnement Canada a harmonisé sa réglementation avec les normes étasuniennes. En attendant l'entrée en vigueur du *Règlement sur les émissions des petits moteurs hors route à allumage commandé* au Canada en 2005, un protocole d'entente volontaire avec les manufacturiers est en place depuis 2000. Tous les modèles produits aux États-Unis avant 1997 (et exportés au Canada) n'étaient sujets à aucune réglementation quant à leurs émissions. Comme la moyenne d'âge des génératrices de TIC45 est de seize ans (Station expérimentale des procédés pilotes en environnement [STEPPE] 2004), et qu'environ 90% des génératrices datent d'avant 1997, le parc de génératrices est considéré comme ayant des émissions d'équipement non réglementé.

Les coefficients d'émissions de polluants répertoriés dans *NONROAD* ont été utilisés, le logiciel de l'EPA développé pour la modélisation des sources hors-route (EPA 2002). Les coefficients d'émissions pour un équipement non portatif muni d'un moteur de plus de 225 cm³ (soit la Classe II, dont fait partie une génératrice de 4,5 kW) sont indiqués au tableau ci-dessous en grammes par kilowattheure. Le volume de carburant consommé et les polluants émis (tonnes par an) durant la période de juillet 2001 à juin 2002 par les véhicules en question et les 344 génératrices embarquées y apparaissent également. Les taux d'émission pour les camionnettes sont tirés de la section 2.5 : *Évaluation des taux d'émission à l'aide du logiciel MOBILE*. Les totaux de CO et de HC sont soustraits du total de CO₂ afin d'éviter la double comptabilisation de composés carbonés.

Tableau 2.3 : Émissions des génératrices embarquées

	unités	CO	NO _x	HC	PM ₁₀	CO ₂	carburant (litres)
taux d'émission	g/kWh	563	3,8	9,9	0,08	-	-
génératrices	t/an	186	1,2	3,3	0,027	338	220 931
camionnettes (HDDV3-4-5)	t/an	5,3	21,9	1,3	0,056	5 620	1 972 596

Le tableau 2.3 permet de constater que les polluants émis par les génératrices sont élevés. Bien qu'elles ne consomment que 11% de tout le carburant enregistré pour les véhicules dans lesquels elles sont installées, leur production de CO estimée est 35 fois plus importante que celle des camionnettes. Les génératrices rehaussent respectivement de 350% et de 150% la production de HC et de particules [PM₁₀] sur une base annuelle. TIC45 possède au total environ 650 génératrices de ce genre, en plus d'avoir environ 2000 unités de puissance de différentes cylindrées.

Les nouvelles normes d'émissions de moteurs hors-route, dont l'application intégrale est prévue pour 2007, prévoient une diminution de 35% pour le CO, de 12% pour les HC et une augmentation de 30% des NO_x par rapport aux taux d'émission utilisés dans le logiciel NONROAD du tableau ci-dessus. Il faut donc conclure que ces équipements demeureront fortement polluants à moyen terme.

2.4.4 Distribution des véhicules selon l'âge

L'usure d'un véhicule influence sur la détérioration des composantes du système antipollution. De plus, l'âge d'un véhicule doit être connue pour assigner la norme antipollution appropriée en vue de modéliser ses émissions. Un examen de l'âge moyen du parc de TIC45 a donc été complété.

L'âge du véhicule, telle que définie dans la version du logiciel de modélisation utilisée (MOBILE6.2), est l'année de modèle soustraite de l'année de référence pour laquelle s'effectue la simulation. Par exemple, pour une simulation au 1^{er} juillet 2002, un véhicule de l'année de modèle 1998 est considéré avoir quatre ans d'âge. Le tableau ci-après donne la ventilation des véhicules selon leur âge

pour la période de juillet 2001 à juin 2002. Il est à noter que les classes pour cet indicateur sont les mêmes que précédemment, à la différence près qu'il n'y a pas de distinction quant au carburant utilisé. La moyenne d'âge pondérée par le nombre de véhicules est de 3,8 années, ce qui est typique pour un parc de véhicules nord-américain. Sauf mention contraire, le poids indiqué entre parenthèses est le PNBV. La mention LVW signifie le poids de véhicule chargé, ALVW est la moyenne du poids à vide et du PNBV.

Tableau 2.4 : Âge des véhicules

classe	description (poids en livres)	âge (années)	nombre de véhicules
LDV	véhicule utilitaire léger	4,1	1391
LDT2	camionnette (0-6000, LVW:3751-5750)	3,9	2826
LDT3	camionnette (6001-8500, ALVW:0-5750)	3,5	1507
LDT4	camionnette (6001-8500, ALVW:>5751)	1,3	82
HDV2B	camion lourd (8501-10000)	3,7	1511
HDV3	camion lourd (10001-14000)	7,4	20
HDV4	camion lourd (14001-16000)	3,7	329
HDV5	camion lourd (16001-19500)	4,6	5
HDV8A	camion lourd (33001-60000)	3,2	6

L'usure et l'âge du véhicule influencent passablement la détérioration du système antipollution, particulièrement le convertisseur catalytique et la sonde lambda tel que vu précédemment à la section 1.2.4 : *Durabilité du système de contrôle des émissions*. Pour qu'un pot catalytique soit remplacé dans le parc de véhicules québécois de TIC45, il doit y avoir détérioration visuelle ou auditive. Les statistiques de la portion ontarienne du parc soumise aux tests d'émissions du Drive Clean indiquent que le convertisseur catalytique, le système EGR et le bouchon du réservoir de carburant sont les causes les plus fréquentes d'échec (Munslow 2004). L'âge moyen des véhicules de TIC45 ne constituant pas un extrême, les probabilités de dérèglement majeur des systèmes antipollution demeurent assez faibles.

2.4.5 Kilométrage annuel et consommation de carburant

En combinant les données sur l'âge des véhicules dans chaque classe avec la distribution du kilométrage annuel, le programme MOBILE calcule la fraction de parcours attribuée à chaque âge de véhicule. Comme la distribution du kilométrage parcouru par les véhicules de TIC45 diffère des moyennes nationales tant au niveau du type de véhicules que de la distance, une analyse du kilométrage annuel a été réalisée au cours de ce projet pour traduire plus fidèlement la situation.

Tel que présenté précédemment, la seule valeur fiable de kilométrage est la lecture faite lors d'un entretien mécanique. La date de cette lecture étant consignée avec la valeur indiquée à l'odomètre dans la base de données « carburant », il est alors possible d'estimer une distance moyenne kilométrique annuelle pour chaque classe de véhicule. En convertissant la date de lecture et l'année de modèle du véhicule en chiffres, on obtient le nombre de jours qui séparent la lecture de l'odomètre de la date d'achat du véhicule. Les lectures récentes sur des modèles neufs ayant peu ou pas de kilométrage enregistré sont enlevées, et un balayage visuel rapide permet d'éliminer les valeurs incongrues (erreurs de frappe). Une moyenne de quatre lectures d'odomètre par véhicule a été relevée dans la base de données « carburant », ce qui permet de consolider la fiabilité de ces estimations.

L'hypothèse pour le calcul de cet indicateur est que les véhicules sont mis en service le 1^{er} janvier. En réalité, les véhicules sont mis en fonction un peu plus tard dans l'année, soit à partir du mois de mars. Comme la moyenne d'âge des véhicules est de 3,8 années, l'impact de ce décalage est minime sur les résultats.

Ces données permettent de fournir une moyenne globale de kilométrage annuel pour chaque classe de véhicules du parc. Comme seules les données de 2001-2002 ont été traitées, cette moyenne suppose un kilométrage annuel identique pour chaque année depuis la mise en service du véhicule. En combinant ces informations avec les volumes de carburant consommé pour chaque classe, on obtient une consommation de carburant (L/100km) moyenne. Comme les

informations disponibles sur la marche au ralenti sont partielles et ciblées seulement pour certains types de véhicules, aucune correction n'a été faite pour en tenir compte.

Le kilométrage moyen annuel et la consommation de carburant figurent au tableau ci-dessous. La catégorie autre représente le volume de carburant issu du réseau de distribution interne de l'entreprise TIC45. Dans les statistiques de l'entreprise, cette consommation est présentée comme un total non ventilé, que ce soit par type de carburant ou par véhicule. L'hypothèse retenue est que tous les véhicules, sans distinction, utilisent ces infrastructures pour faire le plein de carburant. Cette quantité de carburant a donc été répartie entre les classes suivant une pondération basée sur les consommations de carburant respectives. La consommation moyenne de carburant, exprimée en L/100km, est celle des véhicules de TIC45 pour la période de juillet 2001 à juin 2002.

Tableau 2.5 : Consommation de carburant

classe	kilométrage moyen annuel	consommation annuelle (litres)	consommation de carburant TIC45 (L/100km)	consommation de carburant M6.2 (L/100km)
LDGV	19 700	2 543 454	10,2	9,8
LDGT2	15 790	5 659 342	14,0	12,5
LDGT3	18 700	4 434 429	17,3	16,2
LDGT4	24 880	239 378	19,2	16,4
HDGV2B	16 540	5 845 893	25,8	23,3
HDGV3	7 800	14 519	34,2	26,1
HDGV4	840	1 267	41,7	26,4
HDDV3	27 900	75 270	21,2	20,6
HDDV4	19 350	1 871 835	32,8	23,1
HDDV5	20 620	25 491	27,3	24,0
HDDV8A	5 570	13 860	45,7	35,6
autre		2 120 557		
moyenne pondérée	-	-	19,4	15,4

Les moyennes nationales pour la flotte de véhicules établies utilisées dans le logiciel MOBILE apparaissent au tableau sous le titre M6.2. Ces valeurs, utilisées pour le calcul des émissions de CO₂ dans MOBILE6.2 sont issues de tests en laboratoire en conditions contrôlées. Les résultats de deux tests (cycle urbain et cycle autoroutier) sont combinés avec une pondération de 55% cycle urbain sur le

total. La vitesse moyenne du cycle urbain [UDDS] est de 32 km/h et celle du cycle autoroutier [HWFET] est de 77,7 km/h. La recherche démontre que ces taux pondérés de consommation de carburant [TPCC] sont systématiquement inférieurs à la consommation réelle. Pour cette raison, l'EPA rehausse ces valeurs d'un facteur de 1,2 (Landman 2002), ce qui est le cas pour les valeurs utilisées dans MOBILE. Ceci s'accorde avec les taux utilisés par Environnement Canada [EC] dans son inventaire annuel de GES. Dans ce cas, la majoration appliquée aux TPCC obtenus en laboratoire est de 25% (EC 2003a, p. 43).

Les consommations de carburant pour chaque classe de véhicules de TIC45 sont plus élevées que les moyennes nationales. Ceci s'explique en partie par le fait que les véhicules de TIC45, mise à part la classe LDGV, ont une masse d'équipements embarqués dépassant de beaucoup les standards appliqués durant les tests de consommation de carburant. Également, le bris d'aérodynamisme pour certaines catégories de véhicules causé par l'ajout sur le toit d'équipements influe sur les valeurs. Le manque d'information sur l'utilisation de la marche au ralenti pour TIC45 ne permet pas d'apprécier avec exactitude dans quelle proportion les consommations sont augmentées par ce régime. L'approximation faite à la section 2.3 : *Collecte et analyse des banques de données disponibles* avance une surconsommation de carburant de l'ordre de 6% attribuable à la marche au ralenti.

L'écart marqué entre les moyennes pondérées par la consommation de carburant (de 15,4 à 19,4 L/100km) s'explique en partie par la plus grande utilisation de véhicules à consommation de carburant élevée pour TIC45. La flotte étasunienne utilisée dans MOBILE comporte d'avantage de véhicules passagers, ce qui abaisse la consommation moyenne du parc (Landman 2002, p. 15). Pour l'année 1990, le parc de TIC45 présente une moyenne pondérée de consommation de carburant de 25,5 L/100km pour un parc composé à 42% de mini-fourgonnettes (se référer au Tableau 2.1 : *Répartition des véhicules par classes d'émissions*, classe LDGT2). L'augmentation progressive de la puissance moteur a permis, exceptionnellement, d'améliorer la consommation de carburant depuis ce temps pour cette classe de véhicules. En effet, la plage de puissance correspond mieux depuis quelques

années aux conditions d'utilisation de ces véhicules pour TIC45, ce qui se reflète dans la consommation moyenne totale du parc. Les conditions d'utilisation pour ces véhicules correspondent typiquement à une masse d'équipement embarqué élevée et à un bris d'aérodynamisme important induit par l'ajout d'échelles sur le toit du véhicule.

La moyenne pondérée pour l'année 2002 (19,4 L/100km) ne correspond pas à la consommation de carburant moyenne présentée dans les indicateurs du parc de la compagnie, soit 16,4 L/100km. Cet écart s'explique possiblement par les hypothèses de calcul retenues par TIC45 pour l'évaluation du kilométrage annuel dans ses indicateurs du parc automobile. Les données utilisées sont les lectures d'odomètre consignées sur une base volontaire par les conducteurs des véhicules. Comme cette méthode n'est pas appliquée systématiquement, l'entreprise applique un facteur de majoration aux valeurs rapportées. La section qui suit intègre l'ensemble des caractéristiques des véhicules de l'entreprise en une modélisation de ses émissions atmosphériques.

2.5 Évaluation des taux d'émission à l'aide du logiciel MOBILE

Divers logiciels de modélisation permettent d'évaluer les émissions résultant de la combustion. Pour les véhicules routiers, l'EPA offre le programme informatique MOBILE depuis 1978. Issu d'un développement soutenu, le logiciel estime les HC, le CO et les NO_x. La version MOBILE6.2, disponible depuis janvier 2003, permet en plus d'estimer les particules (échappement, usure des freins et des pneus), le SO₂, le NH₃, six polluants prioritaires et, pour la première fois, le CO₂. Le modèle est gratuit et disponible en ligne sur le site de l'EPA (EPA 2004a) avec la documentation technique nécessaire à son utilisation.

Le calcul des facteurs d'émissions s'appuie sur une série de tests en laboratoire effectués en conditions standards (température, carburant, cycle de conduite, etc.). Selon l'âge du véhicule, un modèle de détérioration des émissions est appliqué, lui aussi basé sur une gamme étendue de mesures en laboratoire. Afin de tenir compte des écarts entre les conditions de laboratoire et celles rencontrées sur route, divers facteurs de correction sont appliqués. Par exemple, l'effet de la

vitesse, les variations de température, les propriétés du carburant, et autres sont modélisés. De plus, la hausse marquée des émissions engendrée par les accélérations brusques et l'utilisation de la climatisation est intégrée dans les calculs. Finalement, les programmes d'inspection/maintenance ainsi que l'évolution des normes d'émissions font partie intégrante du modèle.

Les spécifications utilisées par défaut dans le modèle correspondent à des moyennes nationales étasuniennes. Le processus conduisant à l'établissement de ces moyennes nationales est explicité dans une quarantaine de rapports techniques accessibles au public (EPA 2004b). Les paramètres comme le mois et l'année de la simulation, la température (minimum et maximum) et certaines propriétés des carburants doivent obligatoirement être spécifiés par l'utilisateur. L'Annexe C énumère les valeurs utilisées pour la modélisation du parc de TIC45. Afin de modéliser plus fidèlement un parc de véhicules ainsi qu'une situation géographique ou temporelle, l'utilisateur peut réviser les fichiers contenant les valeurs par défaut pour la répartition des véhicules (années et classes), le kilométrage annuel ou encore le fractionnement essence/diesel. Ces trois séries de paramètres ont été redéfinies pour TIC45 afin de modéliser le parc de véhicules le plus fidèlement possible. Les variables climatiques, comme le nombre d'heures d'ensoleillement, la couverture nuageuse ou l'humidité sont celles par défaut, car on a jugé que les conditions de l'étude étaient similaires à celles de l'EPA. En combinant les différents paramètres spécifiés pour un parc de véhicules, le programme MOBILE calcule les taux d'émission de polluants. Ces taux ou coefficients d'émission sont donnés en grammes de polluant par mille parcouru, pour chaque classe de véhicule. Les résultats des travaux de modélisation réalisés au cours de cette maîtrise pour le parc de véhicules de TIC45 sont relatés ci-dessous.

2.5.1 Polluants communément mesurés (CO, NO_x, HC)

Ces polluants sont les premiers à avoir été identifiés comme devant être réglementés. Il existe donc une documentation plus vaste à leur sujet. Ce sont les trois polluants calculés dans toutes les versions de MOBILE, depuis 1978. Les taux d'émission modélisés, en gramme par kilomètre, sont présentés au tableau 2.6

pour la composition du parc de TIC45 au 1^{er} juillet 2002 et au 1^{er} janvier 2002. Les moyennes sont calculées selon une pondération basée sur le kilométrage parcouru annuellement par classe de véhicule. Les HC sont subdivisés en gaz organiques totaux [TOG] et en composés organiques volatils non méthaniques [COVNM]. Ceci s'inspire des lignes directrices pour les inventaires nationaux de GES du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC] qui demandent de rapporter séparément les COVNM (GIEC 1997, p. 18). Les COVNM sont identiques aux TOG desquels on aurait enlevé le méthane et l'éthane.

Le coefficient d'émission par évaporation des hydrocarbures [EVAP] permet de faire ressortir l'importance de cette contribution durant la saison chaude sur le total des HC. En soustrayant les valeurs de la colonne EVAP de celles de la colonne des TOG, on peut obtenir les taux d'émission d'hydrocarbures imbrûlés à l'échappement. L'Annexe B de ce document fournit quelques précisions au lecteur sur la nomenclature des HC utilisée dans MOBILE.

Tableau 2.6 : Taux d'émission de CO, NO_x et HC

classe	CO (g/km)		NO _x (g/km)		HC (g/km)					
	janv	juil	janv	juil	janvier			evap	cov _{nm}	tog
					evap	cov _{nm}	tog			
LDGV	14,4	9,1	0,6	0,5	0,1	0,6	0,6	0,3	0,60	0,65
LDGT2	21,7	10,1	0,8	0,7	0,2	0,8	0,9	0,4	0,77	0,82
LDGT3	17,5	7,6	0,7	0,6	0,2	0,8	0,9	0,4	0,70	0,75
LDGT4	12,4	6,2	1	0,7	0,2	0,7	0,8	0,3	0,59	0,64
HDGV2B	6,6	5,6	2,8	2,5	0,3	0,6	0,7	0,6	0,77	0,80
HDGV3	6,1	5,2	3	2,6	0,6	0,8	0,9	1,9	2,0	2,0
HDGV4	5,9	5,9	3	2,7	1,5	1,8	1,8	18,2	18,5	18,4
HDDV3	0,2	0,5	3,6	3,4	~0	0,3	0,3	~0	0,19	0,20
HDDV4	0,8	0,8	3,2	3,2	~0	0,2	0,2	~0	0,17	0,18
HDDV5	0,7	0,9	4	3,9	~0	0,2	0,2	~0	0,18	0,19
HDDV8A	0,7	1,4	8	7,7	~0	0,3	0,3	~0	0,27	0,28
moyenne (g/km)	15,3	8	1,3	1,1	0,2	0,7	0,8	0,4	0,7	0,7
Total (t/an)	2052	1073	166	148	25	94	103	49	92	97

Les taux d'émission de CO pour les classes LDGV et LDGT2-3-4 semblent anormalement élevés. Pour la modélisation du parc de TIC45, on a utilisé la

répartition journalière des déplacements prévue par défaut dans MOBILE. Cette répartition prévoit de 6 à 8 démarrages par jour par véhicule, et que 50% du CO calculé provient de ces démarrages. La température froide de janvier prolonge la durée de réchauffage du convertisseur catalytique, ce qui se traduit par des émissions de CO accrues. Par contre, lorsque comparés aux émissions réelles mesurées en bordure de route (section 2.6.2 : *Mesures par télédétection, région de Denver*) ces taux se situent dans la moyenne. On voit également au tableau que l'impact du choix de la méthode de calcul des imbrûlés (COVNM ou TOG) est minime en g/km, mais représente tout de même un écart de 5 à 8% sur le total annuel.

Le résultat d'une extrapolation qui consiste à rabattre les taux d'émission sur le kilométrage annuel apparaît à la dernière ligne du tableau. Ce calcul fournit les quantités totales hypothétiques de polluants émis pour tous les véhicules durant la période de juillet 2001 à juin 2002 si l'on considère 365 journées identiques à celle du 1^{er} juillet ou du 1^{er} janvier. Le logiciel permet seulement de modéliser à l'une de ces deux dates. Les résultats de ces deux scénarios pourraient éventuellement être interpolés pour obtenir une moyenne annuelle plus représentative des conditions, tel que recommandé dans le guide de l'utilisateur MOBILE.

L'excès de combustible (enrichissement du mélange) afin de vaporiser une quantité suffisante de carburant par temps froid engendre typiquement une surproduction de CO et de HC pour les véhicules à essence. Ceci apparaît au tableau, en plus des constatations suivantes:

- l'évaporation des hydrocarbures en été est le double de celle de l'hiver;
- la production de gaz organiques totaux demeure stable;
- l'augmentation marquée de la production de CO en hiver;
- la production de NO_x légèrement plus élevée en hiver.

Pour les véhicules diesel (partie grisée du tableau), l'impact du choix de la saison sur les résultats de la simulation est négligeable. Ces taux d'émission doivent être interprétés en gardant en mémoire les données de kilométrage annuel du

Tableau 2.5 : Consommation de carburant. Ceci explique les taux d'émission anormalement élevés pour les HC en juillet des véhicules HDGV4. La faible distance parcourue durant l'année par les véhicules de cette classe gonfle artificiellement les données en gramme par kilomètre.

La modélisation au 1^{er} janvier produit systématiquement des données nulles pour les véhicules HDDV5 et HDDV8A. Le programme MOBILE utilise les données de kilométrage fournies par l'utilisateur au 1^{er} juillet et en soustrait automatiquement une portion pour le calcul d'un scénario au 1^{er} janvier. Comme les véhicules de ces deux classes enregistrent peu de kilométrage par année pour TIC45 le logiciel en a visiblement déduit une utilisation nulle pour un scénario au 1^{er} janvier. Pour compenser cette aberration, les valeurs de juillet pondérées par la différence moyenne entre les deux scénarios sont présentées comme coefficients d'émissions au scénario 1^{er} janvier du tableau.

2.5.2 Autres polluants atmosphériques : les particules, le SO₂ et le NH₃
 Une panoplie d'autres polluants est émise par l'utilisation d'un véhicule moteur. MOBILE permet spécifiquement de calculer les particules ainsi que deux gaz apparentés : le dioxyde de soufre (SO₂) et l'ammoniac (NH₃). Le regroupement de ces deux gaz avec les particules découle des limitations imposées dans la programmation des versions antérieures du logiciel MOBILE. Comme la législation étasunienne met l'emphase sur la diminution du SMOG, toutes les composantes actives dans sa formation (ex : NO_x, COV, particules, ammoniac, oxydes d'azote et de soufre) sont appelées à être étudiées en détail par les agences chargées de la planification du transport. Elles ont donc été regroupées.

Le résultat d'une modélisation au 1^{er} juillet pour ces polluants est présenté ci-dessous. Les coefficients d'émission de particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm sont fournis pour les particules d'échappement et d'usure des freins et pneumatiques. Les particules sont ventilées selon leur contenu respectif : le contenu carboné des particules des véhicules à essence [gaspm] et la portion sulfatée [SO₄]. Spécifique à l'échappement de moteur diesel, la portion de carbone à l'état organique [ocarbon] est précisée. Les valeurs sont en gramme

par kilomètre, excepté pour le total, en kilogramme par an. Les moyennes sont pondérées selon le kilométrage annuel parcouru par classe de véhicule.

Tableau 2.7 : Taux d'émission de particules, de SO₂ et de NH₃

classe	particules (PM ₁₀) (g/km)					gaz	
	échappement			usure		SO ₂	NH ₃
	gaspm	SO ₄	ocarbon	freins	pneus		
LDGV	0,003	0,002	-	0,008	0,005	0,039	0,063
LDGT2	0,003	0,003	-	0,008	0,005	0,05	0,063
LDGT3	0,003	0,003	-	0,008	0,005	0,065	0,063
LDGT4	0,003	0,003	-	0,008	0,005	0,066	0,063
HDGV2B	0,033	0,007	-	0,008	0,005	0,093	0,028
HDGV3	0,033	0,006	-	0,008	0,007	0,104	0,028
HDGV4	0,034	0,001	-	0,008	0,007	0,108	0,028
HDDV3	-	0,008	0,052	0,008	0,007	0,111	0,017
HDDV4	-	0,009	0,028	0,008	0,007	0,125	0,017
HDDV5	-	0,009	0,028	0,008	0,007	0,129	0,017
HDDV8A	-	0,014	0,06	0,008	0,022	0,193	0,017
moyenne (g/km)	0,008	0,004	0,001	0,008	0,005	0,063	0,054
Total (kg/an)	1087	485	204	1041	684	8466	7271

Basé sur le tableau ci-dessus, les véhicules diesel émettent environ 1,5 fois plus de particules à l'échappement en gramme par kilomètre parcouru. En intégrant l'usure des freins et des pneus, l'écart des taux d'émission de particules entre véhicules diesel et à essence n'est que de 18%.

Bien qu'elles ne soient pas calculées ici, les particules métalliques, émises entre autres par l'attrition des pots catalytiques ou la dégradation des additifs de l'huile moteur, atteignent des seuils détectables en bordure des routes achalandées (Degobert 1992b).

