

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

PAR
Guillaume NACHIN

CONSTRUCTION DE CYCLES NORMALISÉS SPÉCIFIQUES À DES FLOTTES DE
VÉHICULES UTILITAIRES POUR UN BILAN DES ÉMISSIONS POLLUANTES

MONTRÉAL, LE 28 AOÛT 2012



Guillaume Nachin, 2012



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mathias Glaus, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Patrice Seers, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Robert Hausler, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Julien Weiss, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 23 AOÛT 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier très chaleureusement mon directeur de recherche Mathias Glaus, dont la confiance, le soutien sans faille et l'inépuisable bonne humeur ont fait de ces deux années de travail une expérience riche en découvertes. Je remercie également mon codirecteur de recherche Patrice Seers, dont l'expertise, la disponibilité et la complicité m'ont à maintes reprises tiré d'affaire. Merci à Robert Hausler pour nos innombrables discussions informelles, si enrichissantes.

Un grand merci à *Budget Propane Inc.* et tout particulièrement à Stéphane Deschamps et Guy Marchand. Leur énergie et leur ouverture d'esprit ont permis une collaboration épanouissante.

Je remercie Maria Cendan pour sa sympathie et son implication. Merci aux étudiants de la STEPPE, mes voisins de bureau, pour leur aide, leur camaraderie et leurs sourires sans lesquels je n'aurais pas pris autant de plaisir dans ma recherche.

Merci à mes amis, ceux du 42.20 FM comme de la 8^e, ceux de Côte-des-Neiges, de Rosemont ou de Verdun. Leur présence m'a rassuré. Leur écoute, leur gentillesse et leur affection m'ont donné confiance et motivation. Leur soif de vivre m'a inspiré et apporté tant de choses.

Merci à Guillaume de m'avoir accompagné tout au long de mes études, à Compiègne comme à Montréal, et de continuer à m'encourager quelle que soit la distance qui nous sépare.

Enfin, un merci tout particulier à mes parents Hélène et Gilles pour leur amour et l'indéfectible soutien dont ils ont toujours fait preuve et qu'ils continuent de m'apporter.

CONSTRUCTION DE CYCLES NORMALISÉS SPÉCIFIQUES À DES FLOTTES DE VÉHICULES UTILITAIRES POUR UN BILAN DES ÉMISSIONS POLLUANTES

Guillaume NACHIN

RÉSUMÉ

Les cycles normalisés sont un outil essentiel dans la réalisation de bilans d'émissions polluantes de véhicules routiers. Ils permettent de transposer au laboratoire un comportement routier pour la mesure des taux d'émissions polluantes dans les conditions réelles d'opération.

Deux cycles spécifiques ont été développés, chacun étant représentatif des déplacements d'une flotte de véhicules utilitaires. Sur la base de l'état des connaissances dans le domaine, une méthodologie complète a été établie. La collecte des données de terrain a été réalisée par instrumentation directe d'un véhicule de chaque flotte. La caractérisation des comportements s'est appuyée sur neuf indicateurs quantitatifs : vitesses moyenne et maximale; proportions de ralenti, accélération, décélération, croisière, basse vitesse; indice PKE (*Positive Kinetic Energy*); codistribution de fréquence des vitesses et accélérations. Un assemblage par sélection aléatoire de microtrajets a conduit à la production des cycles *ETSA* et *ETSB*, d'une durée de 1200 secondes.

Le cycle *ETSA* est très représentatif des conditions réelles d'opération des véhicules. En revanche, le cycle *ETSB* diffère des comportements réels selon les aspects de la vitesse maximale et de l'indice PKE. Ce décalage s'explique par la présence de microtrajets exagérément longs qui ont biaisé le processus d'assemblage. Une approche stochastique reposant sur l'identification d'événements modaux – en lieu et place des microtrajets – est proposée pour remédier au problème.