La réglementation sur la teneur en soufre des carburants influence considérablement les taux de SO₂ émis et l'efficacité des systèmes antipollution. Les valeurs moyennes déclarées par les principaux producteurs et importateurs de carburant pour l'année 2002 sont de 246ppm pour l'essence et de 324ppm pour le

diesel (Guthrie, Sabourin 2003). Les coefficients d'émission de dioxyde de soufre diminueront avec l'entrée en vigueur des nouvelles concentrations en soufre dans l'essence (passe de 300ppm à 80ppm en 2005) et le diesel (passe de 500ppm à 15ppm en 2006).

2.5.3 Les composés toxiques

Parmi les autres polluants émis par les véhicules, les composés reconnus comme toxiques par l'EPA calculés dans MOBILE apparaissent au tableau ci-après. Les modes de formation de ces polluants varient. Par exemple, durant la combustion de l'essence, les aromatiques peuvent former du benzène (en plus du benzène naturellement présent dans l'essence) tandis que les oléfines peuvent former du buta-1,3-diène (Guthrie, Sabourin, Brunet 2003). Pour cette raison, la modélisation de ces polluants nécessite de préciser la composition détaillée de l'essence. Les paramètres utilisés pour cette analyse sont reproduits à l'Annexe C. Le résultat de la modélisation au 1^{er} juillet 2002 pour TIC45 est présenté ci-dessous. Les valeurs sont en milligramme par kilomètre, excepté pour le total qui est en kilogramme par an. Les moyennes sont calculées selon le kilométrage annuel parcouru.

Tableau 2.8 : Taux d'émission de composés toxiques (mg/km)

classe	benzène	buta-1,3-diène	formal-déhyde	acétal-déhyde	acryl-aldéhyde	MTBE
LDGV	18,6	2,2	4,7	1,7	0,22	~0
LDGT2	22,3	2,5	5,7	2,1	0,27	~0
LDGT3	19,5	2,2	5,1	1,9	0,24	~0
LDGT4	17,7	2,0	4,6	1,7	0,22	~0
HDGV2B	10,3	0,7	3,5	1,1	0,12	0,05
HDGV3	8,8	0,6	3,0	0,9	0,10	0,04
HDGV4	8,1	1,5	7,2	1,5	0,85	0,06
HDDV3	2,1	1,2	15,7	5,8	0,70	~0
HDDV4	1,8	1,0	13,7	5,0	0,62	~0
HDDV5	2	1,1	14,7	5,4	0,66	~0
HDDV8A	3	1,7	22,1	8,1	0,99	~0
moyenne (mg/km)	17,6	2,0	5,4	1,9	0,24	0,012
Total (kg/an)	2361	263	722	259	32	1

La proportion d'aromatiques et d'oléfines plus élevée dans l'essence se traduit par des coefficients d'émission de benzène et de buta-1,3-diène supérieurs à ceux des véhicules diesel. Les autres composés ont des taux spécifiques d'émission plus élevés dans le cas de moteurs diesel.

L'éther méthyltertiobutylique [MTBE], un additif réputé diminuer les émissions de polluants issus de la combustion, est quasi inexistant dans l'essence au Canada avec le résultat perceptible au tableau. Le MTBE agit également comme anti-détonnant et son usage s'est répandu suite à la législation limitant le plomb dans l'essence. L'essence oxygénée aux États-Unis contient couramment une forte proportion de cet additif. De nombreux cas de contamination des nappes phréatiques par ce composé toxique ont entraîné son interdiction dans plusieurs états. L'oxygénéation du carburant au Canada est peu répandue, et habituellement réalisée par l'ajout à faible dose d'éthanol (moins de 10%).

Le benzène, un cancérogène reconnu pour l'humain, est limité à une concentration de 1% dans l'essence vendue depuis le 1^{er} juillet 1999 au Canada. Cette législation a créé des dispositifs obligeant les producteurs et importateurs de carburant à rapporter sur une base trimestrielle le contenu moyen des carburants sous leur responsabilité (Guthrie, Sabourin, Brunet 2003). Ces relevés ont été utilisés pour spécifier la composition de l'essence au cours de cette simulation.

La section suivante compare les coefficients d'émission modélisés pour TIC45 avec les résultats de deux campagnes de mesures des polluants réalisées sur des véhicules en service, la première en laboratoire et l'autre en conditions routières.

2.6 Comparaison avec la littérature

La littérature consultée traitant de la mesure de polluants pour des véhicules en service se divise en deux grandes classes : les données issues des programmes d'inspection/maintenance gouvernementaux et les données issues de la recherche. Ci-après, les données de TIC45 sont comparées à celles issues du

programme d'inspection des véhicules routiers de la région de la vallée du bas Fraser (Colombie-Britannique). Le parc de TIC45 est ensuite comparé aux données recueillies au cours d'une vaste campagne de mesure des polluants par télédétection dans la région de Denver au Colorado.

2.6.1 Programme AirCare

Les données obtenues pour la Colombie-Britannique donnent les taux d'émission moyens (CO, NO_x et HC) en base massique pour les véhicules à passager testés dans le cadre du programme AirCare (Gourley, Stewart, Wong et Loo 2003). Les mesures sont faites en laboratoire et le cycle utilisé pour la mesure des émissions des véhicules est le IM240. Ce cycle routier, d'une longueur de 3,2 kilomètres dont les vitesses moyenne et de pointe sont respectivement de 47 et de 96 kilomètres par heure, est effectué en laboratoire sur un dynamomètre à rouleau. Chaque année, près de un million de véhicules sont testés dans le cadre du programme AirCare. Bien que le test complet soit d'une durée de 240 secondes, une procédure rapide établie par l'EPA permet à tout véhicule de réussir le test si ses émissions simultanées de CO, HC et NO_x demeurent en tout point sous les taux d'émission spécifiés durant les trente premières secondes consécutives du cycle IM240.

Afin de calculer les réductions massiques de polluants engendrées par l'application du programme, 8000 véhicules sont testés annuellement au AirCare research centre. Issus de toutes les strates d'âge et de types de véhicules, les résultats pour l'année 2002 montrent qu'un véhicule sur dix de l'échantillon a échoué le test IM240. Grossso modo, un véhicule échoue le test si il ne peut rencontrer la norme d'émission pour un ou des polluants mesurés à un moment durant le test. Les résultats des essais pour les automobiles et les camionnettes dont les années de modèle varient entre 1996 et 2000 sont comparés aux taux d'émission modélisés pour TIC45 aux figures ci-dessous. Cette tranche d'âge est similaire à la composition du parc de TIC45.

Les données modélisées à l'aide de MOBILE6.2 pour TIC45 sont retravaillées afin de correspondre aux polluants tels que mesurés dans le programme AirCare.

Ainsi, les pertes par évaporation (EVAP) sont soustraites des gaz organiques totaux (TOG) afin d'avoir seulement les HC à l'échappement. Le scénario comparé est celui de juillet, compte tenu que le test IM240 se déroule en laboratoire à une température d'environ 20°C.

La figure 2.1 compare les taux d'émission massiques pour les véhicules automobiles. Les données pour AirCare sont présentées en deux catégories, soit les coefficients d'émission moyens des véhicules ayant réussi le test et ceux pour les véhicules ayant échoué. Les résultats AirCare ont été obtenus sur le cycle IM240 en 2002, pour un échantillon de 985 automobiles (dont 14 ont échoué le test) en service dans la région de Vancouver. Le seuil d'émission à ne pas dépasser pour réussir le test apparaît à la figure pour chaque polluant mesuré (AirCare 2004).

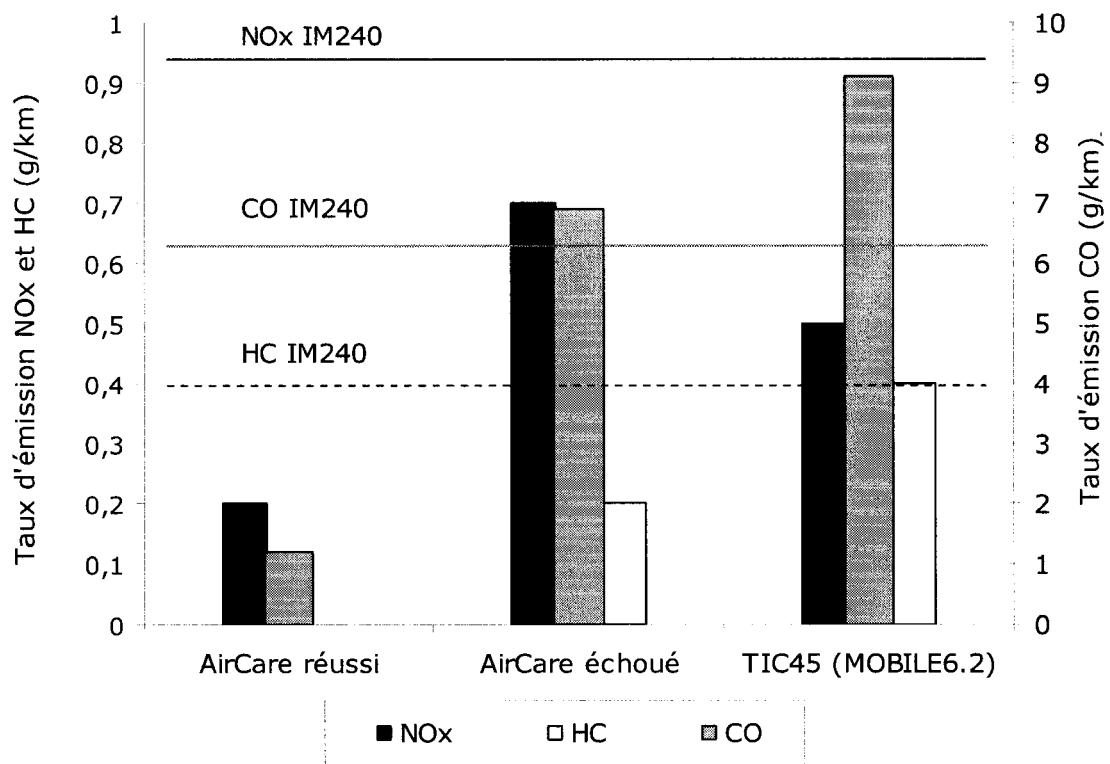


Figure 2.1 : Comparaison des taux d'émission pour les automobiles

La figure 2.1 suggère que la majorité des véhicules automobiles de TIC45 (LDGV) échoueraient le test IM240, principalement à cause du CO et des HC trop élevés.

Les coefficients d'émission produits par MOBILE sont basés en bonne partie sur des tests en laboratoire utilisant la procédure FTP combinés à des facteurs de détérioration. Les taux d'émission en gramme par kilomètre mesurés sur un test FTP sont comparables à ceux d'un test IM240 (Durbin, Norbeck 2002). Par contre, il convient de mentionner que le test IM240 mesure un véhicule à chaud dont le convertisseur catalytique a atteint sa température d'amorçage. L'écart relevé s'explique en partie par la répartition journalière utilisée dans MOBILE, qui prévoit de 6 à 8 démarrages par jour par véhicule.

La figure 2.2 compare les émissions des camionnettes. Le taux d'émission camionnettes pour TIC45 résulte d'une pondération par le volume de carburant pour les trois classes modélisées dans MOBILE, soit LDGT2, LDGT3 et LDGT4.

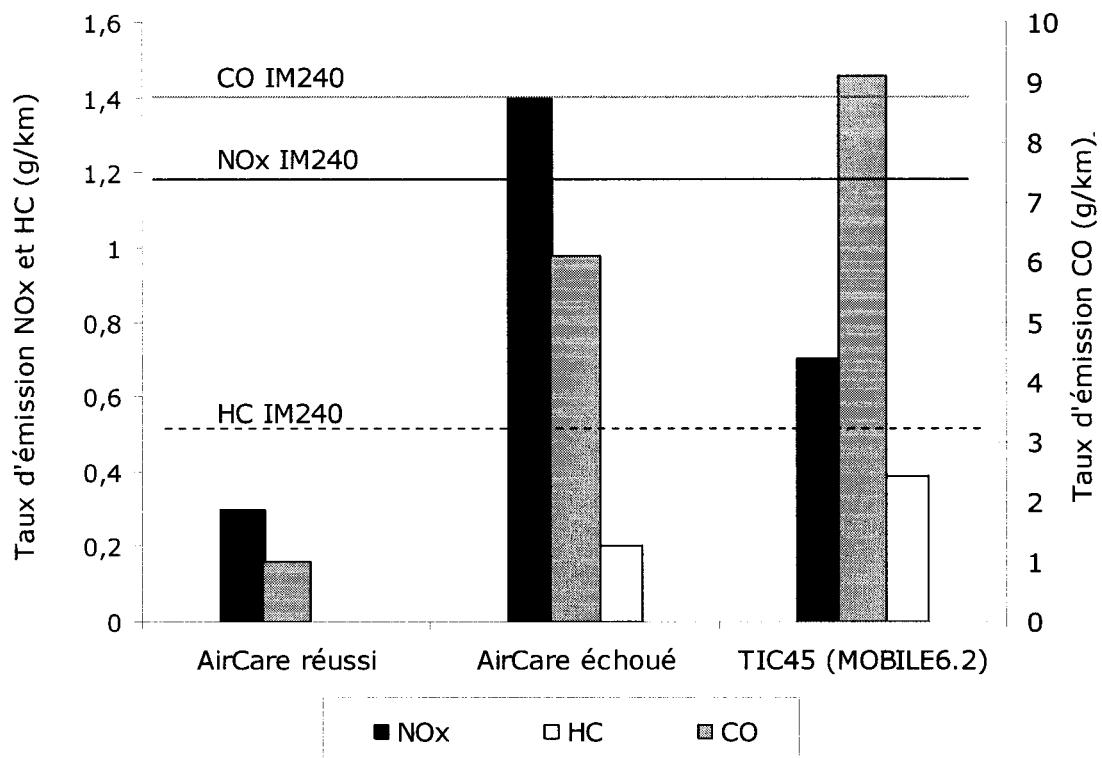


Figure 2.2 : Comparaison des taux d'émission pour les camionnettes

Les résultats présentés pour AirCare ont été effectués en 2002 sur un échantillon de 2314 camionnettes (dont 37 ont échouées le test) en service dans la région de Vancouver. Comme précédemment, les véhicules de TIC45 semblent plus

polluants que la moyenne des véhicules mesurés dans le cadre du programme AirCare. La modélisation suggère des taux de CO trop élevés pour réussir le test IM240.

De 1992 à 2001, le cycle de conduite utilisé dans AirCare était le ASM2525, un test moins sévère sur dynamomètre. La procédure ASM2525 exige un équipement plus limité, mais ne mesure pas le débit volumétrique total de gaz brûlés. Ainsi, les concentrations respectives de polluants ne peuvent être converties sous forme massique (g/km). Le programme ontarien d'inspection/maintenance Drive Clean utilise ce test (Drive Clean 2003a). De par leur situation géographique, la moitié des véhicules du parc de TIC45 font l'objet du test Drive Clean. Depuis 1999, environ 13 000 tests d'émissions ont été effectués sur les véhicules de TIC45 (Munslow 2004). Le taux d'échec se situe à environ 5%, ce qui est inférieur à la moyenne du programme Drive Clean (15% d'échec). Les véhicules légers (moins de 4500kg) sont testés sur un dynamomètre de l'entreprise rencontrant les exigences du Drive Clean, et les véhicules lourds (plus de 4500kg) sont testés dans les installations accessibles au public.

2.6.2 Mesures par télédétection, région de Denver

Parallèlement à la modélisation des émissions à l'aide d'un outil informatique tel que MOBILE, d'autres méthodes ont été proposées pour dresser des inventaires d'émissions. Parmi celles-ci, la mesure sur le terrain des émissions à l'aide d'un équipement de télédétection s'est répandue depuis une dizaine d'années. La méthode consiste à installer une source lumineuse (infrarouge ou ultraviolet) et un capteur situés de part et d'autre du panache de gaz brûlés à mesurer. Une caméra permet de relever l'immatriculation des véhicules échantillonés. En reliant cette information avec les statistiques du bureau des véhicules pour une région donnée, on peut évaluer la couverture d'une campagne d'échantillonnage ou apprécier l'impact d'un programme inspection/maintenance.

La méthode est basée sur la consommation de carburant pour une région donnée (*fuel-based inventories*). Les taux d'émission mesurés en bordure de route sont reliés aux données de consommation de carburant journalières extraites des

relevés de taxes municipaux. Les émissions de tous les véhicules passant sur la route sont mesurées sans distinction, que ce soit au niveau du carburant ou du type de véhicule. Des validations en double aveugle montre une incertitude de l'ordre de 5% dans la mesure par télédétection du CO et de 15% pour les HC (University of Denver 2004).

Les données recueillies durant des campagnes d'échantillonnage dans la région métropolitaine de Denver au Colorado (Stedman, Bishop et Pokharel 2002) sont utilisées pour la comparaison avec les taux d'émission modélisés pour TIC45. L'hypothèse implicite pour la comparaison des données est que la flotte de TIC45 est représentative d'une flotte moyenne circulant sur les routes de la région de Denver. Comme les mesures par télédétection ont été réparties entre les saisons, la moyenne des scénarios janvier et juillet modélisés pour TIC45 est retenue pour la comparaison. Pour les HC, on a utilisé les gaz organiques totaux (TOG) de TIC45 compte tenu que la mesure sur route ne distingue pas entre hydrocarbures évaporés et hydrocarbures à l'échappement. L'analyse par télédétection étant basée sur l'utilisation de carburant, les coefficients d'émissions sont en gramme par kilogramme de carburant consommé. Les taux d'émission de polluants de TIC45 (en gramme par kilomètre) sont convertis en utilisant une densité de 0,75 et 0,86 kilogramme au litre respectivement pour l'essence et le diesel. Les valeurs de kilométrage et de consommation de carburant précédemment établies pour le parc de l'entreprise ont également été utilisées pour cette conversion. Les taux d'émission obtenus représentent la flotte complète de TIC45.

Tableau 2.9 : Étude par télédétection (Denver) et modélisation (TIC45)

étude	année	CO (g/kg carburant)	NO _x	HC
Denver	1996	84	11,6	9,2
	1997	80	8,3	8,2
	1999	69	7,9	6,5
	2000	65	6,5	5,8
	2001	53	6,3	5,3
Denver	moyenne	70	8,1	7,0
TIC45	2002	75	7,8	4,5

La diminution des émissions observée au fil des ans est principalement attribuable aux exigences du programme d'inspection/maintenance en vigueur dans la région de Denver et au renouvellement de la flotte par des véhicules rencontrant des normes d'émissions plus sévères (Stedman, Bishop et Pokharel 2002). Les taux d'émission modélisés pour TIC45 se situent à l'intérieur des taux mesurés dans la région métropolitaine de Denver en conditions réelles. Les valeurs pour le CO et les NO_x de TIC45 sont similaires à celles du parc automobile de Denver tel que mesuré durant l'année 1999. Le taux d'hydrocarbures imbrûlés pour TIC45 est systématiquement plus faible, possiblement à cause de pertes fugitives de carburant plus élevées pour la région de Denver. La moyenne des températures annuelle de la région de Denver (10,3 °C) excède de cinq degrés celle du Canada.

Les auteurs de cette étude ont également comparé les résultats obtenus par télédétection avec une modélisation réalisée sur MOBILE6. Les coefficients d'émission prévus par MOBILE pour le CO et le NO_x se révèlent supérieurs de 50 et 60% respectivement, alors que les HC sont de 40% sous les taux obtenus par télédétection (Stedman, Bishop et Pokharel 2002). Les auteurs attribuent cet écart au fait qu'ils n'ont pas modélisé les émissions relatives au démarrage des véhicules ni les pertes par évaporation. Dans MOBILE6, les pertes par évaporation comptent pour 44% des émissions de HC totales, et les émissions liées au démarrage représentent respectivement 50%, 27% et 32% du CO, des NOx et des HC totaux.

Ceci permet de conclure que les résultats de modélisation sont compatibles avec la littérature consultée. La section suivante traite de la quantification des émissions de gaz à effet serre appliquée à l'ensemble des véhicules routiers de TIC45.

2.7 Évaluation des émissions de CO₂ par le bilan du carbone

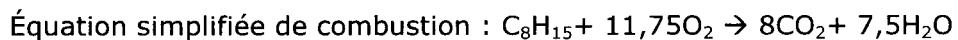
En première évaluation, un bilan du carbone permet de calculer la quantité théorique de CO₂ relâché par la combustion d'une quantité donnée d'un hydrocarbure moyen connu.

Les hypothèses sont :

- la totalité de carbone entrant dans le volume de contrôle en ressort sous forme gaz et se transforme éventuellement en CO₂;
- le volume de contrôle est défini à l'extérieur de la chambre de combustion, de sorte qu'à l'entrée on retrouve l'air frais et l'hydrocarbure, et à la sortie (après le pot catalytique) les gaz brûlés;
- la combustion est stoechiométrique ou pauvre.

Soit une essence de composition moyenne :

- C_nH_{1,87n} avec n=8
- densité relative = 0,75 kg/l
- composition moyenne : C₈H₁₅



Ce qui donne 2,39 kg CO₂/litre d'essence.

Soit un carburant diesel de composition moyenne :

- C_nH_{1,8n} avec n=12
- densité relative = 0,86 kg/l
- composition moyenne : C₁₂H_{21,6}



Ce qui donne 2,74 kg CO₂/litre de diesel.

Ces valeurs sont similaires aux facteurs utilisés par Environnement Canada dans l'inventaire canadien des gaz à effet de serre (EC 2003a). Le tableau ci-après présente la production de CO₂ annuelle basée sur la consommation en carburant pour chaque classe de véhicule, pour les années 1990 (décembre 1989 à décembre 1990), 2001 (juillet 2000 à juin 2001) et 2002 (juillet 2001 à juin 2002). Les coefficients d'émission de CO₂ utilisés sont ceux du bilan de carbone ci-dessus, en fonction du type de carburant. L'hypothèse est que tous les composés carbonés se retrouvent ultimement sous forme de CO₂. Pour l'entreprise, le CO représente moins de 4% du CO₂ total, et celui-ci est transformé dans l'atmosphère à plus ou moins long terme en CO₂. Les HC pour leur part représentent moins de 0,2% du CO₂ total émis pour l'année. Le carburant issu du

réseau de distribution interne de l'entreprise TIC45 a été partagé proportionnellement entre les classes selon les volumes de carburant consommés. La catégorie hors-route regroupe divers types de sources tels des génératrices fixes, des motoneiges et des tracteurs.

Tableau 2.10 : Production de CO₂ par classes de véhicules, 1990-2002

classe	(g/km)	TIC45		A	B	ext.
				(tonnes de CO ₂)		
LDGV	245	6 701	246	628	730	
LDGT1	-	-	-	-	139	
LDGT2	334	14 910	9 098	2 123	2 987	
LDGT3	415	11 683	11 475	515	10 825	
LDGT4	460	631	-	-	74	
HDGV2B	616	15 401	253	6 512	4 911	
HDGV3	817	38	-	448	385	
HDGV4	996	3	-	-	-	
HDGV8A	-	-	-	10	-	
HDDV2B	-	-	-	1	213	
HDDV3	582	227	-	2	21	
HDDV4	899	5 654	7	3 118	1 954	
HDDV5	747	77	-	1 168	6	
HDDV8A	1 252	42	-	3 652	1 215	
HDDV8B	-	-	-	107	-	
hors-route		41	3	9	5	
Totaux 2002	464	55 408	21 082	18 292	23 464	
Totaux 2001	-	55 238	27 560	19 113	35 466	
1990	611		107 260			

Conformément à ce qui a été introduit en début de chapitre, la comparaison de l'année 2002 avec l'année de référence 1990 nécessite de comparer des états de parc de véhicules similaires. Ainsi, les émissions des entreprises A et B sont ajoutées à celles de TIC45 pour les années 2001 et 2002. Pour l'année 2001, le total de ces émissions (101 910 tonnes de CO₂) est de 5% inférieur aux niveaux de 1990. Pour 2002, le total (94 780 tonnes de CO₂) est de 11% inférieur aux niveaux de 1990. TIC45 est donc en bonne voie d'atteindre les réductions proposées par Kyoto qui sont de 6%. L'écart entre les années 2001 et 2002 s'explique par la diminution du volume d'activités de l'entreprise A, qui s'est traduit en une diminution de 6500 tonnes de CO₂. Une bonne partie de la réduction de CO₂ enregistrée entre 1990 et 2001 est attribuable à la diminution

de la consommation de carburant des mini-fourgonnettes, tel que décrit à la section 2.4.5 *Kilométrage annuel et consommation de carburant*.

Il est à retenir du tableau 2.10 que les émissions atmosphériques de l'entreprise varient de manière significative d'une année à l'autre. Dans ce contexte, il serait bon que TIC45 se dote d'un indicateur d'évaluation de ses émissions tenant compte de la variation de son activité économique. Un ratio du genre émissions atmosphériques/chiffre d'affaires pourrait être envisagé afin de capturer ces variations.

Les émissions moyennes de CO₂ en gramme par kilomètre sont basées sur le *Tableau 2.5 : Consommation de carburant* et utilisent comme hypothèse que le kilométrage parcouru par chaque véhicule d'une même classe est identique. Ces taux d'émission de CO₂ permettent de voir que ce taux a diminué depuis 1990, ce qui est conséquent avec les observations faites auparavant sur l'évolution du parc. La version 6.2 du logiciel MOBILE calcule le taux d'émission de CO₂ en se basant sur les moyennes nationales de consommation de carburant. Les valeurs calculées par MOBILE pour TIC45 sont légèrement inférieures à celles du *Tableau 2.10*, pour les raisons expliquées à la section 2.4.5 : *Kilométrage annuel et consommation de carburant*.

Ces coefficients d'émission, typiques d'un parc de véhicules nord-américain, sont de beaucoup supérieurs aux moyennes européennes. Les constructeurs européens, japonais et coréens ont signé en 1998 un accord avec la Commission européenne sur la réduction volontaire des émissions de CO₂ de leurs véhicules passagers, avec un objectif d'émission moyenne pondérée par les ventes de 140 grammes par kilomètre (basé sur le cycle d'homologation MVEG) en 2008. Pour l'année 2001, les véhicules passagers représentent 86% de toutes les ventes de véhicules neufs en Europe de l'Ouest. Toujours pour 2001, les 12,5 millions de véhicules passagers livrés par les constructeurs membres de l'Association des constructeurs européens d'automobiles [ACEA] affichent une émission moyenne de CO₂ pondérée par les ventes de 164 g/km (ACEA 2002). Le quart de ces véhicules sont déjà sous la barre du 140 g/km. Ces facteurs d'émission de CO₂

sont plus de 33% en dessous du taux d'émission pour les véhicules automobiles (LDGV) de TIC45. Dans l'ACEA, on retrouve les trois manufacturiers nord-américains, on peut donc supposer que la possibilité d'obtenir des véhicules similaires ici est une question de marché et non de faisabilité technique.

2.7.1 GES provenant de la combustion autres que le CO₂

Il est à noter que le total de GES proposé ci-dessus n'inclut pas la contribution des GES autres que le CO₂ provenant de la combustion, notamment l'oxyde nitreux (N₂O) et le méthane (CH₄).

Les coefficients d'émission pour ces GES varient selon :

- le type de combustible;
- les conditions d'exploitation;
- l'état du matériel et le niveau d'avancement des technologies.

Selon Environnement Canada (EC 2003a, p. 172), une petite proportion du combustible reste inoxydée sous forme de méthane lors de la combustion d'hydrocarbures. De plus, une partie de l'azote contenu dans l'air est convertie en oxyde nitreux (N₂O). La production de N₂O dépend de la température qui règne à l'intérieur de la chambre de combustion ainsi que des techniques antipollution utilisées.

Comme la production du N₂O dépend du niveau d'avancement de la technologie antipollution (EC 2003a, p. 40), une analyse a été faite pour caractériser ce niveau dans le parc de TIC45. On retrouve deux types de technologies antipollution pour les véhicules de TIC45 :

- niveau 1 : convertisseur catalytique perfectionné à 3 voies;
- niveau 0 : convertisseur catalytique primitif à 3 voies (usagé).

Connaissant le nombre de véhicules pour chaque année de modèle, des taux d'émission composites en gramme par litre de carburant ont été calculés et reportés au *Tableau 2.11 : Émissions de GES par gaz pour l'an 2002*. Ces taux reprennent les coefficients d'émission pour le N₂O et le CH₄ de l'inventaire canadien des GES 1990-2001 (EC 2003a). Le détail de la répartition des

technologies antipollution pour TIC45 et des coefficients d'émission est présenté à l'Annexe C de ce mémoire.

2.7.2 Impact énergétique et environnemental de la climatisation automobile

Les inventaires de GES, commandés par la mise en place de la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques [CCNUCC] (Nations Unies 1992), demandent également de rapporter les hydrocarbures fluorés [HFC], des gaz à haut potentiel de réchauffement planétaire. Le HFC R134a est un fluide frigorigène utilisé pour la climatisation automobile. Présent dans seulement un véhicule sur quatre en 1995, la climatisation équipe maintenant plus des trois quarts des véhicules vendus. Depuis 1995, en vertu du Protocole de Montréal relatif à des substances appauvrissant la couche d'ozone (1987), le HFC-134a est utilisé en remplacement du CFC-12, banni en raison de son action destructrice sur la couche d'ozone stratosphérique. L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie [ADEME] relate les faits suivants dans une étude récente sur l'impact énergétique et environnemental de la climatisation automobile (ADEME 2003):

- surconsommation de carburant de l'ordre de 30% en cycle urbain et de 15% en cycle extra urbain pour les véhicules à essence;
- surémission de polluants pour le cycle urbain (17% pour le CO et 74% pour les NO_x) et le cycle autoroutier (75% pour le CO et 51% pour les NO_x);
- pertes annuelles de fluide frigorigène de l'ordre de 93 grammes par année par véhicule.

De son côté, Ressources naturelles Canada [RNCAN] énonce une surconsommation de carburant liée à l'utilisation de la climatisation de l'ordre de 20% (RNCAN 2003, p. 61). Pour TIC45, l'effet de la surconsommation est implicitement intégré dans le volume de carburant rapporté dans la base de données « carburant » et la surémission de polluant est incluse dans la modélisation avec MOBILE. En effet, depuis la version MOBILE6, les résultats de tests en laboratoire issus du *Supplemental federal test procedure [SFTP]* sont intégrés à la modélisation. Ce test cible deux situations de conduite à fortes émissions, soit la conduite agressive et l'utilisation de la climatisation.

Pour évaluer la surémission due à la climatisation pour TIC45, une perte annuelle (émissions fugitives, masse perdue lors des maintenances, et charge émise à la fin de vie du véhicule) de 93 g/an est appliquée à chaque véhicule doté de la climatisation. Pour le parc de véhicules de TIC45, l'hypothèse posée est que tous les véhicules neufs acquis depuis l'année 2000 sont équipés de la climatisation (Chagnon 2003). Exception faite des véhicules automobiles (LDGV) dont l'année a été fixée à 1998. Basé sur cette hypothèse, la valeur moyenne obtenue est que 40% des véhicules détenus en 2002 sont munis de la climatisation, cette valeur variant à l'intérieur de chaque classe. Le détail de la répartition des coefficients d'émission est présenté à l'Annexe C. Connaissant le nombre de véhicules pour chaque année de modèle, les pertes annuelles totales des systèmes de climatisation sont calculées et intégrées dans le tableau 2.11.

La colonne CO₂ reprend les émissions de CO₂ résultant de la combustion du carburant. Les potentiels de réchauffement planétaire [PRP] utilisés pour le calcul en équivalents CO₂ apparaissent au tableau. Ces PRP proviennent de l'inventaire canadien des GES 1990-2001 d'Environnement Canada (EC 2003a). Dans les inventaires de GES, les gaz autres que le CO₂ sont ajustés selon leur PRP respectif afin d'obtenir des unités d'équivalence en CO₂. Le PRP est une mesure relative de l'effet de réchauffement occasionné par un gaz dans la troposphère. Par exemple, le PRP du HFC-134a est de 1300 basé sur un horizon de 100 ans, le CO₂ ayant un PRP de 1.

Tableau 2.11 : Émissions de GES par gaz pour l'an 2002

	CH ₄	N ₂ O	HFC R134a	CO ₂ (TIC45)	Total
PRP	21	310	1300	1	-
classe	(tonnes éq. CO ₂)				
LDGV	15	238	99	6 701	7 053
LDGT2	30	982	120	14 910	16 041
LDGT3	21	674	69	11 683	12 446
LDGT4	1	34	8	631	673
HDGV2B	25	1 724	64	15 401	17 214
HDGV3	-	-	-	38	39
HDGV4	-	-	-	3	3
HDDV3	-	2	-	227	230
HDDV4	5	51	13	5 654	5 723
HDDV5	-	1	-	77	78
HDDV8A	-	-	-	42	42
hors-route	N/D	N/D	-	41	41
Total	97	3 706	373	55 408	59 584

À l'aide de ce tableau, l'impact des autres GES sur les émissions totales attribuables aux véhicules routiers peut être évaluée. En intégrant les autres émissions de GES pour les véhicules (N₂O, CH₄ et HFC), une moyenne pondérée par la consommation de carburant de 500 grammes de CO₂ par kilomètre est obtenue au lieu de 464 g/km. Ceci correspond à une surémission de 8% pour l'ensemble des classes de véhicules de l'entreprise. La contribution du N₂O est notable dans ce résultat, et est largement due aux véhicules de la classe HDGV2B. Le taux d'émission de N₂O attribué à cette classe est effectivement le plus élevé dans l'inventaire de GES canadien. Il est également à retenir que l'impact de la climatisation sur les GES est influencé d'abord par la surconsommation de carburant, et dans une moindre mesure par les pertes de fluide frigorigène.

Les émissions de GES du parc de véhicules de TIC45 pour l'année 2002 se comparent à celles issues de 10 000 maisons unifamiliales canadiennes, incluant le chauffage et l'électricité (RNCan 2004).

2.7.3 GES du secteur amont (industrie automobile et pétrolière)

Ces impacts, dont font partie les émissions indirectes (émissions issues du transport et de la production des biens et services requis par TIC45) sont brièvement introduits dans cette section. Une approche cycle de vie est préconisée pour aborder ce thème.

Les analyses de cycle de vie appliquées à la production pétrolière et à la fabrication automobile sont bien documentées. Parmi ces études, citons celle de Edgar Furuholt traitant de l'analyse du cycle de vie de l'essence et du diesel (Furuholt 1995). Selon cette étude, les émissions atmosphériques associées aux activités du secteur amont de l'industrie du pétrole sont de l'ordre de 5 à 15% des émissions résultant de la combustion des carburants (diesel ou essence) par une automobile moderne pourvu des systèmes antipollution en vigueur.

Une étude récente sur l'analyse du cycle de vie d'une automobile intermédiaire (année de modèle 1995) suggère que 14% de l'énergie totale et 13% du CO₂ proviennent des phases de production (matériaux et automobile), d'entretien et de fin de vie utile (Kim, Keolian, Grande et Bean 2003). Ces phases totaliseraient de 5 à 10% des émissions de polluants réglementés (CO, HC, NO_x). L'étude propose une durée de vie utile optimale pour un véhicule, basée sur la minimisation de l'énergie consommée, du CO₂ et des polluants émis sur le cycle de vie entier. Il en ressort que la durée de vie optimale des véhicules augmente avec le resserrement des normes d'émissions. Par exemple, la durée de vie minimisant les polluants réglementés pour un modèle de 1990 varie de 3 à 6 années, et de 7 à 14 années pour un modèle postérieur à l'an 2000. Par contre, le scénario minimisant la production de CO₂ pour tout véhicule est de 18 années, basé sur une distance annuelle de 20 000km. Les auteurs ont identifiés que la durée de vie optimale minimisant les émissions atmosphériques est inversement corrélée à la distance annuelle parcourue.

La prochaine section vise à situer les émissions atmosphériques dans un contexte plus élargi, en présentant les données de GES et de polluants issus du transport routier au niveau canadien.

2.8 Inventaire canadien des émissions atmosphériques

Nous abordons ici la contribution canadienne en terme d'émissions atmosphériques. Dans un premier temps, les GES émis par le Canada sont rapportés, en s'inspirant de l'inventaire canadien des gaz à effet de serre. Le bilan annuel des principaux polluants atmosphériques permet ensuite d'obtenir un ordre de grandeur des émissions pour certains polluants répertoriés par Environnement Canada.

2.8.1 Gaz à effet de serre attribuables au transport

En vertu des directives de la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques [CCNUCC], tous les pays figurant à l'annexe I de la CCNUCC (tel que le Canada) sont tenus de publier annuellement un inventaire de GES.

La combustion de matières fossiles pour le transport des biens et des personnes est une source importante de GES au Canada. Le *Tableau 2.12*, adapté de l'inventaire canadien des gaz à effet de serre 1990-2001 (EC 2003a), résume l'apport du transport routier. Les potentiels de réchauffement planétaire [PRP] utilisés pour le calcul en équivalents CO₂ apparaissent au tableau. Les classes établies dans MOBILE sont mises en relation avec les catégories utilisées par Environnement Canada. Tous les véhicules sont à essence, sauf mention contraire.

Tableau 2.12 : GES et transport routier au Canada pour l'an 2001

classe	descriptif	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	total	
		PRP	21	310	1	2001
(kilotonnes éq. CO ₂)						
LDGV	automobile	96	2 250	46 390	48 700	53 700
LDGTx	camion léger	101	2 931	36 390	39 400	21 800
HDGTx	véhicule lourd	12	181	3 930	4 130	3 140
HDDVx	véhicule lourd diesel	39	347	38 220	38 600	24 500
	sous-total	248	5 709	124 930	130 830	103 140
Toutes les sources	transport routier	288	5 744	127 487	134 000	107 000
	total	93 456	51 388	566 182	670 000	626 000
	routier/total (%)	0,3	11,2	22,5	20	17

Le total de la catégorie toutes les sources exclut la contribution des sources à ciel ouvert. Les sources à ciel ouvert englobent entre autre l'évolution du patrimoine forestier, l'agriculture et les sites d'enfouissement. Il est à noter que les émissions d'hydrocarbures fluorés [HFC] issus de la climatisation des véhicules ne sont pas comptabilisés spécifiquement dans l'inventaire canadien pour les sources mobiles.

Pour l'année 2001 au Canada, ce tableau indique que le transport routier représente 20% du total des GES, soit 134 000 kilotonnes d'équivalents CO₂. Au total, incluant les sources à ciel ouvert, les émissions canadiennes de GES ont cru de 18,5% depuis 1990, le tiers de cet accroissement étant attribuable aux véhicules. L'augmentation notable des émissions des camions légers à essence (mini-fourgonnettes et véhicules utilitaire sport [VUS]) ont plus que neutralisé la baisse enregistrée par les automobiles à essence (EC 2003a).

Pour le Québec, le sous-total des quatre groupes de véhicules définis ci-dessus s'élève à 27 400 kilotonnes équivalents CO₂. Ceci représente 30,5% du total des GES québécois pour l'année 2001. Cette proportion élevée s'explique par le recours massif à l'hydroélectricité au Québec, comparativement au reste du

Canada qui utilise plutôt des sources thermiques pour la production d'électricité et de chaleur.

2.8.2 Principaux contaminants atmosphériques reliés au transport

Les principaux polluants atmosphériques [PCA] est une série de composés définie par Environnement Canada, dont les émissions ont une incidence sur la santé et contribuent à des problèmes de pollution de l'air. Mis à part les oxydes de soufre (SO_x), tous ces polluants sont contrôlés par des normes d'émissions pour les véhicules à moteur. La surveillance des PCA est assurée par diverses instances comme Environnement Canada, la Ville de Montréal et le ministère de l'Environnement du Québec.

Le tableau qui suit est adapté du Sommaire des émissions des principaux polluants atmosphériques au Canada pour 1995 (EC 2003b). La catégorie usure représente les particules de moins de 10 μm de diamètre émises par la détérioration des pneus et des freins. Comme précédemment, le total de la catégorie toutes les sources exclut la contribution des sources à ciel ouvert.

Tableau 2.13 : Principaux polluants liés au transport au Canada pour l'an 1995

classe	descriptif	PM ₁₀	SO _x (kilotonnes métriques)	NO _x	COV	CO
LDGV	automobile	4,7	11	273	356	3 559
LDGTx	camion léger	2,5	4,4	112	142	1 462
HDGTx	véhicule lourd	0,5	0,6	15	12	165
HDDVx	véhicule lourd diesel	32	33	378	49	224
	usure	4	-	-	-	-
	sous-total	44	49	779	559	5 410
Toutes les sources	transport routier	46	51	787	562	5 416
	total	578	2 653	2 247	2 638	10 024
	routier/total (%)	8	2	35	21	54

Les données postérieures à 1995 ne sont pas disponibles dans la base de données d'Environnement Canada. Les données pour le transport routier sont issues d'une modélisation à l'aide du logiciel MOBILE (version 5C) de l'EPA. Il est à retenir de ce sommaire que le transport routier contribue largement aux émissions de

monoxyde de carbone (54%), d'oxydes d'azote (35%) et de composés organiques volatils (21%) au Canada.

La dernière section de ce chapitre traite des changements observés ces 25 dernières années dans les caractéristiques du parc automobile nord-américain. Ces tendances sont éclairées par la mise en contexte de l'évolution de quelques paramètres choisis, afin de mieux comprendre le justificatif derrière l'offre de véhicules des manufacturiers.

2.9 Évolution des caractéristiques du parc automobile nord-américain

L'évolution de la composition du parc de TIC45 n'échappe pas aux tendances ressenties ailleurs dans la société. L'offre de véhicules par les manufacturiers a considérablement changé depuis les 25 dernières années. Des programmes de limitation de la consommation de carburant (ex : *Corporate average fuel efficiency [CAFE]* aux États-Unis et accord européen sur la réduction de CO₂) permettent d'orienter les gains technologiques vers une utilisation optimisée des ressources.

Votée suite à la crise énergétique de 1973 et effective à compter de l'année de modèle 1978, la norme CAFE a permis une diminution notable de la consommation de carburant durant les premières années de son application. Malheureusement, cette norme n'a pas été resserrée depuis 1982. Le résultat de cette décision est flagrant : les progrès technologiques enregistrés depuis ont principalement servi à augmenter la puissance, l'accélération et le poids des véhicules pour une même consommation plutôt que de simplement réduire cette consommation.

Le régime minceur de la période initiale de l'application de la norme CAFE est révolu, et l'offre de véhicule par les manufacturiers nord-américains ne cesse de renchérir au niveau de la puissance et des multiples options qui deviennent peu à peu banalisées. La pénétration fulgurante de la climatisation et des multiples gadgets automatisés est accompagnée d'une augmentation de l'offre de véhicules toujours plus gros, sous prétexte de sécurité. Sécurité du conducteur et non des autres usagers de la route, car le rapport de masse actuel entre le véhicule utilitaire sport type et une voiture sous compacte est de trois.

Les figures ci-dessous retracent l'évolution de quelques caractéristiques illustrant ce propos. Les données sont adaptées du rapport annuel sur les tendances en matière de technologie et de consommation de carburant pour les véhicules passagers des États-Unis (Hellman, Heavenrich 2003).

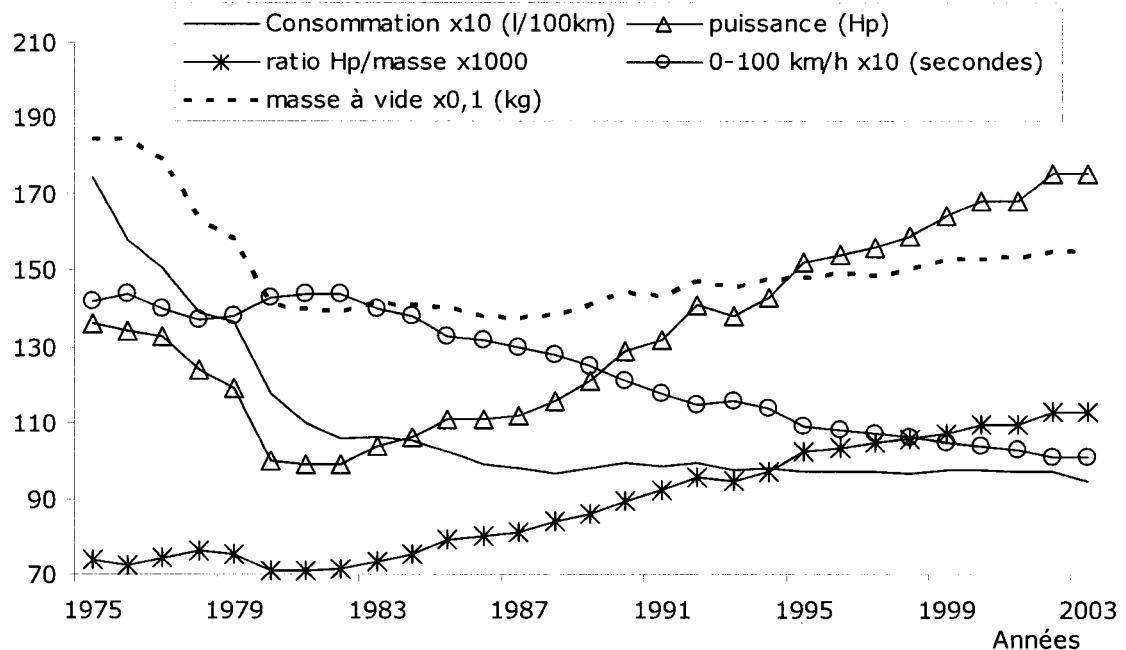


Figure 2.3 : Caractéristiques des automobiles, période 1975-2003

La figure 2.3 montre pour l'année 2003 une progression par rapport aux niveaux de 1982 de 12% de la masse à vide des automobiles, une augmentation de la puissance de 77%, une majoration du ratio puissance/masse de 58% ainsi qu'une augmentation de la vitesse maximale de 24% (non représentée sur la figure). La seule diminution enregistrée est le temps pour passer de zéro à 100km/h qui s'est amélioré de 30%. De 1982 à 1988, les taux pondérés de consommation de carburant [TPCC] n'ont diminué que de 8%, et y sont demeurés depuis. La figure suivante traite des mêmes caractéristiques pour les camionnettes.

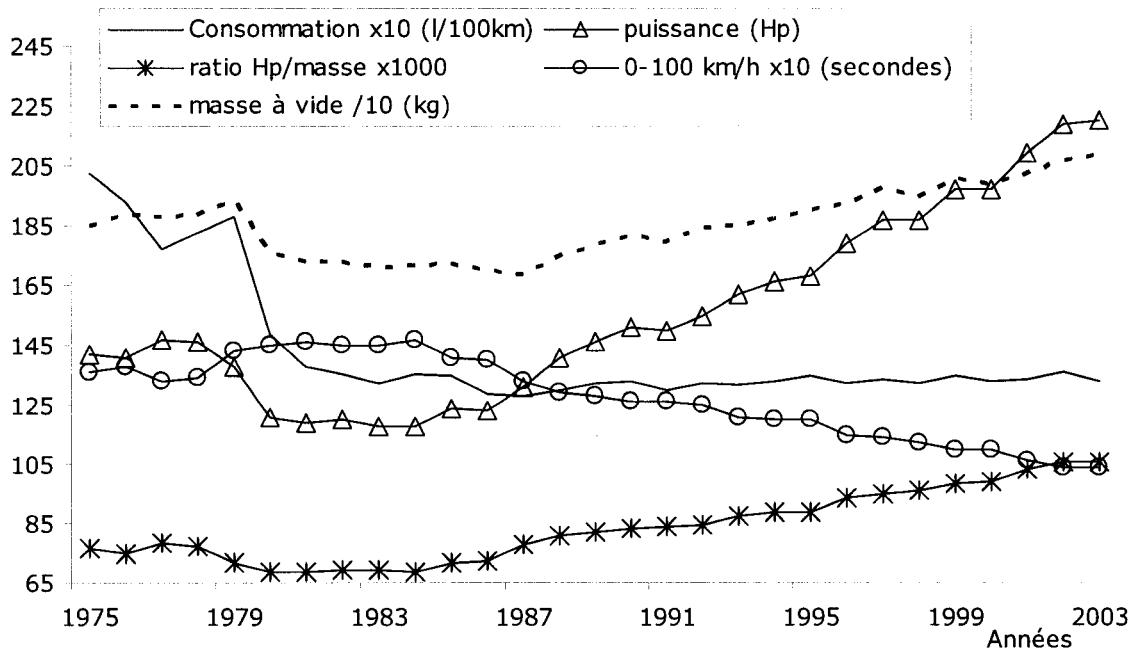


Figure 2.4 : Caractéristiques des camionnettes, période 1975-2003

La figure 2.4 montre pour l'année 2003 une progression par rapport aux niveaux de 1982 de 21% de la masse à vide des camionnettes, une augmentation de la puissance de 83%, une majoration du ratio puissance/masse de 52% ainsi qu'une augmentation de la vitesse maximale de 22% (non représentée sur la figure). Encore une fois, la seule diminution enregistrée est le temps pour passer de zéro à 100 km/h qui s'est amélioré de 28%. Les taux pondérés de consommation de carburant actuels sont exactement au même niveau que pour l'année 1982.

Il est à retenir de ces deux analyses que parallèlement à l'augmentation généralisée de la puissance et de la performance des véhicules, la stagnation de la consommation de carburant est généralisée et semble une tendance durable en Amérique du Nord. Pendant ce temps, la communauté européenne propose d'établir une taxation (achat et immatriculation) proportionnelle aux émissions de GES du véhicule et investit massivement dans les transports en commun. À moins d'une intervention musclée de la part des législateurs, le panorama routier nord-américain ressemblera d'avantage à un long convoi militaire, qu'aux modes de transport futuristes imaginées au siècle dernier.

La dernière figure montre l'évolution des parts de marché pour les trois types de camions à passagers: véhicule utilitaire sport [VUS], mini-fourgonnettes et camionnette.

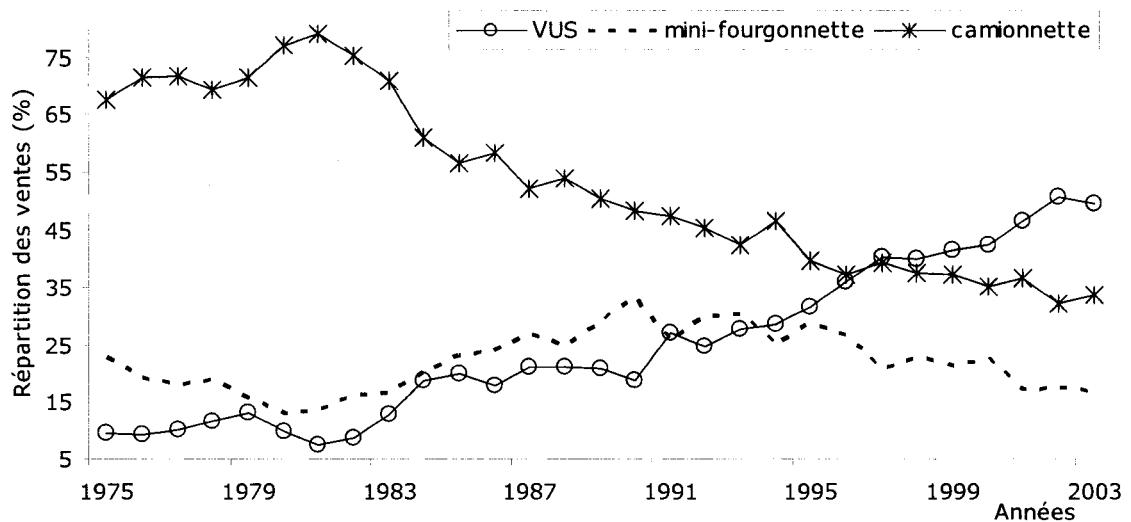


Figure 2.5 : Répartition des types de camionnettes, période 1975-2003

La figure ci-dessus illustre la propension actuelle à l'achat de véhicules utilitaires sport. La popularité de ce type de véhicule n'a cessé de croître depuis une vingtaine d'années. En combinant les données sur les ventes de véhicules neufs aux États-Unis (automobiles et camionnettes), on obtient que la part de marché des camionnettes, incluant les VUS, représente actuellement 48% des ventes de véhicules neufs, soit plus du double que pour l'année 1982. Cette popularité n'est pas sans impact au niveau des GES et de la pollution, compte tenu des normes de consommation de carburant et d'émission de polluants moins strictes pour les camionnettes que pour les automobiles.

Les modèles de prédition des émissions pour la planification urbaine et routière tel que MOBILE s'appuient sur des projections futures de la composition du parc de véhicules. Comparativement à l'année 2002, la composition de la flotte utilisée dans MOBILE6 prévoit une diminution de 28% du nombre de véhicules automobiles, compensée par une augmentation du nombre de camionnettes

(incluant mini-fourgonnettes et VUS) de 67% pour l'année 2020. Le parc total de véhicules passagers durant cette période est réputé croître de 13%, soit 25 millions de nouveaux véhicules s'ajoutant au parc actuel (Jackson 2001, p. 24).

Le parc de véhicule de TIC45 n'échappe pas à cette vague et le nombre de véhicules utilitaire est en croissance, particulièrement parmi les véhicules de courtoisie mis à la disposition du personnel cadre supérieur. Cette tendance augmente les coûts d'achat, d'utilisation et d'entretien mais cause aussi un impact environnemental car la consommation de carburant et les émissions de polluants pour ces véhicules sont passablement plus élevées que celles des automobiles régulières. Compte tenu de l'objectif de réduction des émissions atmosphériques que s'est fixé TIC45, l'entreprise est en position pour se questionner sur la pertinence de fournir ces véhicules à son personnel.

L'effet indéniable de prêcher par l'exemple à tous les paliers d'une entreprise permet de stimuler une adhésion plus volontaire de la part des employés. Il est plus facile d'implanter un programme de limitation de la marche au ralenti ou de conduite écologique lorsque l'exemple est donné dans le choix et l'utilisation des véhicules à tous les niveaux d'une entreprise, spécialement au sein de la direction. De par leur rôle influent, une attitude d'utilisation des ressources plus durable de la part des gestionnaires recèle un fort potentiel d'entraînement. L'achat de quelques véhicules hybrides à faible consommation de carburant ne saurait contrecarrer les impacts énergétiques et environnementaux induits par l'acquisition de centaines de véhicules utilitaires sport.

Tel que souligné précédemment, l'augmentation de la puissance moteur des mini-fourgonnettes a permis, exceptionnellement, de diminuer la consommation de carburant pour cette classe de véhicules au sein du parc de TIC45. La charge transportée et les équipements ajoutés sur le toit de ces véhicules exigent effectivement une puissance accrue. Il ressort de ce constat que lors du choix d'un véhicule, un critère de sélection pourrait être de s'assurer que le mode d'utilisation prévu corresponde bien à la plage de puissance du moteur.

Ceci conclut la section de quantification des émissions. Le chapitre suivant relate la démarche entreprise pour mesurer les taux de polluants émis par les véhicules de TIC45 en conditions routières et au ralenti. La mesure de ces polluants a été effectuée à l'aide d'un équipement de mesure embarqué à bord des véhicules. L'étalonnage de cet équipement, les difficultés rencontrées durant l'expérimentation et les résultats obtenus composent l'essentiel du prochain chapitre.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE ET EXPÉRIMENTATION

Le second chapitre présentait les résultats de l'évaluation des émissions à l'aide d'un outil de modélisation et de calculs. Le présent chapitre rend compte des mesures effectuées sur le terrain en cours de maîtrise. La méthodologie retenue pour effectuer les mesures d'émissions de polluants est présentée, ainsi que le contexte de réalisation et les limitations. Les équipements utilisés, leur étalonnage, le protocole d'échantillonnage et les résultats obtenus sont discutés.

3.1 Méthodologie et équipements utilisés

Parallèlement aux tests en laboratoire en conditions contrôlées, les équipes de chercheurs tentent de plus en plus d'augmenter leur compréhension de la contribution des véhicules aux émissions par des tests sur le terrain. La mesure des émissions en conditions réelles se divise en deux grandes approches : la mesure par télédétection avec équipement fixe en bordure de route et la mesure à l'aide d'équipements embarqués à bord du véhicule avec sonde de prélèvement fixé à la sortie de l'échappement. Ce second type d'équipement a été retenu pour les travaux de maîtrise.

Des équipements de mesure de gaz brûlés portatifs ont été acquis par le maître d'œuvre du projet (Station expérimentale des procédés pilotes en environnement [STEPPE]) en septembre 2001 en vue de développer une expertise dans le domaine des émissions à l'air. Une tendance actuelle popularise l'utilisation d'équipements de mesure de ce type, c'est-à-dire pouvant être transportés à bord du véhicule testé en vue de recueillir des données en situation réelle.

3.1.1 Mesure des émissions à l'aide d'équipements embarqués

Bien que le terme émissions réelles (*real-world emissions*) sous-entend une certaine validité de ces mesures, les limitations inhérentes liées au contexte d'utilisation posent certains défis. La principale difficulté est la dimension aléatoire d'un cycle de conduite sur route en conditions routières. Le style de conduite, le trafic, le synchronisme des feux de circulation, les conditions climatiques et autres paramètres propres à la conduite en conditions réelles peuvent rendre difficile la

comparaison entre différents tests. Ainsi, la flexibilité de cette méthode de mesure doit être encadrée par une planification serrée des campagnes d'échantillonnage.

Une approche pour améliorer la comparabilité des coefficients d'émission recueillis sur route est de relier la puissance spécifique aux émissions enregistrées, méthodologie développée dans le cadre d'une thèse de doctorat (Jimenez-Palacios 1999). La puissance spécifique est définie comme la puissance aux roues nécessaire pour compenser la résistance au roulement, le freinage aérodynamique ainsi que la demande d'énergie pour accélérer (énergie cinétique) ou grimper une pente (énergie potentielle). La puissance spécifique instantanée par unité de masse, exprimée en kilowatt par tonne, est une valeur utilisée lors des tests en laboratoire. Ainsi, la comparaison entre les données recueillies sur route et en laboratoire est rendue possible. Ce paramètre englobe une gamme élargie de paramètres véhicule (ex : accélération, vitesse, puissance moteur) et permet d'amoindrir les effets de la variabilité inhérente à la conduite sur route. La corrélation entre les taux d'émission mesurés et la puissance spécifique instantanée semble bonne pour les périodes transitoires (ex : accélération, ascension d'une pente) (Jimenez-Palacios 1999). Bien que cette méthode n'ait pu être mise en place dans le cadre de ce mandat, elle représente une avenue intéressante pour une future campagne d'échantillonnage.

Au Canada, la vérification des émissions des véhicules et autres équipements munis d'un moteur à piston est effectuée par le Centre de technologie environnementale [CTE] d'Environnement Canada. En plus des tests sur dynamomètre de châssis en conditions contrôlées, le CTE dispose d'un appareil de test portable permettant la mesure des émissions d'échappement en conditions réelles (EC 2003c). Le système peut faire l'analyse en continu des gaz d'échappement ou utiliser des sacs d'accumulation transférés après le test vers un banc d'analyse. Outre le prélèvement d'échantillons de gaz brûlés, le système mesure la température des gaz d'échappement, le régime et la charge du moteur, ainsi que la vitesse du véhicule. Le système rencontre les exigences relatives à un équipement de mesure des gaz brûlés, telles que définies par l'EPA pour les appareils de niveau laboratoire. L'appareil est principalement utilisé pour des

véhicules ne pouvant être testés sur dynamomètre (du tracteur à gazon à la pelle mécanique).

Aux États-Unis, l'EPA a fait connaître en 2001 sa volonté de faire progresser la recherche dans le domaine des systèmes portatifs de mesure des émissions. Le tout en vue d'intégrer les résultats fournis par ces appareils dans une version subséquente du logiciel MOBILE, appelée MOVES pour *Multi-scale Motor Vehicle & Equipment Emission System*. L'EPA envisage d'équiper des véhicules d'appareils mesurant les polluants en continu, de référencer ces données de manière spatiale (technologie GPS) et d'acquérir ces informations par ondes hertziennes (EPA 2001). Depuis ce temps, le partenariat entre l'industrie et l'EPA s'est resserré et différents intervenants se sont prononcés sur les lignes directrices encadrant le développement de ce nouveau logiciel de modélisation des émissions. Parmi ceux-ci, certains auteurs (Frey, Unal et Chen 2002, p. 151) soulignent que la mesure à l'aide d'équipements portatifs est un complément aux mesures en laboratoire pour l'instant et que les deux méthodes doivent se compléter. Les équipements portatifs actuels se limitent typiquement à la mesure du CO₂, du CO des NO_x et des HC. Les pertes par évaporation et les composés toxiques ne sont pas mesurés, et la mesure des particules pose problème. La plupart des appareils portatifs utilisent un analyseur non dispersif à absorption dans l'infrarouge [NDIR] pour la mesure des HC, ce qui rend les données imprécises (Frey, Unal et Chen 2002, p. 193). Les auteurs soulignent la nécessité pour l'EPA d'établir une procédure de certification pour les appareils choisis pour la collecte des données dans le cadre du projet MOVES. À ce jour, deux fabricants ont été retenus par l'EPA pour les premières campagnes de collecte des données. Une panoplie de manufacturiers se dispute le marché et la nécessité de fixer des critères de certification, d'établir des seuils de précision et de répétabilité se fait sentir. En ce sens, le programme *environmental technology verification (ETV)* de l'EPA développe des protocoles d'essai et vérifie la performance des technologies environnementales qui lui sont soumises (EPA 2004c).

Un créneau intéressant pour ce type d'équipement est l'éventuelle norme d'émissions à ne pas dépasser pour véhicules en service proposée par l'EPA. En

1998, l'EPA condamnait sept manufacturiers de moteurs diesel à une amende conjointe de 1,1 milliard de dollars US pour avoir installé des dispositifs de mise hors fonction du système antipollution équipant des camions lourds. Cet exemple souligne qu'un véhicule, bien que rencontrant les seuils d'émission de polluants en laboratoire sur un cycle défini, peut excéder ces normes à maintes reprises en conditions routières.

Une autre application éventuelle de la miniaturisation des outils de mesure traditionnellement confinés aux tests en laboratoire est de les intégrer de manière permanente au système antipollution équipant les véhicules. En plus d'avoir développé une unité mobile de mesure des polluants pour les camions lourds diesel, l'Université Riverside de Californie a œuvré sur un système permettant la rétroaction entre l'émission de polluants et le contrôle des paramètres moteurs en temps réel (Center for environmental research and technology [CE-CERT] 2003). Le projet visait entre autre à évaluer la fiabilité d'un calcul de débit massique des gaz brûlés basé sur les données fournies par le système de diagnostic embarqué [OBD] du véhicule. Un système similaire pour la régulation du moteur en boucle, basé sur le signal d'un capteur de polluants dans l'échappement est en développement en Europe. La réglementation européenne imposera un contrôle permanent des émissions en 2008.

La mesure du débit des gaz d'échappement sur route présente certaines contraintes, compte tenu des conditions d'utilisation. Alors que l'instrumentation des laboratoires d'essais utilise couramment un système assez volumineux d'échantillonnage à volume constant [CVS] avec sacs d'accumulation, les appareils portatifs mesurent généralement le débit de gaz brûlés en continu grâce à un débitmètre. Ce débitmètre peut utiliser un anémomètre à fil chaud, un tube de Pitot ou un venturi à différentiel de pression. Le système de mesure utilisé dans le cadre de cette maîtrise mesure le débit à l'échappement à l'aide d'un tube venturi. Ce venturi a été remplacé dans les nouvelles versions de l'équipement, qui utilisent dorénavant une approximation du débit de gaz brûlés basée sur les paramètres gérés par le système de diagnostic embarqué [OBD] du véhicule.

3.1.2 Description de l'équipement utilisé

Le système utilisé dans le cadre de cette maîtrise est de marque Galio industrial development. Le système utilisé (modèle SMART2000H) est composé des équipements suivants :

- analyseur Horiba BE-250 NDIR (CO, CO₂, HC, O₂);
- analyseur d'oxydes d'azote (NO/NO₂) California analytical instruments 300 CLD à chimiluminescence;
- débitmètre venturi avec adaptateurs pour montage sur le pot d'échappement;
- opacimètre optique pour les fumées d'échappement de moteur diesel;
- sondes de température (gaz brûlés et huile moteur), thermocouple type K;
- capteur pour la mesure du régime moteur en tours minute;
- système de dilution pour prévenir la condensation;
- radar à effet DOPPLER afin d'évaluer la vitesse du véhicule.

Un module d'acquisition de données, composé d'un ordinateur portable équipé du logiciel Smart 2000S développé par Galio, permet de lire les sorties des analyseurs et du débitmètre. Le débitmètre est composé d'un venturi, auquel est reliée une sonde de pression à jauge de déformation. Le venturi consiste en une section convergente de pente douce ayant un diamètre d'étranglement inférieur à la conduite d'entrée. Au passage du venturi, le fluide est accéléré, produisant un différentiel de pression mesurable entre l'entrée et l'étranglement du venturi. Une tension de cinq volts DC alimente la sonde de pression de manière continue. La déformation du diaphragme module ce signal qui est retourné au système d'acquisition de données. La variation de tension est alors traduite en une succession de débits de gaz brûlés selon les courbes d'étalonnage préalablement établies en laboratoire. La précision du débitmètre repose sur la netteté de ce signal électrique et sur un étalonnage rigoureux et complet. L'étalonnage du venturi ainsi que la mise au point de l'appareil sont décrits dans la section 3.2 : *Étalonnage et mise au point*.

L'utilisation du système Galio est prévue dans le cadre d'un partenariat entre des entreprises d'exploitation pétrolière d'Amérique du Sud et des entreprises

canadiennes (Environmental services association of Alberta [ESAA] 2003). Les équipements, financés par Environnement Canada, serviront à recueillir des données d'émission pour des véhicules en service dans quatre grandes villes d'Amérique du Sud. Le manque de robustesse des informations obtenues lors des travaux de cette maîtrise, sujet abordé dans les sections suivantes, est suffisamment inquiétant pour que nous ayons alerté Environnement Canada que l'utilisation de l'appareil Galio devrait être strictement encadrée.

La seule autre référence à l'utilisation du système Galio (modèle Smart 1504) est une liste datée du 20 juillet 2003 spécifiant les équipements de mesure de gaz brûlés répondant aux exigences du Clean Air Act de la République des Philippines.

3.2 Étalonnage et mise au point

Suite à la première série de tests, un calcul de rendement volumétrique (reproduit à l'Annexe D) a démontré un écart marqué entre le débit de gaz brûlés théorique et le débit indiqué par le système de mesure Galio. L'étalonnage du débitmètre et des analyseurs a été réalisé afin d'éclaircir la source de ces écarts. L'Annexe E : *Liste des équipements et schéma de l'étalonnage* fournit les renseignements complémentaires sur l'étalonnage réalisé en laboratoire.

3.2.1 Étalonnage statique de la sonde de pression du débitmètre

Un étalonnage de la plage de fonctionnement complète du débitmètre s'est déroulé sous la direction de Bruno Detuncq, professeur au département de génie mécanique spécialisé en combustion et co-directeur de cette maîtrise, et également avec la participation du fabricant des appareils Galio. L'étalonnage s'est effectué dans le laboratoire d'aérothermique de l'École Polytechnique de Montréal.

L'étalonnage statique de la sonde de pression de l'appareil Galio est présenté à la figure suivante. Le montage utilisé consiste en un réservoir, alimenté par de l'air comprimé, qui peut être mis sous pression puis isolé de l'alimentation. Plusieurs sorties parallèles permettent d'appliquer simultanément une même pression à la sonde du venturi Galio et à une colonne de mercure en U graduée. L'autre

extrémité de la colonne de mercure est à l'air libre et le différentiel de pression est lu entre les deux niveaux. La pression d'air est ensuite appliquée par paliers successifs pour recueillir un nombre suffisant de points. Une courbe est tracée en combinant les données de pression indiquées par la colonne de mercure et les valeurs de débit assumées par la sonde de pression.

L'appareil Galio fournit une lecture du débit en pieds cubes par minute [CFM], affichée sur l'écran du module d'acquisition de données. En réalité, on devrait parler de pieds cubes réels par minute [ACFM] car les débits sont corrigés selon la température des gaz mesurés.

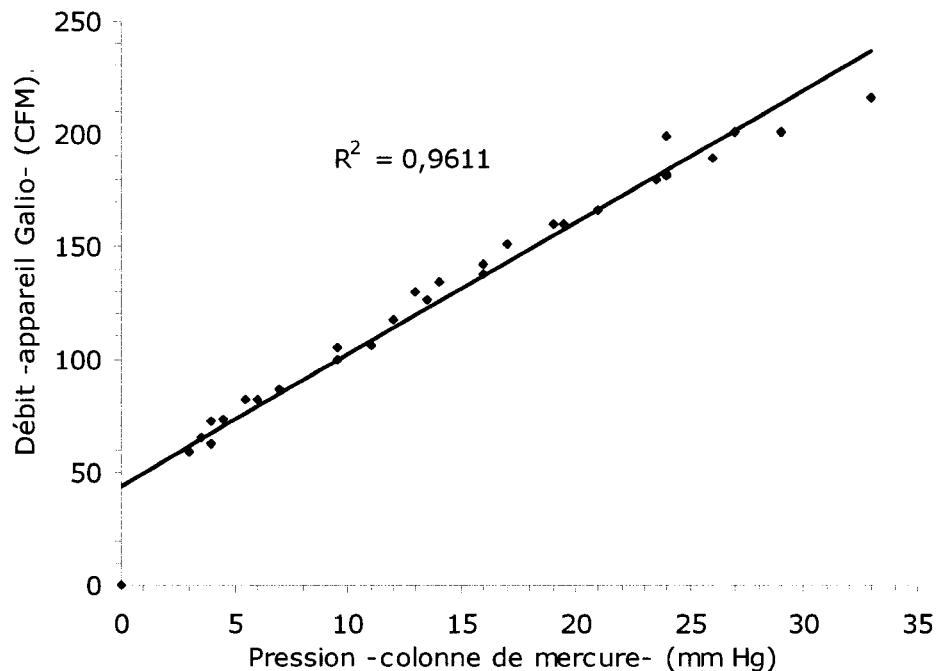


Figure 3.1 : Étalonnage statique de la sonde de pression

La figure témoigne d'une bonne linéarité pour la sonde de pression dans la plage s'échelonnant de 60 à 200 CFM. Par contre, le capteur stagne à 60 CFM et ne peut lire aucune pression sous cette valeur. Ceci contredit la fiche technique du système Galio (Annexe F) qui annonce celui-ci comme étant fonctionnel sur la plage de zéro à 180 CFM. Suite à cet étalonnage statique, le venturi a été

étalonné avec écoulement à l'aide d'une soufflante au laboratoire d'aérothermique de l'École Polytechnique, tel qu'expliqué à la section suivante.

3.2.2 Étalonnage dynamique du débitmètre

La mesure du débit réel est réalisée en imposant une perte de pression au passage d'une restriction de section. Le montage se compose d'une soufflante d'une capacité de 1965 ACFM et 27,7 pouces d' H_2O (55,6 m³/min et 6,9 kPa), reliée à une conduite d'une longueur totale de 4,2 mètres. La conduite droite, d'un diamètre intérieur de 154 mm, se termine par un convergent et une section de 7 cm de diamètre qui permet le raccordement au venturi à étalonner. La longueur de la conduite et l'ajout d'une grille de rectification installée en aval de la soufflante permettent d'obtenir un profil d'écoulement complètement développé. L'Annexe E fournit la liste des équipements ainsi qu'un schéma du montage. La photo ci-dessous donne un aperçu de l'installation. Le venturi Galio est situé à l'extrême gauche de l'image.



Figure 3.2 : Installation pour l'étalonnage du débitmètre

Une plaque à orifice est installée en aval de la soufflante à une distance de 210 cm, soit 13,8 fois le diamètre intérieur de la conduite. L'orifice a un diamètre de 115,5 mm et créé une restriction dans l'écoulement qui se traduit en une chute de pression en aval de la plaque. Une sonde de pression différentielle et un indicateur permettent de mesurer cette variation de pression. Des sondes de pression manométrique et des sondes de température placées à distance de la plaque à orifice permettent de calculer la masse volumique de l'air dans la conduite pour tenir compte de la dilatation du fluide dans les calculs. Ces informations sont colligées et traitées dans un logiciel permettant de calculer le débit massique en se basant sur la loi de Bernouilli et à l'aide d'un calcul itératif du coefficient de débit. Les conditions ambiantes du laboratoire (pression barométrique, température et humidité relative) sont relevées au début de chaque séance d'essai afin de calculer la densité de l'air de la pièce. Le système respecte l'esprit de la norme ISO5167-1 (Organisation internationale de normalisation [ISO] 1991).

La soufflante, munie d'un entraînement à fréquence variable, permet de moduler la vitesse de rotation et donc le débit d'air. La gamme complète de fonctionnement du venturi à étalonner est couverte (zéro à 180 CFM), avec une moyenne de 30 lectures au total pour chaque essai. La procédure est de faire le zéro, d'augmenter le régime de la soufflante jusqu'au seuil de détection de la sonde de pression du venturi pour une première lecture et d'augmenter successivement le régime afin de recueillir une quinzaine de lectures réparties sur la plage de fonctionnement du venturi. Le régime de la soufflante est par la suite diminué du débit maximum vers zéro, et quinze autres valeurs sont notées. À chaque régime choisi, les données de pression, et de température dans la conduite sont colligées, ainsi que le débit volumétrique d'air (en CFM) affiché par le module d'acquisition de données Galio.

La figure ci-dessous montre la relation entre la vitesse de rotation de la soufflante en tours par minute [RPM], le débit volumétrique d'air mesuré à la plaque à orifice et le débit affiché par l'équipement Galio.

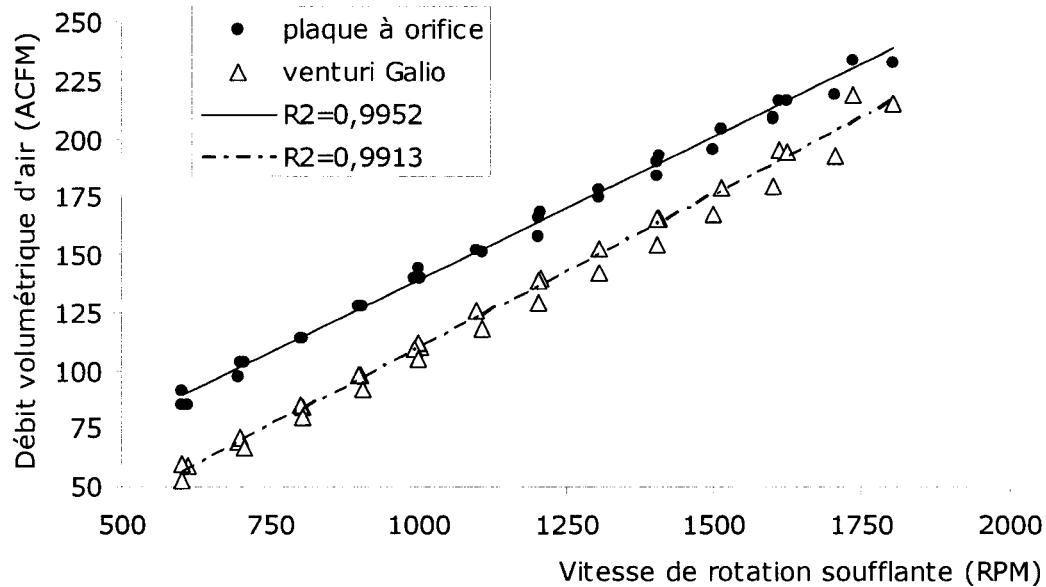


Figure 3.3 : Mesure du débit volumétrique d'air en laboratoire

Les résultats ci-dessus démontrent une bonne linéarité dans la mesure du débit d'air à l'aide de la plaque à orifice et du venturi Galio. Le venturi Galio sous-estime le débit d'air d'environ 30 ACFM comparativement à la plaque à orifice. L'éparpillement des points suggère que cet écart est stable sur toute la plage mesurée.

Lors d'essais subséquents, il a été noté que cet écart (30 ACFM) n'est pas constant. Afin de chercher à isoler toute source d'erreur possible dans la chaîne instrumentale de la sonde de pression, l'étalonnage a été répété, avec cette fois-ci deux lectures additionnelles :

- lecture (en millivolts) servant au calcul du débit Galio, obtenue en interrogeant le module responsable du traitement du signal de la sonde de pression;
- contre-vérification de cette lecture réalisée par branchement en parallèle d'un multimètre à la sonde de pression.

Dans la programmation du logiciel Galio, le calcul du débit volumétrique de gaz brûlés s'appuie sur une équation reliant le débit à la tension mesurée (en millivolts) par la sonde de pression. Il s'agit en fait d'un différentiel de tension,

car la lecture actuelle est soustraite de la valeur zéro, soit pour un écoulement nul. Comme l'équation du logiciel utilise une valeur fixée de tension pour un écoulement nul (658 millivolts), tout écart avec cette valeur zéro se répercute directement sur le débit calculé par le système Galio. Le tableau ci dessous présente les lectures à écoulement nul pour la sonde de pression réalisées pour quelques étalonnages en laboratoire. Le débit Galio est le débit affiché par l'appareil pour chaque zéro de la sonde de pression.

Tableau 3.1 : Lecture de la sonde de pression à écoulement nul

date de l'étalonnage	zéro de la sonde de pression (mV)	écart au zéro (mV)	débit Galio (CFM)
2003-04-29	658	0	18
2003-04-30	648	10	39
2003-05-01	656	2	22
2003-05-07	598	60	92
2003-05-12	597	61	93

Ce tableau suggère qu'une partie de l'instabilité de la lecture de débit réside dans le traitement du signal de la sonde de pression par le logiciel.

3.2.3 Étalonnage du débitmètre par le fabricant

Afin de relier les lectures (millivolts) du capteur de pression aux débits correspondants, le fabricant des appareils a effectué un étalonnage basé sur la mesure de la vitesse du fluide à l'aide d'un anémomètre à fil chaud.

L'installation du fabricant se compose d'une soufflante dont le débit est réglé par vanne de restriction à l'entrée et d'une conduite droite d'environ 50 centimètres de long pour un diamètre intérieur de 6 cm. L'étalonnage consiste en une série de lectures de la vitesse du fluide effectuées sur la section transversale de l'écoulement. Connaissant le diamètre intérieur de la conduite et la vitesse du fluide, le débit volumétrique est obtenu directement par calcul. Les débits calculés sont ensuite reliés aux lectures du capteur de pression, et une équation reliant le débit volumétrique d'air au différentiel de tension mesuré (en millivolts) est établie.

3.2.4 Réparations et correctifs

L'étalonnage du débitmètre a permis d'identifier deux faiblesses majeures de l'appareil : la gamme inférieure des débits ne peut être mesurée (zéro à 60 ACFM, soit le tiers de la plage de fonctionnement) et la lecture de référence (à débit zéro) du capteur de pression du venturi Galio fluctue sans raison apparente. Suite à ce constat, le réétalonnage complet basé sur les lectures de voltage de la sonde de pression a été réalisé. Le résultat de ces essais a été transmis au fabricant en lui suggérant de remplacer les équations reliant la lecture de la sonde de pression et le débit dans le logiciel. Des essais subséquents (section 3.4 : *Expérimentation*) ont révélé que la mesure du débit en situation expérimentale (sur véhicule) demeurait problématique. Des connections fautives, des courts-circuits et des problèmes de courant parasite ont été identifiés et corrigés en partie, mais les valeurs indiquées demeurent incongrues. De ce fait, les lectures de débits (massique ou volumique) ne peuvent être utilisées avec confiance. Ce constat pénalise la confiance pour les essais embarqués. En tout, la période d'étalonnage et de réparation s'est échelonnée sur plus de cinq mois.

D'autres faiblesses de l'appareil ont causé problème, par exemple des jonctions électriques mal soudées, du câblage de trop faible diamètre, une isolation à la masse incomplète et des interférences lors du branchement de l'analyseur à chimiluminescence. La section 3.4 : *Expérimentation*, montre que l'utilisation de l'appareil Galio a produit des mesures aberrantes, ce qui souligne la difficulté d'obtenir des informations fiables même avec un appareil au coût relativement élevé.

3.2.5 Étalonnage des analyseurs de gaz brûlés

L'étalonnage des analyseurs de gaz brûlés s'effectue au moyen de gaz étalon fabriqué en industrie, dont la concentration est authentifiée par un certificat de conformité. Un mélange de gaz similaire à la norme étasunienne BAR97 a été utilisé pour étalonner les appareils Galio. Ce mélange se compose de 200 ppm propane, 300 ppm NO, 0,5% CO, 12% CO₂ et le reste en azote. La bonbonne est munie d'un manodétendeur pour ajuster la pression et le débit de sortie des gaz.

La procédure consiste à brancher la bonbonne de gaz au port d'entrée de gaz brûlés du système Galio et de régler le débit. La valeur indiquée par les appareils est ensuite corrigée dans le logiciel d'acquisition de données pour s'accorder avec les concentrations connues du mélange de gaz. Cet étalonnage doit idéalement être fait avant chaque série ou journée de tests et après une période de remisage prolongée. La livraison de la bonbonne de gaz a nécessité plus de quatre mois, alors que le délai initial devait être de quatre semaines. Compte tenu du délai d'attente pour le mélange de gaz, les mesures sur le terrain ont débuté en se fiant sur l'étalonnage effectué par le fabricant du système Galio.

Les résultats obtenus durant l'étalonnage figurent au tableau 3.2. Les données de NO_x ne sont pas disponibles car lors de ces essais, l'analyseur à chimiluminescence du système Galio était hors service. De par sa relative fragilité, cet appareil n'est pas conçu pour être transporté et installé à répétition. De plus, les branchements au module d'acquisition de données Galio ne sont pas fabriqués selon le concept de tolérance des fausses manœuvres, et leur identification manque de clarté. Malheureusement, l'inversion d'un branchement entraîne une surtension dans l'analyseur à chimiluminescence et endommage celui-ci. L'analyseur a du être retourné à deux reprises chez son fabricant pour réparation et n'est présentement plus fonctionnel.

La moyenne des cinq étalonnages montre que l'analyseur NDIR Horiba (CO₂, CO, HC et O₂) sous-estime de 51% les HC et surestime de 14% le CO₂ et le CO. Un facteur de deux dans la mesure des HC est typique pour un analyseur à infrarouge (Stedman, Bishop et Pokharel 2002). Aucun oxygène n'a été détecté, ce qui suggère que le test mesurait seulement le gaz éalon et non l'air ambiant. Lors de l'étalonnage, les équipements satellites du système Galio sont débranchés (venturi débitmètre, sondes de température et de pression, et analyseur à chimiluminescence puisque hors service).

Tableau 3.2 : Étalonnage des analyseurs de gaz brûlés

essai	O ₂ % vol	CO ₂ % vol	CO % vol	HC ppm	NO _x ppm
gaz étalon	0	12	0,5	200	300
1	0	14,04	0,58	103,74	-
2	0	13,92	0,59	97,90	-
3	0	13,25	0,55	96,80	-
4	0	13,56	0,57	96,64	-
5	0	31,13	0,31	57,08	-
moyenne	0	13,69	0,57	98,77	-
écart-type	0	0,36	0,02	3,36	-
variation (%)	0	+14	+14	-51	-

Le cinquième essai utilisait une version antérieure du logiciel dont l'étalonnage a par la suite été trouvé déficient, ces valeurs sont donc exclues de la moyenne et de l'écart-type. Bien que la taille de l'échantillon soit restreinte, ces données suggèrent une fidélité acceptable et une justesse passable au niveau de la mesure du CO₂ et du CO pour l'analyseur Horiba. Par contre, la mesure des HC devrait être compensée, ce qui est en accord avec les réserves formulées à la section 3.1.1 : *Mesure des émissions à l'aide d'équipements embarqués sur la justesse de la technologie NDIR pour la mesure des hydrocarbures imbrûlés.*

3.3 Plan d'échantillonnage

Cette section présente le plan d'échantillonnage prévu au départ et sa version revue en cours de mandat. Le plan original prévoyait beaucoup d'efforts pour capter la variabilité des mesures entre les tests par le biais d'un nombre élevé de répétitions. Suite aux commentaires du professeur Bernard Clément du département de mathématiques et génie industriel de l'École Polytechnique, les efforts ont été redirigés vers l'augmentation de la taille de l'échantillon en limitant le nombre de répétitions, afin de cerner la variabilité sur une gamme plus élargie de véhicules.

3.3.1 Véhicules ciblés

Les classes de véhicules échantillonnées ont été choisies en se basant sur le volume de carburant consommé annuellement pour chaque cylindrée répertoriée. Les classes consommant le plus de carburant étant retenues. Ce choix initial a par la suite été élargi aux classes définies dans MOBILE, compte tenu des similitudes entre cylindrées et classes de véhicules. Les véhicules des groupes échantillonnés, HDGV2B et LDGT2, ont consommé respectivement 28 et 27% de tout le carburant enregistré durant l'année 2001-2002 (*Tableau 2.2 : Répartition des cylindrées par classes d'émissions*) pour le parc de TIC45.

L'hypothèse formulée est que les véhicules d'un même groupe forment une population dite homogène. Les véhicules sont choisis aléatoirement parmi le parc. Les tests se divisent en deux catégories : essais au ralenti (moteur au ralenti et véhicule immobile) et essais routiers. La variabilité intrinsèque des émissions entre véhicules distincts est évaluée grâce au test au ralenti, qui permet d'éliminer plusieurs effets potentiels d'interaction de par sa relative simplicité (régime moteur permanent et conditions climatiques identiques).

La proposition initiale demandait d'échantillonner, par allocation proportionnelle, 5% de tous les véhicules, soit environ 385 essais, auxquels s'ajoutent les réplications et les variantes possibles dans les paramètres expérimentaux. Comme le but est d'évaluer les émissions en conditions réelles, l'idée était d'effectuer les tests sur route. Les premiers essais ont révélé un temps moyen d'une heure par essai (incluant la mise en route des appareils et leur désinstallation subséquente). En plus de l'utilisateur des appareils de mesure, un conducteur est nécessaire. Compte tenu du nombre d'essais et que le coût de l'allocation d'un chauffeur par TIC45 pour l'ensemble des tests dépassait ses intentions, la faisabilité d'une campagne d'échantillonnage de cette ampleur est apparue au-delà des ressources disponibles. Basé sur ce constat, le plan expérimental finalement retenu pour la collecte de données vise plutôt l'évaluation des émissions pour certaines particularités spécifiques au parc de TIC45. Les données globales pour tout le parc ont été obtenues par modélisation informatique à l'aide du logiciel MOBILE et du bilan des carbones (*Chapitre 2*).

3.3.2 Plan expérimental

Le but de l'expérimentation est de vérifier l'effet sur les émissions de la variation des paramètres expérimentaux suivants:

- impact de la climatisation et/ou du chauffage au ralenti;
- impact des modifications à l'aérodynamisme du véhicule.

Pour chaque essai, un paramètre expérimental est donc varié et les réponses (émissions) sont analysées. Des paramètres de contrôle sont notés durant les essais tel que la température ambiante ou la vitesse du véhicule. Le plan d'expérimentation est un plan complet factoriel, dont un exemple est montré ci-dessous.

Tableau 3.3 : Exemple de plan d'échantillonnage

Essai	paramètres expérimentaux		paramètres de contrôle		réponses			
	X ₁ porte-échelle	X ₂ échelles	Z ₁ vitesse	Z ₂ charge moteur	Y ₁ CO ₂	Y ₂ CO	Y ₃ HC	Y ₄ NO _x
1	-	-						
2	+	-						
3	-	+	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
4	+	+						

Les facteurs (X_i) ou paramètres expérimentaux varient selon deux modalités : - (sans) et + (avec). Les paramètres de contrôle (Z_i) sont notés afin d'isoler les écarts ne dépendant pas des paramètres expérimentaux. Les réponses (Y_i) ou variables de sortie sont compilées pour fin d'analyse et comprennent les taux d'émission moyens de polluants et des variables comme le débit moyen de gaz brûlés. Bien qu'il nécessite un grand nombre d'essais, l'utilisation d'un plan factoriel a été retenu pour sa facilité de planification et parce qu'il permet d'estimer tous les effets d'interactions présents.

3.4 Expérimentation

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, l'équipement nécessaire à la mesure des gaz brûlés était de prime abord réputé fonctionnel et fiable jusqu'à preuve du contraire. Le système Galio est vendu sans certificat d'étalonnage ni validation de

la part d'une instance indépendante reconnue. Selon son propre aveu, le fabricant lui-même n'a testé son propre système que sur un seul véhicule à deux ou trois reprises. Une copie des résultats d'un test réalisé par le fabricant nous a été transmise. Le test s'est déroulé en milieu urbain en compagnie d'un membre de la STEPPE le 19 octobre 2001. Le véhicule échantillonné était un Nissan pathfinder 2001. Ce véhicule utilitaire sport [VUS] entre dans la classe d'émission LDGT2 de MOBILE. La distance parcourue a été de 7,7 kilomètres pour une durée de 620 secondes et une vitesse moyenne de 45 km/h. Les résultats apparaissent au tableau ci-après et sont comparés avec les seuils d'émission du test IM240 et les taux d'émission modélisés pour la classe LDGT2 du parc de TIC45.

Le système Galio fournit une lecture seconde par seconde en kilogramme par heure des taux d'émission instantanés pour chaque polluant. Les moyennes de ces taux instantanés sont calculées pour l'essai complet et apparaissent au tableau. Basé sur la longueur et la durée du parcours, les données ont été converties en gramme par kilomètre pour permettre la comparaison.

Tableau 3.4 : Taux d'émission pour un essai routier avec le système Galio

essai	type de véhicule	unités	CO ₂	CO	HC	NO _x
Galio	VUS	kg/h	17,9	0,0076	0,003	0,31
Galio	VUS	g/km	404	0,17	0,06	7,02
IM240	camionnettes	g/km	-	8,7	0,5	1,18
TIC45 MOBILE6.2	classe LDGT2	g/km	334	10,1	0,82	0,7

Les taux d'émission de CO mesurés par Galio sont cinquante fois inférieurs aux standards prévus par l'essai IM240, les HC huit fois inférieurs et les NO_x six fois supérieurs. Bien que les émissions de polluants mesurées fluctuent selon les conditions, la technologie, l'état du système antipollution et autres, les écarts ci-dessus ne peuvent être justifiés uniquement par ces facteurs. Un autre indice de dysfonctionnement du système est l'écart entre le débit de gaz brûlés mesuré et celui calculé par rendement volumétrique, tel qu'expliqué précédemment.

L'expérimentation s'est déroulée de manière itérative, avec des mesures sur le terrain alternant avec l'étalonnage des appareils et la correction des problèmes

recensés. Le processus entrepris afin de corriger les difficultés rencontrées dans l'utilisation des appareils a considérablement grugé le temps réservé à l'expérimentation sur le terrain. Malgré tout, le cheminement a permis de mieux comprendre les limitations d'une telle démarche et on l'espère, d'orienter les expérimentations futures vers des cibles plus réalistes. Les sections suivantes présentent les résultats des mesures d'émissions bruts et retravaillés pour les tests au ralenti et sur la route.

3.4.1 Tests au ralenti - impact de la climatisation sur les émissions

Le test au ralenti, en plus de servir de base comparative pour les essais routiers, vise à déterminer l'impact de l'utilisation de la climatisation et/ou du chauffage sur les émissions.

- les paramètres expérimentaux sont la climatisation (X_1) et le chauffage (X_2), les modalités sont – (sans) et + (avec);
- les paramètres de contrôle sont la température ambiante (Z_1), le régime du moteur (Z_2) et la température de l'huile moteur (Z_3);
- les réponses sont les taux d'émission moyen de CO_2 (Y_1), CO (Y_2), HC (Y_3) et NO_x (Y_4). Les autres variables de sortie sont la moyenne du débit de gaz brûlés (Y_5) et le débit d'air à l'admission du moteur (Y_6).

Les tests sont effectués dans un garage dont la température est d'environ 20°C. Au total, 104 essais ont été réalisés sur 13 fourgonnettes Chrysler B3500, dont la cylindrée est de 5,2 litres et l'année de modèle moyenne 1999 (min : 1998, max : 2001). Le tableau 3.5 présente un sommaire des résultats obtenus. Les données brutes sont les débits massiques affichés par le système Galio sans pondération. Les données pondération débit et gaz sont corrigées par un ratio basé sur le débit théorique (voir l'Annexe D) et par les écarts respectifs issus de l'étalonnage des appareils de mesure de gaz brûlés (section 3.2.5. *Étalonnage des analyseurs de gaz brûlés*). Les données pondération CO_2 sont corrigées par un ratio basé sur les émissions de CO_2 mesurées par Environnement Canada en laboratoire pour un véhicule identique à ceux échantillonés. Ces tests ont été effectués pour le compte de TIC45 par la division de la recherche et de la mesure des émissions du centre de technologie environnementale d'Environnement

Canada (EC 2003d). Les résultats de ces essais apparaissent à la section laboratoire Environnement Canada et servent de données pour la population contrôle dans le calcul des taux de variation.

Malgré tous les efforts mis en oeuvre pour tenter de pallier aux aberrations des données générées par l'appareil Galio, une grande variabilité est observée et aucune tendance ne se dégage. Il faut malheureusement conclure que les résultats obtenus semblent inutilisables, de quelque façon que ce soit.

Tableau 3.5 : Résultat des tests au ralenti (base massique)

		CO ₂ kg/h	CO g/h	HC g/h	NO _x g/h	débit CFM
données brutes	moyenne	28,5	3,8	29,6	10,7	93,3
	écart-type	36,1	8,1	63,9	12,9	123,5
	variation %	240	-94	2071	128	N/A
pondération débit et gaz	moyenne	16,9	3,3	32,3	10,9	93,3
	écart-type	5,1	5,9	40	17,1	123,5
	variation %	101	-95	2265	133	N/A
pondération CO ₂	moyenne	8,2	1,9	7,7	4,2	93,3
	écart-type	N/A	3,6	11,8	5,8	123,5
	variation %	N/A	-97	464	-10	N/A
laboratoire Environnement Canada	moyenne	8,42	66,89	1,37	4,68	N/D
	écart-type	2,85	0,11	0	0,02	N/D
	variation %	-	-	-	-	N/D

L'incertitude et la variabilité des données recueillies empêchent toute utilisation. L'écart-type est systématiquement plus élevé que la valeur moyenne mesurée, ce qui dénote un manque de consistance majeur dans les résultats. Évidemment, l'influence de la climatisation sur les émissions ne peut-être dégagée compte tenu de l'imprécision inhérente des résultats produits par le système de mesure.

Bien que le débit calculé par le système Galio ne soit pas fiable, les concentrations de polluants mesurées par les analyseurs de gaz brûlés peuvent néanmoins être utilisées pour évaluer la composition des gaz d'échappement. Ces données en

pourcentage volumique sont converties en données massiques par le logiciel Galio tel que décrit précédemment. Il serait possible d'utiliser directement les concentrations volumiques et de les convertir manuellement en données massiques, afin de contourner le débitmètre déficient et d'obtenir de meilleurs résultats. Cette approche a été évaluée à l'aide d'un calcul de conversion de concentration volumique d'un polluant en débit massique (*Annexe D*).

Le tableau 3.6 présente les concentrations volumiques brutes affichées par le système Galio, exprimées en pourcentage volumique (%vol) et en parties par millions [ppm]. La moyenne Galio est le résultat de la conversion massique manuelle. Les données d'Environnement Canada apparaissent à la section moyenne EC, suivies du taux de variation en pourcentage entre les moyennes massiques.

Tableau 3.6 : Résultat des tests au ralenti (base volumique)

	CO ₂	CO	HC	NO _x	débit
unités	%vol	%vol	ppm	ppm	CFM
moyenne	9,4	0,03	28,8	4,5	93,3
écart-type	2,5	0,1	36,0	5,6	123,5
unités	kg/h	g/h	g/h	g/h	
moyenne Galio	13,9	27,1	11,1	0,7	N/A
moyenne EC	8,42	66,89	1,37	4,68	N/D
variation %	66	-59	710	-85	N/A

Encore une fois, on constate des écarts importants entre les résultats du système Galio et les moyennes d'Environnement Canada. L'incertitude et la variabilité des données produites par le système de mesure ne permettent pas de poursuivre l'analyse. La seule mesure qui semble relativement stable est la concentration volumique de CO₂.

Compte tenu que l'étalonnage en laboratoire des analyseurs de gaz brûlés montre des caractéristiques métrologiques passables (section 3.2.5 : *Étalonnage des*

analyseurs de gaz brûlés), mais que ces mêmes données en conditions réelles d'utilisation se révèlent incongrues, la nature du problème semble découler du traitement des signaux des analyseurs et équipements satellites par le module d'acquisition de données Galio. Cette hypothèse n'a pu être vérifiée en cours de mandat car elle impliquerait une revue en profondeur du système complet, mais c'est une avenue qui mériterait d'être poursuivie.

L'énumération ci-dessous résume les quatre niveaux d'erreur identifiés en cours de mandat, imbriqués dans la chaîne instrumentale du système de mesure Galio:

1. mesure du débit (par venturi débitmètre) déficient;
2. traitement inconsistant des signaux fournis par les analyseurs de gaz brûlés;
3. interférences électriques dans la chaîne instrumentale;
4. mesure des HC imprécise pour l'analyseur NDIR.

La section suivante relate les résultats obtenus sur cycle routier.

3.4.2 Tests sur route - modification à l'aérodynamisme du véhicule

Le test sur route vise à évaluer l'impact de la modification de l'aérodynamisme induit par l'ajout d'équipement sur le toit d'un véhicule. La résistance aérodynamique étant proportionnelle au cube de la vitesse instantanée d'un véhicule, un effet significatif est soupçonné et l'impact sur la consommation de carburant et les émissions est investigué.

Pour les essais routiers, les paramètres expérimentaux sont la présence d'une galerie de toit pour arrimer des échelles, dénommée porte-échelle (X_1) et la présence d'échelles (X_2). Les modalités faisant varier ces paramètres sont – (sans) et + (avec). Les paramètres de contrôle sont la vitesse moyenne (Z_1), la charge moteur (Z_2) et la température des gaz brûlés (Z_3). Les variables de sortie (Y_i) sont les taux d'émission moyen de polluants, la moyenne du débit de gaz brûlés, le débit d'air admis au moteur et le volume de carburant consommé pour chaque essai.

Les tests sont effectués sur un parcours d'une longueur de 11 kilomètres, sur autoroute, par condition de trafic faible. La vitesse moyenne visée est de 90 km/h. Le tableau ci-dessous résume les données brutes de l'appareil Galio en base volumique et massique. Comme l'appareil Galio ne fournit pas les données en gramme par kilomètre, la conversion manuelle a été faite en utilisant la distance parcourue et la vitesse moyenne de chaque essai.

Tableau 3.7 : Taux d'émission de polluants (essai routier)

unités	CO ₂ %vol	CO %vol	HC ppm	débit _{GB} CFM
moyenne	16,4	0,014	0	29,2
écart-type	0,2	0,01	0	9
unités	kg/h	kg/h	kg/h	
moyenne	16	19,3	0	
écart-type	5,2	10,2	0	
unités	g/km	g/km	g/km	
moyenne	177	0,2	0	
écart-type	56	0,1	0	

La concentration de CO (0,014%) est très faible, comparativement au standard prévu (0,4%) pour réussir le test sur dynamomètre ASM2525 pour une camionnette de classe LDGT2. Le débit de gaz brûlés [débit_{GB}] théorique est de 154 CFM (voir le calcul à l'Annexe D), alors que le système Galio affiche une moyenne de 29 CFM au tableau ci-dessus. Le taux de CO₂ par kilomètre (177 g/km) est la moitié du taux prévu par le bilan du carbone pour la classe LDGT2 de TIC45. Après analyse, ces données d'émissions de polluants ont été laissées de côté, compte tenu de leur incongruité et de leur manque de stabilité.

La consommation de carburant a tout de même pu être évaluée durant ces tests. Le volume consommé a été mesuré par remplissage du réservoir de l'automobile à l'aide d'un cylindre gradué après chaque essai. Le boyau de remplissage du réservoir a été modifié afin d'éviter que le carburant ajouté ne soit redirigé vers le système de captage des vapeurs et du trop plein de carburant. Cette méthode ne tient pas compte des pertes par évaporation ni des éclaboussures, que l'on suppose relativement faibles et identiques pour chaque test.

Le *Tableau 3.8 : Résultat des tests sur route* présente un sommaire des résultats obtenus. Un équipement de diagnostic automobile (modèle Genisys, SPX Corporation) a été utilisé pour recueillir la vitesse du véhicule, le régime du moteur et le débit d'air admis au moteur. Ce type d'équipement permet de lire les données gérées par le système de diagnostic embarqué [OBD] et de faciliter le repérage des anomalies du véhicule lors d'une réparation. Avec le recours au contrôle électronique des paramètres moteur et le cloisonnement de ces systèmes, l'utilisation de ce type d'équipement devient progressivement une nécessité. Un port de communication standardisé situé sous la colonne de direction permet de télécharger les paramètres véhicule gérés par le système OBD. L'appareil utilisé lors des essais permet de prélever des données durant 40 secondes, à raison d'une nouvelle lecture à chaque seconde. Malheureusement, une fois les données dans l'appareil diagnostic, elles ne peuvent plus être transférées vers un module externe. La procédure a donc été de relever manuellement les minimum et maximum enregistrés pour chaque séquence de 40 secondes. Trois à quatre séquences de 40 secondes ont été recueillies pour chaque parcours de 11 kilomètres.

Un seul véhicule a été échantillonné, selon trois modalités : sans porte-échelle et sans échelle (-,-), avec porte-échelle et sans échelle (+,-), avec porte-échelle et avec échelles (++,). Le premier test (-,-) sert de référence pour le calcul de variation pour les autres modalités. La charge embarquée est inférieure à 250 kg (incluant l'équipement d'analyse, le conducteur et un passager). Chaque test comportait entre trois et quatre réplications. Au total, 14 essais ont été complétés sur une mini-fourgonnette Ford windstar 1998, dont la cylindrée est de 3 litres. Les échelles et le porte-échelle ont été retirés du toit du véhicule en fonction des modalités du test. Un ensemble d'échelles est composé de deux escabeaux pliants (un de 2 mètres et l'autre de 2,4 mètres de long) et d'une échelle de 8 mètres de longueur.

Tableau 3.8 : Résultat des tests sur route

Test	paramètre		unité	moyenne	écart-type	variation (%)
(-,-)	vitesse	Z ₁	km/h	90,8	0,8	N/A
	débit d'air	Y ₆	g/s	19,0	0,6	N/A
	carburant	Y ₇	L	1,1	0,2	N/A
(+,-)	vitesse	Z ₁	km/h	90,7	0,8	-0,1
	débit d'air	Y ₆	g/s	22,0	1,2	15,5
	carburant	Y ₇	L	1,2	0,1	11,4
(++,+)	vitesse	Z ₁	km/h	90,4	0,6	-0,5
	débit d'air	Y ₆	g/s	25,0	2,1	27,3
	carburant	Y ₇	L	1,4	0,2	22,9

La taille réduite de l'échantillon ne permet pas de faire une analyse de variance pour déterminer si les tendances observées sont significatives. Par contre, l'ajout de porte-échelle et d'échelles sur le toit du véhicule semble influencer de manière considérable la consommation de carburant. Une surconsommation de l'ordre de 20% a été enregistrée pour ces essais. Ceci s'accorde avec les résultats d'une étude sur la consommation de carburant pour les mini-fourgonnettes avec et sans porte-échelle effectuée par TIC45 dans le passé. Le porte-échelle entraînait une augmentation de la consommation d'essence d'environ 40% (Chagnon 2004). Comme les véhicules testés à l'époque étaient munis d'un moteur de 100HP, la comparaison avec les véhicules actuels (moteur de 200HP) est trompeuse, mais indique qu'il y a là matière à poursuivre l'analyse. Depuis ce temps, l'augmentation de la puissance du moteur a permis, exceptionnellement, d'améliorer la consommation de carburant pour cette classe de véhicule. La plage de puissance correspond mieux depuis quelques années aux conditions d'utilisation (charge transportée et porte-échelle) de ces véhicules pour TIC45.

Le parc compte environ 2200 mini-fourgonnettes équipées de manière similaire (porte-échelle et ensemble d'échelles) au véhicule testé dans cette maîtrise. En attribuant un volume de carburant consommé proportionnel au nombre de véhicules de la classe LDGT2 (voir le *Tableau 2.5 : Consommation de carburant*), on obtient que les mini-fourgonnettes équipées de la sorte utilisent environ 4,5 millions de litres de carburant pour l'année 2001-2002. En posant comme hypothèse que le bris d'aérodynamisme engendre une surconsommation de l'ordre

de 20%, l'impact monétaire direct (achat de carburant) se chiffre à plus d'un demi million de dollars et l'impact environnemental en terme de GES se monte à 1800 tonnes de CO₂. Il convient de rappeler que l'effet de traînée aérodynamique est proportionnel au cube de la vitesse, et donc que l'effet du porte-échelle est moindre pour des déplacements à basse vitesse.

Ceci conclut la revue des travaux d'expérimentation réalisés dans le cadre de cette maîtrise. Il est à retenir que la mise en oeuvre de la portion expérimentale de cette maîtrise a été considérablement alourdie par les difficultés rencontrées dans l'utilisation du système d'analyse des gaz brûlés. Les résultats des campagnes d'échantillonnage sont décevants et il ne s'en dégage aucune tendance mesurable. Par contre, le test de consommation de carburant sur route avec porte-échelle et échelles indique une voie de recherche à approfondir et des gains potentiels intéressants pour TIC45.

Le chapitre suivant synthétise l'ensemble des connaissances acquises et reprend les principales conclusions se dégageant de ce travail. Les résultats de la revue de littérature, les travaux de modélisation et de mesure des émissions atmosphériques orientent les recommandations formulées à l'intention de l'entreprise.

CHAPITRE 4 : DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

L'étude s'est penchée sur l'analyse des émissions atmosphériques pour TIC45. L'entreprise s'est engagée depuis peu dans une démarche visant à mieux connaître sa contribution à la pollution de l'air et aux gaz à effet de serre. Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche et constitue une première étude sur la question ouvrant la voie pour des analyses futures. Étant donné son type d'activités, la contribution de TIC45 provient essentiellement d'appareils à combustion : génératrices, fournaises et moteurs de véhicules.

La définition initiale de ce projet prévoyait centrer l'évaluation des émissions sur la mesure des gaz brûlés pour un échantillon statistiquement représentatif de véhicules. Un équipement de mesure des gaz brûlés portatif de marque Galio étant à la disposition de l'entreprise, il avait été prévu, d'entrée de jeu, de l'utiliser pour des campagnes d'échantillonnage. Au début du mandat de cette maîtrise, une analyse sommaire des besoins en temps et en main-d'œuvre pour réaliser ces campagnes a cependant nécessité de revoir à la baisse l'ampleur des travaux d'échantillonnage. L'effort a donc été redirigé vers la mesure des émissions pour des scénarios précis, sur un échantillon de véhicules plus restreint.

Bien que ces travaux expérimentaux aient occupé une place importante des activités de maîtrise, les résultats obtenus ne sont pas concluants. Les aberrations constatées dans les données générées par l'équipement Galio pour la mesure des gaz brûlés compromettent la fiabilité des données recueillies lors des campagnes d'échantillonnage. Les composantes du système semblent assez bien fonctionner en laboratoire sous régime permanent, mais en conditions réelles (régime transitoire), les taux de polluants mesurés ne se rapprochent en rien des valeurs prévues par la littérature. Diverses lacunes du système d'analyse ont été diagnostiquées et, dans certains cas, ont pu être réparées. Finalement, suite à toutes les difficultés rencontrées, il s'est avéré nécessaire d'abandonner les mesures expérimentales au profit d'une approche plus macroscopique basée sur les caractéristiques du parc de véhicules. À la lumière de l'expérience acquise,

cette approche aurait probablement pu être adoptée dès le départ, la première étant peut-être trop ambitieuse.

Les travaux de modélisation réalisés à partir d'un modèle informatique reconnu et commercialement disponible ont permis d'évaluer les taux d'émission de polluants pour chaque classe de véhicules du parc de TIC45. Les taux modélisés sont comparables à ceux prédis par la littérature consultée. Un bilan des gaz à effet de serre a permis de démontrer que, pour son parc automobile, l'entreprise est en bonne voie pour respecter et même dépasser les exigences du protocole de Kyoto. En effet, par rapport à l'année de référence 1990 (107 260 tonnes de CO₂), la production de CO₂ du parc de véhicules est de 5% inférieure pour l'année 2001 et de 11% inférieure pour l'année 2002.

La section ci-dessous résume quelques éléments clés de cette étude, et est suivie de recommandations quant aux activités de TIC45 et des besoins en recherche futurs.

4.1 Discussion des résultats

Il a été mentionné précédemment que le resserrement des normes d'émissions des véhicules routiers a permis une diminution marquée des polluants émis par véhicule. Le gain environnemental de ces législations est cependant amoindri par l'augmentation continue de la distance totale parcourue et par l'accroissement de la taille du parc de véhicules routiers en Amérique du Nord. Pour l'entreprise étudiée, il est raisonnable de croire que la taille du parc et le kilométrage parcouru annuellement par les véhicules demeureront relativement stables à moyen terme. Compte tenu du taux de renouvellement du parc de TIC45 (âge moyen de 3,8 années), l'impact environnemental des nouvelles normes d'émissions en application à compter de l'année de modèle 2004 sera perceptible d'ici quelques années.

La réduction de la consommation de carburant sera d'avantage le résultat du choix des véhicules que de la législation des années à venir. Contrairement à l'Union Européenne où la diminution du CO₂ émis par les véhicules est appuyée

par les instances gouvernementales et les constructeurs automobiles, la situation prévalant de ce côté-ci de l'Atlantique est plutôt la loi du libre marché. Deux tendances s'opposent dans le marché actuel : d'un côté, l'augmentation de la taille et de la puissance des véhicules, et de l'autre le retour à la pensée *small is beautifull* avec les véhicules hybrides à faible consommation de carburant. Dans le parc de TIC45, les deux tendances s'observent.

Par delà les considérations technologiques, le mode d'utilisation des véhicules influence grandement les émissions et la consommation de carburant. Des recommandations quant à des modifications souhaitables sont présentées plus loin. TIC45 possède une proportion élevée de véhicules de forte consommation, ce qui se reflète dans le taux de consommation moyen de carburant du parc (19,4 L/100km). De plus, le poids d'équipement transporté et le bris d'aérodynamisme induit par l'ajout d'équipement sur le toit de plusieurs véhicules contribuent à augmenter cette consommation. L'analyse des statistiques de consommation de carburant de l'entreprise montre une surconsommation de l'ordre de 1 à 3 L/100km pour chaque classe de véhicules par rapport aux moyennes établies par l'EPA en conditions réelles. La marche au ralenti, en plus d'être réglementée dans certaines villes, représente une surconsommation de carburant évaluée à 6% pour TIC45. La généralisation de la climatisation pour les véhicules récemment acquis par l'entreprise va dans le même sens, sans compter les fuites de fluide frigorigène à fort potentiel de réchauffement climatique. Les tests sur autoroute effectués dans la partie expérimentale de cette maîtrise suggèrent une augmentation de l'ordre de 20% de la consommation de carburant pour une mini-fourgonnette équipée d'un porte-échelle et d'échelles. Appliqué au volume de carburant consommé par l'ensemble des camionnettes ainsi équipées, l'impact monétaire direct (achat de carburant) de cette surconsommation se chiffre à plus d'un demi million de dollars et l'impact environnemental en terme de GES se monte à 1800 tonnes de CO₂.

Un programme d'entretien répondant aux normes des fabricants est en place pour tous les véhicules de TIC45, ce qui permet d'assumer que le nombre de véhicules anormalement polluants est faible. Néanmoins, la modélisation des taux

d'émission suggère qu'une majorité des véhicules du parc actuel de TIC45 échouerait un test d'inspection/maintenance tel que le programme AirCare (cycle IM240) de la Colombie-Britannique.

L'analyse complétée montre donc que, si le parc de véhicules de TIC45 a une contribution générale légèrement supérieure à la moyenne des véhicules des mêmes classes, son entretien et renouvellement lui assurent un bon positionnement en vue de l'atteinte des objectifs du protocole de Kyoto. Le tableau suivant résume les tendances observées. Pour les polluants autres que le CO₂, le bilan annuel présenté est basé sur la moyenne des scénarios de janvier et juillet 2002. Le CO₂ comprend les entreprises A et B. La diminution de CO₂ est principalement attribuable à la diminution du volume d'activités de l'entreprise A et à l'amélioration des capacités des mini-fourgonnettes.

Tableau 4.1 : Bilan des émissions atmosphériques de TIC 45

année	CO ₂ t/an	CO t/an	HC _{TOG} t/an	NO _x t/an	PM ₁₀ kg/an	SO ₂ kg/an	NH ₃ kg/an
2002	94 780	1560	100	157	3501	8466	7271
2001	101 910	-	-	-	-	-	-
1990	107 260	-	-	-	-	-	-

Des améliorations additionnelles seraient cependant atteignables, et on résume ci-après quelques pistes à explorer afin de poursuivre la démarche amorcée.

4.2 Recommandations

Afin de diminuer ses émissions atmosphériques, trois niveaux d'intervention ont été identifiés pour TIC45 :

1. comportement humain;
2. attitudes de gestion;
3. apport technologique.

Les recommandations proposées ci-dessous visent la réduction du CO₂ et des autres polluants. Le lecteur doit garder à l'esprit que ces deux problématiques sont différentes, et que par conséquent, les approches de gestion varient :

- pour réduire le CO₂, il faut diminuer la consommation de carburant. Il s'agit donc d'une approche basée d'abord sur la gestion et la conscientisation ;
- pour réduire les autres gaz, une approche technologique peut être efficace, et combinée à une réduction de la consommation, un gain notable peut être obtenu.

4.2.1 Agir au niveau du comportement humain

Ces recommandations d'actions ont l'avantage marqué de cibler des interventions à coût zéro, rendues possibles par l'adhésion volontaire du personnel de l'entreprise à un comportement.

Améliorer la formation des conducteurs

L'adoption de comportements plus respectueux de l'environnement par les conducteurs demande qu'ils soient informés et sensibilisés des conséquences de leurs actions et de l'importance que leur employeur accorde à cette problématique. L'ajout d'un volet conduite et écocivisme dans les programmes de formation des conducteurs de l'entreprise et la tenue de séances de mise à jour périodiques est une façon de transmettre les nouvelles valeurs de façon claire. Ce programme pourrait aborder des thèmes particuliers en les reliant aux émissions tels que le respect des limites de vitesse, la modération des accélérations et freinages brusques, la limitation de la marche au ralenti et la sensibilisation aux impacts induits par la climatisation ou la surcharge transportée à bord des véhicules. Un carrefour des informations, sur le site Intranet de la compagnie, permettrait de partager les renseignements et les réalisations en matière de conduite plus respectueuse de l'environnement.

Mettre en place un programme d'encouragement à l'économie de carburant

Le but de cette initiative serait de lier directement les attitudes de conduite à un renforcement positif tangible. La consommation de carburant (L/100km) pour chaque classe de véhicule de l'entreprise serait évaluée sur une base périodique. Ces taux de consommation seraient ensuite comparés à un objectif fixé pour chacune de ces classes. Une évaluation annuelle permettrait de redistribuer une part des économies de carburant dans des projets choisis par les employés. Si

l'objectif est excédé, une mise à jour conduite et écocivisme serait offerte aux conducteurs.

Instaurer un grand ménage annuel des véhicules de techniciens

Les véhicules de certains groupes d'employés sont appelés à transporter une quantité importante de matériel. L'accumulation de matériel inutilisé entraîne une surconsommation de carburant et une surémission de polluants. À chaque printemps, un grand ménage des véhicules pourrait être organisé, et une pesée avant et après l'exercice permettrait de convertir la diminution de poids en réduction de CO₂ attendue. Cette information serait communiquée au conducteur, afin d'inculquer le réflexe de transporter seulement le nécessaire.

Établir un programme de limitation de la marche au ralenti

L'entreprise a réalisé quelques projets en ce sens. Il serait avantageux de combiner ces efforts avec le programme d'encouragement à l'économie de carburant décrit ci-dessus afin d'avoir un élément motivateur. Le bien fondé de la limitation de la marche au ralenti pourrait être souligné dans les cours conduite et écocivisme.

Favoriser le transport en commun, et le covoiturage

L'entreprise pourrait encourager le transport en commun et le covoiturage pour les employés dont la nature du travail s'y prête bien. Des programmes spécifiques s'adressant aux entreprises sont offerts par les sociétés de transport en commun, visant notamment à maximiser le nombre de passagers par voiture pour se rendre au travail et à améliorer la desserte d'autobus. Une bonne partie des bureaux de l'entreprise étant situés en zone urbaine où la disponibilité de stationnement est faible, cette mesure permettrait de réduire le fardeau fiscal lié au maintien des stationnements et l'impact environnemental lié aux déplacements.

Encourager le télétravail et la téléconférence

Le gouvernement fédéral a implanté dans la région métropolitaine de Toronto et ailleurs en Ontario en juin 2000 un Plan ministériel d'action contre le smog (Canada 2002). Ce plan demande entre autre d'aviser les employés des

ministères fédéraux à l'avance des jours d'alerte au smog afin d'en tenir compte dans leurs décisions de télétravail. Ce genre d'approche ciblée pourrait être appliquée à TIC45. D'une manière plus générale, le travail pourrait être repensé dans une optique de minimisation des déplacements. Les gains étant au niveau du temps, des coûts et des impacts liés au transport du personnel.

4.2.2 Agir au niveau des attitudes de gestion

Ces recommandations visent principalement les lignes directrices encadrant la poursuite des activités de l'entreprise.

Bonifier le contenu des bases de données

Les bases de données de TIC45 recèlent l'information nécessaire pour modéliser les émissions atmosphériques de manière satisfaisante. Afin de faciliter cette tâche, il serait opportun d'uniformiser les dénominations lors de la saisie des informations. Le contenu des champs de saisie (ex : type de carburant, identification du véhicule) pourrait être contrôlé lors de l'entrée des données (ex : menus déroulant). Afin de faciliter la modélisation des polluants, les classes d'émissions définies dans MOBILE pourraient s'ajouter aux groupes de véhicules déjà existants dans la base de données.

Assurer le suivi des émissions de l'entreprise

La modélisation des émissions liées au transport pourrait devenir une partie intégrante du bilan environnemental de l'entreprise. Une compilation des données de pollution (ex : CO₂, CO, NO_x, HC) réalisée annuellement permettrait de suivre l'évolution des émissions en plus d'éclairer les processus de gestion. Un ratio émissions atmosphériques/chiffres d'affaires pourrait servir d'indicateur pour suivre cette évolution.

Intégrer la dimension environnementale dans Gestion parc automobile

Une dimension environnementale plus formelle pourrait être intégrée dans le groupe chargé de la gestion des véhicules routiers de TIC45. Le catalogue offert pour la sélection des véhicules par les membres de l'entreprise pourrait intégrer des indicateurs verts pour le choix des véhicules. La consommation de carburant

et le coefficient de traînée des véhicules pourraient figurer parmi ces critères. L'analyse du cycle de vie des véhicules pourrait s'ajouter aux critères décisionnels lors du renouvellement de la flotte afin de tendre vers une durée de vie utile optimale dans chaque classe de véhicules. De plus, le nombre de véhicules neufs acquis par l'entreprise lui confère la possibilité de soumettre des demandes spécifiques aux manufacturiers automobiles. Ces options pourraient viser des gains environnementaux (ex : moteur mieux adapté aux conditions d'utilisation, coffre de toit intégré pour les échelles).

Instaurer un programme d'inspection/maintenance interne à l'entreprise

Plus de la moitié des véhicules de TIC45 ne sont soumis à aucun test d'émission. L'entreprise pourrait se doter d'un programme simplifié de vérification des émissions afin de déceler les véhicules fortement polluants et corriger la situation. L'entreprise possède déjà l'instrumentation nécessaire à la vérification des émissions de ses véhicules ontariens soumis au programme d'inspection/maintenance Drive Clean. De manière périodique, les émissions des véhicules québécois pourraient être vérifiées à l'aide de ces équipements. Ceci compléterait le programme d'entretien déjà en place.

Limiter la vitesse de pointe des véhicules

Plusieurs entreprises limitent mécaniquement la vitesse de pointe de leurs véhicules à 90km/h pour des raisons de sécurité, d'économie de carburant et d'entretien. Ceci permettrait de réduire substantiellement les émissions de polluants et la surconsommation de carburant en zone rurale et sur autoroute. Le respect de cette limite peut être vérifié à l'aide d'un tachygraphe, ou par l'entremise du système de diagnostic embarqué [OBD].

Vidanger les réservoirs des véhicules au rancart

Les besoins de l'entreprise fluctuant au cours de l'année, plusieurs véhicules se trouvent au rancart pour des périodes relativement longues. La quantité de carburant des réservoirs de ces véhicules pourrait être réduite au minimum afin de minimiser les pertes fugitives par évaporation. Pour la modélisation au 1^{er}

juillet 2002, les pertes par évaporation pour le parc de TIC45 représentent la moitié des hydrocarbures imbrûlés émis annuellement (voir le Tableau 2.6).

Limiter l'utilisation d'équipements fortement polluants

L'entreprise possède un certain nombre d'équipements hors route dont les émissions ne sont pas réglementées. Parmi ceux-ci, les émissions des génératrices ont été évaluées dans ce mémoire et identifiées comme une source de pollution non négligeable. Comme la réglementation antipollution de ces appareils restera peu sévère à moyen terme, l'entreprise devrait explorer de nouvelles approches pour minimiser l'utilisation de ces équipements, en plus de favoriser leur remplacement par des systèmes moins polluants.

4.2.3 Apport technologique

Le resserrement de la législation favorise l'émergence de nouvelles technologies aptes à limiter la pollution liée aux transports. Cet apport technologique représente un investissement initial que les économies à long terme permettent parfois de compenser.

Étudier la possibilité d'augmenter la portion de véhicules diesel

Seulement 9% du carburant utilisé par l'entreprise est diesel. Reconnus pour la durabilité et les gains en consommation de carburant (donc une diminution du CO₂), les véhicules diesel émettent typiquement plus de particules. Ce désavantage sera vraisemblablement comblé dans les années à venir avec le resserrement des normes d'émissions. À l'aide d'une modélisation, il serait possible d'évaluer les impacts environnementaux de cette modification du parc.

Utilisation de carburant alternatif

Plusieurs études et projets pilotes ont évalué la faisabilité de l'utilisation de carburant autre que l'essence et le diesel. Une revue approfondie des implications quant à la pollution atmosphérique et à la consommation de carburant permettrait d'identifier des solutions applicables à TIC45. Il est important de réaliser ces analyses avec une approche basée sur le cycle de vie des équipements et du carburant afin de minimiser réellement la consommation d'énergie et la pollution.

Favoriser l'acquisition de véhicules moins énergivores

Le choix des véhicules est crucial, tant au niveau de la consommation de carburant que des émissions de polluants. Comme nous l'avons vu dans le cas des mini-fourgonnettes avec porte-échelle, un gain notable de consommation a été enregistré depuis 1990 grâce à une meilleure concordance de la puissance du moteur avec le mode d'utilisation du véhicule. Le choix des véhicules pourrait comporter une analyse d'optimisation des capacités du véhicule avec son mode d'utilisation. Cette approche favorise l'intégration de l'environnement dans les critères d'achat utilisés par le groupe gestion du parc automobile, ce qui devrait conduire aux améliorations souhaitées en matière d'émissions atmosphériques.

Demeurer critiques face aux gadgets antipollution

Plusieurs dispositifs censés limiter la pollution ou la consommation de carburant sont offerts comme alternative séduisante à la gestion des émissions atmosphériques. Les autorités compétentes (ex : EPA ou Environnement Canada) analysent la viabilité et l'efficacité des nombreuses trouvailles qui leur sont soumises pour vérification. Il serait prudent que TIC45 maintienne des liens étroits avec les organismes publient des informations à ce sujet.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION

Il ressort de ce travail que des modifications des processus de gestion au sein de l'entreprise pourraient être réalisées et produire des gains environnementaux intéressants avant même qu'il soit nécessaire de songer à des activités d'échantillonnage sur le terrain. Les difficultés rencontrées dans l'utilisation du système Galio pour la mesure des gaz brûlés ont d'ailleurs forcé de revoir l'approche de quantification des émissions atmosphériques de TIC45. Au terme de cette expérience, la non-pertinence de la collecte de données en conditions de conduite réelles à ce stade-ci pour TIC45 apparaît plus clairement.

En effet, un grand potentiel d'amélioration de la performance réside dans les modifications de l'utilisation des véhicules et systèmes de saisies de données existants. Ces changements semblent certainement plus aisés à mettre en oeuvre qu'une approche technologique. L'entreprise tient à jour suffisamment d'indicateurs sur l'utilisation de son parc de véhicules pour s'en servir, suite à certaines améliorations, pour évaluer de manière satisfaisante ses émissions atmosphériques. Dans ce contexte, la modélisation des polluants s'avère une alternative intéressante pour la gestion des émissions atmosphériques de l'entreprise dans les années à venir. Les mesures expérimentales, en autant qu'elles soient validées, pourraient servir à compléter les connaissances pour des scénarios requérant une analyse plus pointue, mais ne sont pas une limitation à l'amélioration de la performance de l'entreprise.

RÉFÉRENCES

- AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE [ADEME]. 2003. *La climatisation automobile : Impact énergétique et environnemental. Plaquette synthèse.* [En ligne]. http://www.ademe.fr/auto-diag/transports/rubrique/Publications/document/8pp_Clim_Auto_s.pdf (Page consultée le 24 novembre 2003)
- AIRCARE. 2003. The emissions testing program for Vancouver and the Fraser Valley. In *Site de AirCare*. [En ligne]. <http://www.aircare.ca> (Page consultée le 25 novembre 2003)
- AIRCARE. 2004. Post 1991 motor vehicle IM240 emissions standards. In *Site de AirCare*. [En ligne]. www.aircare.ca/aboutus/AirCareStandards.pdf (Page consultée le 1^{er} mars 2004)
- ASSOCIATION DES CONSTRUCTEURS EUROPEENS D'AUTOMOBILES [ACEA]. 2002. *ACEA's CO₂ commitment*. [En ligne]. Bruxelles : ACEA. http://www.acea.be/ACEA/brochure_co2.pdf (Page consultée le 23 février 2004)
- ASSOCIATION QUÉBÉCOISE DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE [AQLPA]. 2001. *Programme de promotion de l'inspection, l'entretien et l'efficacité énergétique des véhicules routiers au Québec : rapport final « un air d'avenir », phase II*. Saint-Léon-de-Standon : AQLPA. 97 p.
- AQLPA. 2003. *Projet pilote de mise à la ferraille « Faites de l'air »*. In *Site de l'AQLPA*. [En ligne]. <http://www.aqlpa.com/campagnes.htm#mettre> (Page consultée le 24 novembre 2003)
- BISSON, Bruno. 2003. « Pollution automobile: une requête judiciaire sera déposée contre Québec ». La Presse, samedi 25 octobre 2003, p. A26.

CALIFORNIA AIR RESSOURCES BOARD [CARB]. 2003a. Mobile source program. In *Site de CARB.* [En ligne]. <http://www.arb.ca.gov/msprog/msprog.htm> (Page consultée le 1er décembre 2003)

CARB. 2003b. *California's zero emission vehicle program – 2003.* [En ligne]. Sacramento, CA : CARB. 2p.

<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/factsheets/2003zevchanges.pdf> (Page consultée le 1er décembre 2003)

CANADA. ENVIRONNEMENT CANADA [EC]. 2001a. « Programme fédéral pour des véhicules, des moteurs et des carburants moins polluants » *Gazette du Canada.* [En ligne]. Ottawa : Imprimeur de la Reine pour le Canada. 135 :7. 449-457. http://www.ec.gc.ca/RegistreLCPE/documents/notices/g1-13507_n1.pdf (Page consultée le 16 mars 2004)

CANADA. EC. 2001b. « *Protocole d'entente: Émissions de véhicule, véhicule léger et camion léger, modèles des années 2001, 2002, 2003* » [En ligne]. [Ottawa] : EC. 4p. http://www.ec.gc.ca/air/pdfs/LEV_MOU_F.pdf (Page consultée le 16 mars 2004)

CANADA. 2002. Les alertes au smog et le Plan ministériel d'action contre le smog pour les ministères fédéraux. [En ligne]. In *Site du Gouvernement du Canada.* <http://www.on.ec.gc.ca/pollution/fpd/csap/intro-f.html> (Page consultée le 18 mars 2004)

CANADA. EC. 2003a. « Résumé de l'étude d'impact de la réglementation. *Gazette du Canada.* Ottawa : Imprimeur de la Reine. 137:1. 29-59.

CANADA. LOI CANADIENNE SUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT [1999]. 2003b. *Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs DORS/2003-2.* *Gazette du Canada.* Ottawa : Imprimeur de la Reine. 137:1. 6-28.

CANADA. GOUVERNEMENT DU CANADA. 2004. Initiative fédérale prêcher par l'exemple (IFPPE) – Parc automobile. In *Site du Gouvernement du Canada*. [En ligne]. <http://www.fhio-ifppe.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=0AA6BF40-1> (Page consultée le 5 mars 2004)

CENTER FOR ENVIRONMENTAL RESEARCH AND TECHNOLOGY [CE-CERT]. 2003. Development of capability for on-board, real-time measurement of vehicle mass emissions. In *Site de CE-CERT*. [En ligne]. <http://www.cert.ucr.edu/research/project.asp?project=169> (Page consultée le 24 février 2004)

CHAGNON, R. 1995. « *Consommation d'essence au ralenti* ». [Courriel électronique de R. Chagnon] [En ligne] (courriel envoyé le 7 mars 1995)

CHAGNON, R. 2003. « *Portion du parc équipée de la climatisation* ». [entrevue personnelle] (février 2003)

CHAGNON, R. 2004. « *Drive Clean et porte-échelle* ». [Courriel électronique à Erik Bélanger] [En ligne] (courriel reçu le 11 mars 2004)

CHEVALIER, D. 2004. « *Application de l'article 3.06 du Règlement 90* ». [Entrevue personnelle] (3 mars 2004)

CONFÉRENCE EUROPÉENNE DES MINISTRES DES TRANSPORTS [CEMT]. 2000. *L'évolution des émissions des véhicules*. [En ligne]. Paris : CEMT. 76 p. <http://www1.oecd.org/cem/topics/env/VehEmissfr.pdf> (Page consultée le 5 mars 2004)

DEGOBERT, Paul. 1992a. « Inventaire des polluants atmosphériques. » *Automobile et pollution*. 2^{ième} éd. Paris : Éditions Technip. P. 19-54.

DEGOBERT, Paul. 1992b. *Automobile et pollution*. 2^{ième} éd. Paris : Éditions Technip. 516p.

DRIVE CLEAN. 2003a. *Drive Clean Guide 2003*. [En ligne]. Toronto : Drive clean office, ministry of the environment, Ontario. 25p. PIBs #3725e03 http://www.driveclean.com/drivecleanguide/drivecleanguide_2003.pdf (Page consultée le 7 mars 2004)

DRIVE CLEAN. 2003b. Ontario's drive clean. In *Site de drive clean*. [En ligne]. <http://www.driveclean.com/> (Page consultée le 25 novembre 2003)

DURBIN, Thomas D., NORBECK, Joseph M. 2002. "The effects of repairs on tailpipe emissions for On-Board Diagnostics II-equipped vehicles with the malfunction indicator light illuminated". *Journal of the Air & Waste Management Association*. 52 :9. 1054-1063.

ENVIRONNEMENT CANADA [EC]. 2003a. *Inventaire canadien des gaz à effet de serre : 1990-2001*. [En ligne]. Hull : EC. 317 p.
http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/1990_01_report/1990_01_report_f.pdf (Page consultée le 4 mars 2004)

EC. 2003b. Principaux contaminants atmosphériques. In *Site EC*. [En ligne]. http://www.ec.gc.ca/pdb/ape/cape_home_f.cfm (Page consultée le 16 mars 2004)

EC. 2003c. DOES2^{MD} : Système portable d'échantillonnage, sur le terrain, des gaz d'échappement des diesels de grosse cylindrée des véhicules routiers et des véhicules hors route. In *Site EC*. [En ligne].
http://www.etcentre.org/organization/mbdo/mbdo_does2_1_f.html (Page consultée le 25 février 2004)

EC. 2003d. *Study of light duty vehicle exhaust emissions emissions and fuel consumption form a TIC45van equipped with a DC/AC inverter*. Ottawa : EC. 9p. TIC45 Inverter Fuel Consumption Testing Report #03-23.

EC. 2004. Archives climatiques nationales. In Site EC. [En ligne]. <http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca> (Page consultée le 4 février 2004)

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [EPA]. 2001. EPA's new generation mobile source emissions model: initial proposal and issues. [En ligne]. Washington : EPA. 52p. EPA420-R-01-007.

<http://www.epa.gov/otaq/models/ngm/r01007.pdf> (Page consultée le 10 février 2004)

EPA. 2002. *Exhaust emission factors for nonroad engine modeling - spark ignition.* [En ligne]. Washington: EPA, Office of Transportation and Air Quality. 44p. EPA420-P-02-015. <http://www.epa.gov/otaq/models/nonrdmdl/p02015.pdf> (Page consultée le 15 février 2004)

EPA. 2003. Mobile source emissions - past, present, and future. In Site EPA. [En ligne]. <http://www.epa.gov/otaq/inventory/overview/solutions/milestones.htm> (Page consultée le 1^{er} décembre 2003)

EPA. 2004a. MOBILE6 vehicle emission modeling software. In Site EPA. [En ligne]. <http://www.epa.gov/otaq/m6.htm> (Page consultée le 31 janvier 2004)

EPA. 2004b. MOBILE6 technical documentation index. In Site EPA. [En ligne]. <http://www.epa.gov/otaq/models/mobile6/m6tech.htm> (Page consultée le 31 janvier 2004)

EPA. 2004c. Environmental technology verification (ETV) program. In Site EPA. [En ligne]. <http://www.epa.gov/etv/> (Page consultée le 13 mars 2004)

ENVIRONMENTAL SERVICES ASSOCIATION OF ALBERTA [ESAA]. 2003. ARPEL *Environmental Project, Phase 3.* [En ligne]. Edmonton : ESAA. 8p. <http://www.esaa.org/docs/ARPELEnglish.pdf> (Page consultée le 2 mars 2004)

ÉTATS-UNIS. CODE OF FEDERAL REGULATIONS [CFR]. 2003a. *Control of emissions from new and in-use highway vehicles and engines.* [En ligne]. Washington : National archives and records administration. Title 40, Volume 16, Chapter I, Parts 86.1-86.599.

http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx_03/40cfr86a_03.html (Page consultée le 16 mars 2004)

ÉTATS-UNIS. CFR. 2003b. *Control of emissions from new and in-use highway vehicles and engines.* [En ligne]. Washington : National archives and records administration. Title 40, Volume 17, Chapter I, Parts 86.600-86.2500. http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx_03/40cfr86_03.html (Page consultée le 16 mars 2004)

ÉTATS-UNIS. CFR. 2003c. *Requirements for preparation, adoption, and submittal of implementation plans.* [En ligne]. Washington : National archives and records administration. Title 40, Volume 2, Chapter I, Part 51.100. http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx_03/40cfr51_03.html (Page consultée le 16 mars 2004)

ÉTATS-UNIS. 2003d. *Control of emissions from nonroad spark-ignition engines at or below 19 kilowatts.* [En ligne]. Washington : National archives and records administration. Title 40, Volume 18, Chapter I, Parts 90.1-90.1207. http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx_03/40cfr90_03.html (Page consultée le 16 mars 2004)

FAY, James A., GOLOMB, Dan S. 2002. *Energy and the Environment.* 1st ed. New-York : Oxford University Press. 314p.

FREY, H. Christopher, UNAL, Alper, CHEN, Jianjun. 2002. *Recommended strategy for on-board emission data analysis and collection for the new generation model.* [En ligne] Raleigh, NC : Department of Civil Engineering, North Carolina State University. 272p. <http://www.epa.gov/otaq/models/ngm/ncsu.pdf> (Page consultée le 25 février 2004)

Furuholz, E. (1995). "Life Cycle Assessment of Gasoline and Diesel." *Ressources, Conservation and Recycling*. 14: 251-263.

GILBERT, Richard. 2000. "Sustainable mobility in the city". *URBAN 21, Global conference on the urban future*. Toronto : Centre for sustainable transportation. 23p. [En ligne]. www.cstctd.org/CSTadobefiles/sustainablemobility.pdf (Page consultée le 2 novembre 2003)

GLOBAL REPORTING INITIATIVE [GRI]. 2002. *Lignes directrices pour le reporting développement durable*. [En ligne]. Paris. 99p. http://www.globalreporting.org/guidelines/Guidelines2002_FR.pdf (Page consultée le 7 février 2004)

GRI. 2004. In Site GRI. [En ligne]. <http://www.globalreporting.org> (Page consultée le 7 février 2004)

GOURLEY, D. 2004. "Catalytic converter life". [Courriel électronique à Erik Bélanger] [En ligne] (courriel reçu le 1^{er} mars 2004)

GOURLEY, D.I., STEWART, S.J., WONG, J., LOO, S. 2003. *AirCare – results and observations in 2001 and 2002 (Full Version)*. [En ligne]. Burnaby : Pacific vehicle testing technologies Ltd. 133 p.
<http://www.aircare.ca/aboutus/pdf/2003Report-FinalVersion.pdf> (Page consultée le 23 février 2004)

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'EVOLUTION DU CLIMAT [GIEC]. 1997. *Lignes Directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - version révisée 1996 – Manuel simplifié (Volume 2)*. [En ligne]. Bracknell, R.-U : GIEC. 336 p.
<http://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/gl/french.htm> (Page consultée le 22 février 2004)

GUTHRIE, Jeffrey, SABOURIN, René. 2003. *Teneur en soufre des combustibles liquides 2002*. [En ligne]. Gatineau : Environnement Canada, Division des combustibles. 81 p.
http://www.ec.gc.ca/energ/fuels/reports/SulphurLiquid/2002Sulphu_Report_f.pdf
(Page consultée le 10 février 2004)

GUTHRIE, Jeffrey, SABOURIN, René, BRUNET, Elysia. 2003. *Le benzène dans l'essence au Canada : Rapport sur les effets du Règlement sur le benzène dans l'essence 2002*. [En ligne]. Gatineau : Environnement Canada, Direction du pétrole, du gaz et de l'énergie. 77 p.
http://www.ec.gc.ca/energ/fuels/reports/Benz_2002/BenzeneReport2002_f.pdf
(Page consultée le 10 février 2004)

HAAGEN-SMIT, A.J. 1952. Chemistry and physiology of Los Angeles smog. *Industrial and Engineering Chemistry*. 44 :6. 1342-1346.

HELLMAN, Karl H., HEAVENRICH, Robert M. 2003. *Light-duty automotive technology and fuel economy trends: 1975 through 2003*. [En ligne]. Ann Arbor : EPA. 71 p. EPA420-R-03-006.
<http://www.epa.gov/otaq/cert/mpg/fetrends/r03006.pdf> (Page consultée le 17 février 2004)

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. 2001. *Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press. 881p.

JACKSON, Tracie R. 2001. *Fleet characterization data for MOBILE6: development and use of age distributions, average annual mileage accumulation rates, and projected vehicle counts for use in MOBILE6*. [En ligne]. Washington: EPA, Office of Transportation and Air Quality. 59p. EPA420-R-01-047.
<http://www.epa.gov/otaq/models/mobile6/r01047.pdf> (Page consultée le 28 février 2004)

JIMENEZ-PALACIOS, Jose Luis. 1999. *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing.* 360p. Thèse de doctorat en génie mécanique, Massachusetts Institute of Technology.

KIM, Hyung Chul, KEOLIAN, Gregory A., GRANDE, Darby E., BEAN, James C. 2003. "Life cycle optimization of automobile replacement: model and application". *Environmental Science & Technology*. 37 :23. 5407-5413.

LABELLE, Christine. 1998. *Les effets du smog sur la santé des canadiens.* Ottawa : Bibliothèque du Parlement. 24 p. PRB 98-4F.

LANDMAN, Larry C. 2002. *Updating fuel economy estimates in MOBILE6.3.* [En ligne]. Washington : EPA, Office of Transportation and Air Quality. 42 p. M6.GHG.001. www.epa.gov/otaq/models/mobile6/p02005.pdf (Page consultée le 22 février 2004)

MCMILLAN, E. 2003. "TIC45 idle time". [Courriel électronique à Erik Bélanger] [En ligne] (courriel reçu le 22 décembre 2003)

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE [MEF]. 1997. *La qualité de l'air au Québec, de 1975 à 1994.* [En ligne]. Québec : MEF. 52p. <http://www.menv.gouv.qc.ca/air/qualite/air.pdf> (Page consultée le 29 novembre 2003)

MONTRÉAL. 1986. *Règlement 90 : Règlement relatif à l'assainissement de l'air et remplaçant les règlements 44 et 44-1 de la Communauté urbaine de Montréal [C.U.M.]*. [En ligne]. Montréal : C.U.M. <http://services.ville.montreal.qc.ca/aireau/fr/pdf/reg90f.pdf> (Page consultée le 16 mars 2004)

MUNSLOW, B. 2004. « RE: Drive Clean et porte-échelle ». [Courriel électronique à Erik Bélanger] [En ligne] (courriel reçu le 23 mars 2004)

NATIONS UNIES. 1992. *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques [CCNUCC]*. [En ligne]. New-York : Nations Unies. 31p. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf> (Page consultée le 16 mars 2004)

ONAN. 1995. "Commercial 4500 gensex, gasoline 4500". Brochure publicitaire de la compagnie Onan.

ONTARIO. LOI SUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT. 1990. *Moteurs et véhicules automobiles, L.R.O. 1990, Chapitre E.19, Partie III*. [En ligne]. [Toronto] : Imprimeur de la reine pour l'Ontario. <http://www.canlii.org/on/loi/lcon/20040304/e-19/tout.html> (Page consultée le 16 mars 2004)

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION [ISO]. 1991. *Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes – Partie 1 : Diaphragmes, tuyères et tubes de Venturi insérés dans des conduites en charge de section circulaire*. 1^{ère} éd. Genève : ISO. Norme internationale de la Suisse ISO5167-1.

OUEDRAOGO G., Alain. 2003. *Statégies de gestion des émissions atmosphériques d'une flotte de véhicules – application à TIC45*. 24p. Rapport non publié.

QUÉBEC. LOI SUR LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT. 1978. *L'assainissement de l'atmosphère L.R.Q., Q-2, Section VI, a.51*. [En ligne]. [Québec] : Éditeur officiel du Québec. <http://www.canlii.org/qc/loi/lcq/20040210/q-2/tout.html> (Page consultée le 16 mars 2004)

QUÉBEC. LOI SUR LA QUALITE DE L'ENVIRONNEMENT. 1985. *Règlement sur la qualité de l'atmosphère LRQ. Q-2, r.20. Section XXX.1 : Émissions des véhicules automobiles*. [En ligne]. [Québec] : Éditeur officiel du Québec. <http://www.canlii.org/qc/regl/rcqc/20040210/q-2r.20/tout.html> (Page consultée le 16 mars 2004)

QUÉBEC. LOI SUR LES PRODUITS ET LES ÉQUIPEMENTS PÉTROLIERS. 1999. *Règlement sur les produits et les équipements pétroliers c. P-29.1, r.2. D. 156-99, 1999 G.O. 2, 461.* [En ligne]. [Québec] : Éditeur officiel du Québec. <http://www.canlii.org/qc/regl/rcqc/20040210/p-29.1r.2/tout.html> (Page consultée le 16 mars 2003)

QUÉBEC. LOI SUR LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT. 2002. «*Projet de règlement sur les halocarbures L.R.Q., c. Q-2*». Gazette officielle du Québec. Québec : Éditeur officiel du Québec. 134:38. 15p.

RESSOURCES NATURELLES CANADA [RNCAN]. 2003. *Guide de consommation de carburant 2003*. Ottawa : Office de l'efficacité énergétique. 66p.

RNCAN. 2004. Consommation d'énergie au Canada - Office de l'efficacité énergétique. In *Site RNCAN*. [En ligne]. <http://oee.nrcan.gc.ca/neud/apd/> (Page consultée le 15 mars 2004)

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS [SAE]. 1992. *Constant volume sampler system for exhaust emissions measurement*. Troy : SAE. 19p. SAE J1094.

SAE. 1993. *Instrumentation and techniques for exhaust gas emissions measurement*. Troy : SAE. 8p. SAE J254.

SAE. 1995a. *Continuous hydrocarbon analysis of diesel emissions*. Troy : SAE. 5p. SAE J215.

SAE. 1995b. *Measurment of carbon dioxide, carbon monoxide, and oxides of nitrogen in diesel exhaust*. Troy : SAE. 5p. SAE J177. 11p.

STATION EXPERIMENTALE DES PROCEDES PILOTES EN ENVIRONNEMENT [STEPPE]. 2004. *État d'avancement des campagnes d'échantillonnages : parc automobile et génératrices*. 15p. Rapport non publié.

STEDMAN, Donald H., BISHOP, Gary A., POKHAREL, Sajal S. 2002. "An on-road motor vehicle emissions inventory for Denver: an efficient alternative to modeling". *Atmospheric Environment*. Volume 36:numero 33. 5177-5184.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE [UNFCCC]. 1997. *Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. [En ligne]. Kyoto : UNFCCC. 24 p. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf> (Page consultée le 18 novembre 2003)

UNFCCC. 2003a. Kyoto protocol thermometer. In *Site de l'UNFCCC*. [En ligne]. http://unfccc.int/resource/kpthermo_if.html (Page consultée le 2 décembre 2003)

UNFCCC. 2003b. *Caring for climate : a guide to the climate change convention and the Kyoto protocol*. [En ligne]. Bonn : UNFCCC. 28p. http://unfccc.int/resource/cfc_guide.pdf (Page consultée le 10 décembre 2003)

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY [DOE]. 2004. Frequently asked questions. In *Site DOE*. [En ligne]. <http://www.fueleconomy.gov/feg/info.shtml#estimates> (Page consultée le 11 février 2004)

UNIVERSITY OF DENVER. 2004. Fuel efficiency test data [FEAT]. In *Site FEAT*. [En ligne]. <http://www.feat.biochem.du.edu/whatsafeat.html> (Page consultée le 6 mars 2004)

TERMIUM. 2003. Base de données terminologiques et linguistiques du Gouvernement du Canada. In *Site du Bureau de la traduction, Travaux publics et services gouvernementaux*. [En ligne]. <http://www.termium.com> (Page consultée le 1^{er} décembre 2003)

WARK, Kenneth, WARNER, Cecil F. 1981. *Air pollution : its origin and control*. 2nd ed. New-York : HarperCollins. 526p.

ANNEXES

ANNEXE A : Mesure des gaz brûlés en laboratoire

Les informations contenues dans cette annexe sont inspirées des recommandations SAE J254 (SAE 1993) et SAEJ1094 (SAE 1992) qui spécifient l'instrumentation et les techniques relatives à la mesure des émissions d'échappement de moteur à essence pour véhicules passagers et camionnettes.

Banc d'essai ou dynamomètre

La mesure en laboratoire des émissions pour un véhicule routier est typiquement effectuée en installant le véhicule sur un banc d'essai simulant les conditions routières. Celui-ci est typiquement composé d'un tambour d'inertie dont la rotation est assurée par les roues motrices du véhicule. Le tambour est freiné par un système d'absorption d'énergie (mécanique, hydraulique, ou électrique) simulant la résistance au roulement du véhicule sur route (résistance de l'air, des pneus, puissance requise pour accélérer). L'opérateur du véhicule règle la vitesse selon un abaque indiquant la vitesse cible pour chaque instant du test. L'abaque traduit une planification établie et reproductible (ex : cycles FTP, SFTP, US06, MVEG, etc.).

Collecte des gaz brûlés

Le système de collecte des gaz d'échappement prélève l'échantillon de gaz brûlés pour analyse subséquente des polluants. La collecte peut s'effectuer selon deux méthodes distinctes, soit un système d'échantillonnage en continu (*continuous sampling*) ou un système d'échantillonnage à volume constant avec sacs d'accumulation (*constant volume sampler [CVS]*).

Système d'échantillonnage en continu

Le système d'échantillonnage en continu est typiquement constitué d'une sonde qui prélève une portion de l'échappement. L'eau, produit normal de la combustion d'hydrocarbures, peut être source d'erreur dans les analyses subséquentes de gaz brûlés. Ainsi, l'échantillon prélevé est divisé en deux voies. Dans la première voie, une unité de condensation-dessication permet l'analyse en base sèche (CO, CO₂, O₂). L'autre voie (analyse en base humide) est chauffée pour éviter la condensation. Ceci est nécessaire pour les NO_x et HC du fait de leur solubilité dans l'eau. Une pompe à volume constant, des filtres à particule, des régulateurs de

débit et un débitmètre viennent compléter l'installation. Le tout est relié par une tuyauterie en acier inoxydable ou en téflon ce qui limite l'adsorption d'hydrocarbures. Il en va de même pour les autres composantes en contact avec l'échantillon (ex : diaphragme de pompe, raccords). L'étanchéité est vérifiée en bouchant la sonde; un débit dépassant 1% du débit total doit être corrigé. Les valeurs obtenues sont des concentrations volumiques pour chaque polluant mesuré.

Système d'échantillonnage à volume constant avec sacs d'accumulation

Le système d'échantillonnage à volume constant est similaire au système d'échantillonnage en continu, avec en plus la capacité de fournir des données d'émission en base massique. L'échantillon de gaz brûlés est composé de la totalité de l'échappement, complété par un volume d'air de dilution variable. Le débit total (gaz brûlés et air de dilution) demeure constant. Les gaz brûlés dilués sont collectés dans des sacs d'accumulation pour analyse subséquente de la composition en polluants de l'échantillon.

L'un ou l'autre de ces systèmes achemine l'échantillon aux analyseurs de gaz brûlés. Pour la mesure du CO et du CO₂, un analyseur non dispersif à absorption dans l'infrarouge [NDIR] est recommandé. L'analyseur à chimiluminescence est le plus répandu pour la mesure des NO_x, tandis que la mesure des hydrocarbures imbrûlés s'effectue de préférence avec un détecteur à ionisation de flamme [FID]. Ces appareils sont décrits ci-dessous. Pour la mesure de O₂, des analyseurs à polarographie ou paramagnétiques peuvent être utilisés. Les données sont traitées par un module d'acquisition de données tenant compte des différents temps de réponse des analyseurs.

Analyseur non dispersif à absorption dans l'infrarouge [NDIR]

Ce type d'analyseur est principalement utilisé pour déterminer les concentrations de CO et de CO₂ dans l'échappement. Les longueurs d'onde du CO et du CO₂ étant proches de celles de la vapeur d'eau, l'analyse doit être faite sur une base sèche. Les hydrocarbures imbrûlés et le monoxyde d'azote peuvent aussi être mesurés par cette technique, bien que déconseillé. Comme les HC et les NO_x sont

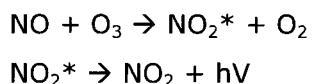
partiellement solubles dans l'eau, une partie de ces polluants peut être perdue lors de l'assèchement de l'échantillon. De plus, la méthode NDIR impose de faire passer dans l'appareil des gaz froids, ce qui élimine la possibilité de chauffer l'échantillon de gaz.

L'analyseur NDIR détecte le différentiel d'énergie infrarouge absorbée entre une colonne contenant le gaz à analyser (échantillon) et une autre renfermant un gaz étalon non absorbant tel que l'air sec (référence). Le procédé utilise le principe d'absorption sélective des infrarouges par les molécules de gaz dans l'échantillon à mesurer. La radiation infrarouge traverse les deux colonnes de gaz pour aboutir sur deux cellules de détection physiquement jointes par un diaphragme. L'énergie infrarouge échauffe le gaz contenu dans ces cellules, causant un déplacement du diaphragme proportionnel à la différence d'énergie reçue par les deux détecteurs. L'amplitude du déplacement du diaphragme est une mesure des concentrations présentes; son mouvement est capté électriquement puis converti en un signal DC. Pour obtenir une oscillation du diaphragme et ainsi créer des impulsions électriques mesurables, une guillotine bloque alternativement l'une des deux sources lumineuses infrarouges. L'appareil comporte différentes échelles de sensibilité pour obtenir un maximum de précision selon la nature de l'échappement mesuré.

L'étalonnage de cet appareil est recommandé à la première utilisation, puis à chaque mois lorsqu'en période de test, tel que détaillé dans les recommandations SAE J177 (SAE 1995b) et SAE J254 (SAE 1993). La même procédure est recommandée suite à un remisage de plus d'un mois. Une vérification journalière des fuites, du zéro et du gain permet de prévenir une dérive des mesures. Finalement, quel que soit le type d'analyseur, il est essentiel de respecter la durée de préchauffage prescrite par le fabricant avant d'entamer les mesures.

Analyseur à chimiluminescence

Cet appareil est le plus commun pour l'analyse des oxydes d'azote, bien que des analyseurs NDIR aient déjà été utilisés. L'analyseur mesure la lumière émise par réaction du monoxyde d'azote avec de l'ozone. Lors du mélange d'un gaz contenant du NO avec de l'ozone dans une chambre de réaction (appelée convertisseur), une portion du NO₂ produit est instable (NO₂*). En retournant à son état stable, le NO₂ émet un photon, selon les réactions suivantes :



En présence d'un excès de O₃, la lumière émise est proportionnelle à la concentration de NO. Celle-ci peut être détectée par un filtre photomultiplicateur pour produire une sortie électrique. Pour la mesure des NO_x, un convertisseur transforme préalablement le NO₂ en NO et donne une lecture totale des deux composants. L'efficacité de cette conversion doit être vérifiée périodiquement à l'aide d'un gaz étalon. Si une dérive est notée, le test contenu dans la recommandation SAE J254 (SAE 1993) permet de corriger la température du convertisseur en vue d'atteindre une efficacité de conversion entre 97 et 100%.

Comme la réponse de l'analyseur est essentiellement linéaire en fonction de la concentration de NO, un seul gaz est requis pour l'étalonnage. Après vérification du zéro avec de l'air grade zéro, une courbe d'étalonnage à deux points est obtenue. Certains appareils ayant un comportement non linéaire, il est suggéré d'effectuer un étalonnage utilisant un minimum de quatre gaz (25, 50, 75, 100% de l'échelle choisie) pour s'en assurer.

Détecteur à ionisation de flamme [FID]

Ce détecteur permet de déterminer la composition totale en hydrocarbures d'un échantillon sur une base massique. L'appareil est composé d'un brûleur dans lequel une flamme de diffusion est alimentée par un combustible (hydrogène dilué dans un gaz inerte), de l'air ambiant et l'échantillon de gaz à mesurer. Les composés organiques, quand ils sont pyrolysisés dans une flamme d'hydrogène-air, produisent des espèces ioniques qui permettent au courant électrique de passer dans les gaz de combustion. On mesure le courant ionique qui est proportionnel à la teneur en composés organiques.

Comme le détecteur est sensible aux hydrocarbures, la tuyauterie doit être faite d'une matière inerte évitant l'adsorption. Pour éviter la condensation dans l'appareil, tout échantillon ayant un point de rosée au-delà de la température ambiante doit être préalablement asséché. Comme la réponse du détecteur FID varie linéairement avec la concentration en HC, seuls un gaz étalon et un gaz zéro sont nécessaires pour l'étalonnage (SAE 1993).

ANNEXE B : Remarques générales concernant l'utilisation de MOBILE

Méthode de mesure des imbrûlés et présentation des résultats dans MOBILE

Selon les espèces chimiques ciblées dans un échantillon d'hydrocarbures imbrûlés, la définition utilisée pour fournir les résultats varie. Le tableau ci-dessous synthétise les dénominations en vigueur dans le logiciel MOBILE6.2 pour la présentation des HC. Le terme FID HC réfère à la mesure des imbrûlés à l'aide d'un détecteur à ionisation de flamme, décrit à l'Annexe A.

Tableau B.1 : Méthodes d'agrégation des hydrocarbures imbrûlés

espèce	sigle	inclus FID HC	inclus méthane	inclus éthane	inclus aldéhyde
hydrocarbures totaux	THC	oui	oui	oui	non
Hydrocarbures non méthaniques	NMHC	oui	non	oui	non
composés organiques volatils	VOC	oui	non	non	oui
gaz organiques totaux	TOG	oui	oui	oui	oui
gaz organiques non méthaniques	NMOG	oui	non	oui	oui

Dans ce mémoire, le terme COVNM est utilisé pour décrire les composés organiques volatils non méthaniques. Cette définition regroupe les mêmes espèces que le terme VOC utilisé dans MOBILE. La méthode pour rapporter les taux d'émission dans le présent document est celle des gaz organiques totaux (TOG), sauf mention contraire.

Ventilation des hydrocarbures imbrûlés dans MOBILE

En plus d'offrir divers modes d'agrégation des HC, MOBILE détaille ceux-ci selon leur mode d'émission. Les HC regroupent les hydrocarbures imbrûlés à l'échappement et les pertes par évaporation [EVAP]. Le terme EVAP utilisé dans MOBILE définit un mode d'émission, sans distinction quant aux espèces de HC mesurées. Les pertes par évaporation modélisées dans MOBILE se subdivisent ainsi :

- *hot soak* : évaporation de carburant dans l'heure suivant la mise hors contact du moteur d'un véhicule.
- *diurnal* : évaporation de carburant résultant de l'augmentation de température au cours de la journée lorsque le véhicule est hors contact.

- *running* : évaporation en fonctionnement due à l'augmentation de température du carburant et des canalisations de carburant.
- *resting* : pertes minimes, mais continues de carburant aux joints de tuyauterie fautifs, à travers des canalisations perméables et autres composantes du système d'alimentation.
- *refueling* : vapeurs chassées du réservoir vers l'atmosphère lors du plein de carburant.
- *crankcase* : émissions du citerne, et plus généralement toute émission fugitive sortant de l'enveloppe moteur.

Définition du poids de véhicule pour la réglementation de l'EPA

Les normes d'émissions de polluants sont définies selon les particularités des véhicules routiers réglementés. La principale caractéristique utilisée est le poids du véhicule. Celui-ci est rapporté selon quatre méthodes différentes, présentées au tableau ci-dessous. Les acronymes utilisés sont les suivants :

- PNBV : poids nominal brut du véhicule
gross vehicle weight rating [GVWR]
- LVW : poids de véhicule chargé
loaded vehicle weight

Tableau B.2 : Définition du poids de véhicule utilisée par l'EPA

terme français	charge utile	poids à vide	poids de véhicule chargé	PNBV
terme anglais	<i>payload</i>	<i>curb weight</i>	<i>LVW</i>	<i>GVWR</i>
carrosserie		X	X	X
conducteur, carburant et options de base		X	X + 136 kg	X
passagers et matériel transporté	X			X

Note : LE PNBV inclus également le poids sur la flèche de tout véhicule ou élément de véhicule remorqué.

ANNEXE C : Paramètres de modélisation du parc de TIC45

Paramètres climatiques et composition du carburant (MOBILE)

Les paramètres obligatoires à définir dans MOBILE pour une modélisation de base (CO, HC et NO_x) sont les températures minimales et maximales durant la période de 24 heures modélisée, la tension de vapeur de l'essence, et la teneur en soufre du carburant (essence et diesel). La modélisation des autres polluants et des composés toxiques exige de détailler les propriétés de l'essence.

Les paramètres utilisés pour la modélisation du parc de TIC45 sont résumés au tableau ci-après. Les acronymes utilisés sont les suivants :

- MTBE : éther méthyltertiobutylique
- ETBE : éther de t-butyle et d'éthyle
- ETOH : éthanol
- TAME : amine tertiaire de méthoxyméthane

Tableau C.1 : Paramètres climatiques et composition du carburant

paramètres MOBILE6.2	TIC45	
	janvier	juillet
température au 1 ^{er} du mois 2002 (min/max, °C)	-13 à -8	23 à 32
normale 1971-2000 (min/max, °C)	-15 à -6	16 à 26
teneur en soufre, essence (ppm)	246	246
teneur en soufre, diesel (ppm)	324	324
diamètre maximal des particules (µm)	10	10
propriétés de l'essence		
tension de vapeur de l'essence (kPa)	97,8	68,3
concentration d'aromatiques (% volumique)	22,7	28,9
concentration d'oléfines (% vol.)	13,6	13,2
concentration de benzène (% vol.)	0,66	0,78
E200 (% vol. de carburant évaporé à 93,3°C)	53,7	49,2
E300 (% vol. de carburant évaporé à 148,9°C)	84,7	84
concentration en oxygénés (% volumique)		
MTBE	0,2	0,2
ETBE	0	0
ETOH	0,6	0
TAME	0	0

Les températures ont été extraites des données climatiques d'Environnement Canada (EC 2004). Les minimums et maximums utilisés dans la modélisation ont été obtenus en faisant la moyenne entre les normales climatiques canadiennes pour la période 1971-2000 et les températures journalières enregistrées au 1^{er} juillet ou au 1^{er} janvier 2002.

Les données relatives aux carburants sont extraites des rapports annuels sur les combustibles produits par Environnement Canada. La teneur en soufre est tirée du rapport « Teneur en soufre des combustibles liquides 2002 » (Guthrie, Sabourin 2003, p.55-56). Les autres propriétés de l'essence sont tirées du rapport « Le benzène dans l'essence au Canada : Rapport sur les effets du Règlement sur le benzène dans l'essence 2002 » (Guthrie, Sabourin, Brunet 2003, p.41-49).

Paramètres pour l'évaluation des émissions de GES autres que le CO₂

Même si les émissions de CO₂ des véhicules sont considérées comme indépendantes de la technologie, celles de CH₄ et de N₂O fluctuent selon le niveau d'avancement des dispositifs antipollution. Selon l'année de modèle du véhicule, on assigne un niveau de technologie antipollution tel que décrit dans l'inventaire canadien de GES (EC 2003a, p.38-41). Les véhicules du parc de TIC45 sont considérés équipés des dispositifs suivants :

Automobiles et camions légers à essence:

- post 1994 : convertisseur catalytique perfectionné à trois voies (niveau 1)
- 1987 à 1994 : convertisseur catalytique primitif à trois voies (niveau 0, usagé)

Véhicules utilitaires lourds à essence :

- post 1994 : convertisseur catalytique à trois voies
- 1987 à 1994 : système non catalytique

Véhicules utilitaires lourds diesel :

- post 1994 : système dépolluant perfectionné
- 1987 à 1994 : système dépolluant d'efficacité moyenne
- pré 1987 : aucun système dépolluant

Pour le bilan de GES de TIC45, on a utilisé les coefficients d'émissions pour le CH₄ et l'oxyde nitreux N₂O de l'inventaire canadien de GES 1990-2001 (EC 2003a, p.212). Ces taux d'émission en gramme par litre de carburant consommé sont détaillés au tableau ci-dessous. Une pondération par le nombre de véhicules, basée sur les niveaux de technologie antipollution respectifs a été appliquée pour chaque classe d'émissions.

En vue d'évaluer l'impact de la climatisation sur les émissions de GES, on a déterminé la portion du parc de TIC45 équipée de la sorte. L'hypothèse est que tous les véhicules neufs acquis depuis l'année 2000 sont équipés de la climatisation, exception faite des véhicules automobiles (LDGV) dont l'année a été fixée à 1998. Basé sur les travaux de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ADEME] (ADEME 2003), on a attribué une perte annuelle de fluide frigorigène (HFC R134a) de 93 g/an pour chaque véhicule doté de la climatisation. La fraction du parc équipée de la climatisation pour chaque classe d'émissions est présentée ci-dessous.

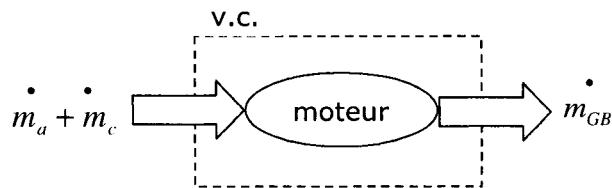
Tableau C.2 : Paramètres pour le calcul des GES autres que le CO₂

classe	coefficients d'émission		fraction climatisation
	CH ₄ (g/L)	N ₂ O (g/L)	
LDV	0,25	0,27	0,59
LDT2	0,23	0,51	0,35
LDT3	0,20	0,44	0,38
LDT4	0,19	0,41	0,82
HDV2B	0,19	0,86	0,35
HDV3	0,12	0,08	0,19
HDV4	0,12	0,08	0,33
HDV5	0,12	0,08	0,00
HDV8A	0,12	0,08	0,33

ANNEXE D : Calcul de rendement volumétrique

Calcul de rendement volumétrique

Le calcul ci-dessous permet de connaître le débit théorique de gaz brûlés sortant d'un moteur à combustion interne, en fonction du régime du moteur et de la cylindrée. L'exemple est pour un moteur de 3 litres fonctionnant en régime permanent à 2030 tours par minute. Le volume de contrôle [v.c.] est défini à l'extérieur du moteur :



Équation :

$$\eta_v = \frac{n_R \cdot \dot{m}_a}{\rho_a \cdot V_d \cdot RPM}$$

où n_R = nombre de révolution pour une production de puissance (2 pour un moteur à 4 temps)

\dot{m}_a = débit massique d'air à l'admission du moteur

\dot{m}_c = débit massique de combustible à l'admission du moteur

Hypothèses :

le carburant est de l'essence, en phase liquide avant d'entrer dans la chambre de combustion (donc de volume négligeable par rapport à l'air);

η_v = rendement volumétrique = 80%

ρ_a = densité de l'air à l'admission du moteur = 1,2 kg/m³ (basé sur une température de 25°C et une pression atmosphérique de 101,3 kPa)

V_d = cylindrée = 3 litres = 0,003m³

RPM = régime du moteur, en tour par minute = 2030 rpm

$$\dot{m}_a = \eta_v \cdot \rho_a \cdot V_d \cdot RPM \cdot \left(\frac{1}{n_R} \right)$$

$$\dot{m}_a = 0,8 \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,003 m^3 \cdot 2030 \frac{tour}{min} \cdot \left(\frac{1}{2} \right) = 2,923 \frac{kg}{min}$$

On suppose une combustion stoechiométrique : $\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} = 14,7$

On pose comme hypothèse que les gaz brûlés sont similaires à un gaz parfait :

$$Pv = nRT \text{ en terme de volume}$$

$$P \cdot Q = \left(\frac{\dot{m}}{M} \right) \cdot R \cdot T \text{ en terme de débit massique}$$

Par conservation de la masse, le débit à l'admission (air+combustible) est équivalent au débit à l'échappement :

$$\dot{m}_{GB} = \dot{m}_a + \dot{m}_c = 2,923 + \frac{2,923}{14,7} = 3,12 \frac{kg}{min}$$

$$\dot{Q}_{GB} = \frac{\dot{m}_{GB} \cdot R \cdot T_{GB}}{M_{GB} \cdot P_{GB}}$$

où \dot{Q}_{GB} = débit volumétrique de gaz brûlés (m^3/s);

T_{GB} = température des gaz brûlés, en degrés Kelvin (K);

M_{GB} = masse molaire des gaz brûlés, que l'on suppose identique à l'air ($kg/kmol$);

P_{GB} = pression à la sortie du volume de contrôle, en pascal (Pa ou kPa);

$$R = \text{constante universelle des gaz parfaits} = 8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

$$\dot{Q}_{GB} = \frac{3,12 \frac{kg}{min} \cdot 8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K} (220 + 273)K}{28,9 \frac{kg}{kmol} \cdot 101,3kPa} = 4,37 \frac{m^3}{min}$$

On a que $1 m^3 = 35,3 pi^3$, donc $\dot{Q}_{GB} \cong 154 \frac{pi^3}{min}$ ou 154 CFM

Conversion d'une concentration volumique d'un polluant en débit massique

L'exemple ci-dessus est repris pour évaluer le débit massique d'un polluant dont la concentration volumique est mesurée par un analyseur de gaz brûlés. Le débit de monoxyde de carbone est calculé et on considère le CO comme un gaz parfait. La concentration volumique de CO [CO] est de 0,014%.

Équation :

$$\dot{P} \cdot \dot{Q} = \dot{n} \cdot R \cdot T \text{ où } \dot{n} \text{ est le débit molaire}$$

Débit molaire de CO :

$$\dot{n}_{CO} = \frac{\dot{Q}_{CO} \cdot P_{GB}}{R \cdot T_{GB}} = \frac{\dot{Q}_{GB} \cdot [CO] \cdot P_{GB}}{R \cdot T_{GB}} = \frac{4,37 \frac{m^3}{min} \cdot 0,00014 \cdot 101300 Pa}{8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K} \cdot (220 + 273) K} = 0,01512 \frac{mol}{min}$$

Débit massique de CO :

$$\dot{Q}_{CO} = 0,01512 \frac{mol}{min} \cdot 60 \frac{min}{h} \cdot 28 \frac{g}{mol} = 25,4 \frac{g_{CO}}{h}$$

Exemple de pondération débit et gaz

Le calcul ci-dessous vise à corriger les écarts dans la mesure du débit de gaz brûlés par le système Galio pour un moteur fonctionnant à régime constant. La section pondération débit et gaz du *tableau 3.5 : Résultat des tests au ralenti (base massique)* utilise ce calcul. Supposant que les données brutes (valeurs affichées par Galio) sont un débit de CO de 3,8 g/h ($Q_{CO-Galio}$), un débit de gaz brûlés de 93,3 CFM ($Q_{GB-Galio}$), une concentration étalonnée (voir le tableau 3.2) en CO de 0,57% ($[CO]_{Galio}$) pour un gaz étalon contenant 0,5% de CO ($[CO]_{étalon}$) et un débit calculé par rendement volumétrique de 60 CFM (Q_{GB}), la pondération est la suivante :

$$Q_{CO} = Q_{CO-Galio} \cdot \frac{Q_{GB}}{Q_{GB-Galio}} \cdot \frac{[CO]_{étalon}}{[CO]_{Galio}} = 3,8 \cdot \frac{60}{93,3} \cdot \frac{0,5}{0,57} = 2,1 \text{ g/h}$$

Exemple de pondération CO₂

Comme la lecture de CO₂ par l'appareil Galio présente l'écart-type le plus faible, le calcul suivant applique l'écart entre les valeurs de CO₂ mesurées par l'appareil Galio et celles mesurées en laboratoire par Environnement Canada aux débits massiques des autres polluants. Les résultats apparaissent à la section pondération CO₂ du tableau 3.5.

Soit un débit de CO de 3,8 g/h ($Q_{CO-Galio}$), un débit de CO₂ de 28,5 kg/h ($Q_{CO2-Galio}$) et un débit de CO₂ mesuré par Environnement Canada de 8,42 kg/h Q_{CO2-EC} :

$$Q_{CO} = Q_{CO-Galio} \cdot \frac{Q_{CO2-EC}}{Q_{CO2-Galio}} = 3,8 \cdot \frac{8,42}{28,5} = 1,1 \text{ g/h}$$

ANNEXE E : Liste des équipements et schéma de l'étalonnage

LISTE DES ÉQUIPEMENTS, pour l'étalonnage du venturi Galio

- Conduite :

Diamètre intérieur = 6,065 po (154 mm)

- Soufflante :

Marque = Chicago Blower, modèle = design D/15 – 2T-15-16 (agencement 4)

Capacité = 1965 ACFM & 27,7 pouces d'H₂O (55,6 m³/min & 6,9 kPa)

- Moteur électrique :

Marque = CAEM, modèle = LR41711

Caractéristiques = 15 HP - 16 Amp - 575 VAC - 60 Hz

- Entraînement à fréquence variable :

Marque = Siemens, modèle = 6SE3221-FG40

- Sonde de température :

Thermocouple type 'T' :

Longueur = 10 cm, diamètre = 3 mm

Indicateur de température :

Marque = Omega, modèle = HH-23

- Plaque à orifice :

Marque = Flow Lin

Diamètre orifice = 4,549 po (115,5 mm), β = 0,750

- Sonde de pression (1)

1) mesure de la pression statique en amont de la plaque à orifice :

Marque = Omega, modèle = PX-26-005DV

Échelle = 250 \pm 0,1 mm Hg

- Indicateurs de pression (2) :

1) mesure de la pression statique en amont de la plaque à orifice :

Marque = Omega, modèle = DP-25S

S/N = 8345173 (8/98)

2) mesure du différentiel de pression à la plaque à orifice :

Marque = Alnor, modèle = AXD-510

Échelle = $20 \pm 0,01$ po H₂O ($5 \pm 0,003$ kPa)

S/N = 8045663 (1/98)

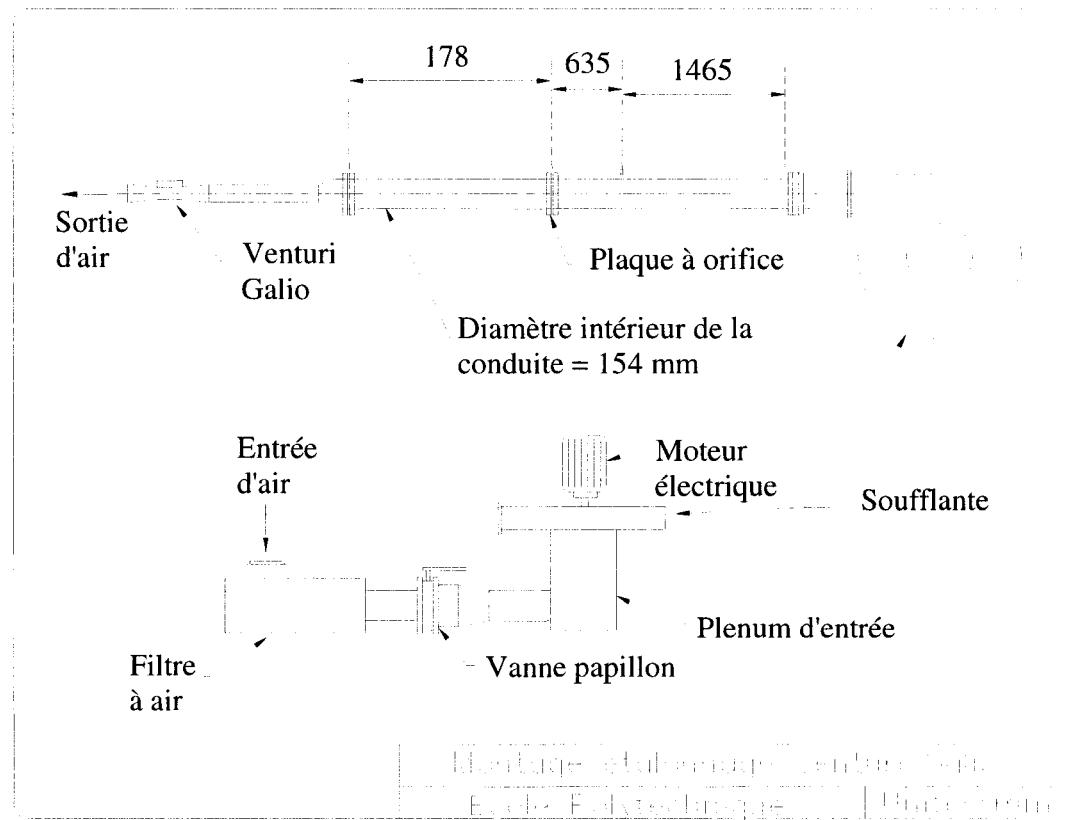


Figure E.1 : Schéma du montage pour l'étalonnage du venturi Galio

ANNEXE F : Fiche technique du système Galio

Les informations ci-dessous proviennent de la fiche technique du système Galio (soumission #0849C, 13 novembre 2000). Les capacités du débitmètre et de ses équipements connexes y sont présentées.

Galio Industrial Development Co.

SPECIFICATIONS: SMART 2000xfl

Measuring Ranges	Accuracy/Performance
Exhaust Gas flow range : 0- 180 cfm Engines up tp 4000 cc	+/- 0,5 % absolute
Exhaust Gas. Temp. 0-400 Deg. C J Type Thermomcouple	+/- 0,5% absolute
Exhaust Gas Pressure Diff. Sensor 0 - 12 " H2O, +/- 1000 mV	14 bits
CO: 0 - 45,5 kg/hr CO2 : 0 - 167 kg/hr HC: 0 - 7,5 kg/hr O2: 0 - 178 kg/hr NOx: 0 - 13,2 kg/hr	+/- 3,5% of Reading +/- 3,5% of Reading +/- 3,5% of Reading +/- 3,5% of Reading +/- 5% of Reading