Mots-clés : cycle normalisé; bilan d'émissions polluantes; caractérisation de comportements routiers; analyse statistique

CONSTRUCTION DE CYCLES NORMALISÉS SPÉCIFIQUES À DES FLOTTES DE VÉHICULES UTILITAIRES POUR UN BILAN DES ÉMISSIONS POLLUANTES

Guillaume NACHIN

ABSTRACT

Driving cycles are an essential tool for the measurement of road vehicle pollutant emissions. They allow reproducing any specific road behaviour in laboratory and ensuring the measured emission rates are similar to that of the actual operation.

Two specific driving cycles have been developed. Each cycle is representative of the behaviour of a fleet of commercial vehicles. Based on the current knowledge on this field of research, a complete methodology was put together. Data collection was performed with instrumented vehicles. Characterisation of the driving patterns relied on nine quantitative indicators: average and maximal speed; proportions of idle, acceleration, deceleration, cruise and crawling; PKE (*Positive Kinetic Energy*) index; speed-acceleration frequency distribution. Random selection of microtrips led to the assembly of 1200-second long *ETSA* and *ETSB* cycles.

The *ETSA* cycle closely matches its respective real world characteristics. However, the *ETSB* cycle is significantly different from the actual road behaviour on two aspects: maximal speed and PKE index. This offset can be explained by the excessive lengths of some microtrips, with introduced a bias in the assembly process. A stochastic approach based on modal events – instead of microtrips – is a proposed solution to solve the problem.

Keywords: driving cycle; pollutant emissions measurement; characterisation of driving patterns; statistical analysis

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
1.1 Pollution atmosphérique	3
1.1.1 Une problématique énergétique	3
1.1.2 Rôle de l'automobile dans la pollution atmosphérique.....	4
1.2 Mesure des taux d'émissions des véhicules individuels.....	6
1.2.1 Cycles normalisés : une exigence réglementaire	6
1.2.2 Cycles normalisés : un outil de diagnostic.....	9
1.2.3 Tests sur dynamomètre	10
1.3 Construction de cycles normalisés.....	12
1.3.1 Collecte des données de terrain.....	12
1.3.2 Caractérisation des comportements	13
1.3.3 Assemblage du cycle normalisé.....	15
1.3.3.1 Des trajets réels aux microtrajets	15
1.3.3.2 Méthodes pour l'assemblage de cycles candidats.....	16
1.3.3.3 Comparaison des cycles candidats à la cible paramétrique	19
1.4 Synthèse	21
CHAPITRE 2 MATÉRIELS ET MÉTHODES	23
2.1 Collecte des données.....	23
2.2 Traitement des données.....	25
2.2.1 Caractérisation	25
2.2.2 Δ cycle : un indice de représentativité	27
2.2.3 Ralenti initial et final.....	28
2.3 Construction du cycle normalisé.....	29
2.3.1 Préparation des microtrajets.....	29
2.3.2 Paramétrage.....	30
2.3.3 Exécution itérative	32
2.4 Synthèse	34
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	35
3.1 Collecte des données.....	35
3.2 Caractérisation des comportements observés	37
3.3 Cycles normalisés	40
3.3.1 Microtrajets issus des enregistrements de terrain	40
3.3.2 Caractéristiques des microtrajets et comportements routiers.....	43
3.3.3 Impact attendu de la durée des microtrajets sur l'assemblage des cycles normalisés	44
3.3.4 Cycles normalisés finaux	46
3.3.4.1 Site A et cycle <i>ETSA</i>	46

	3.3.4.2 Site B et cycle <i>ETSB</i>	48
3.4	Synthèse	49
CHAPITRE 4	DISCUSSION	51
4.1	Pertinence et spécificité des cycles spécifiques assemblés.....	51
4.2	Utilisation des cycles dans le bilan d'émissions polluantes.....	52
4.3	Vers un bilan dynamique des émissions	53
4.4	Recommandations : approche stochastique et théorie de Markov	55
CONCLUSION	.....	57
ANNEXE I	Caractérisation des comportements par suivi de la vitesse instantanée	59
ANNEXE II	Questionnaire préalable à l'étude.....	63
ANNEXE III	Algorithme général du traitement des données.....	65
ANNEXE IV	Algorithme de la fonction d'assemblage du cycle normalisé	67
ANNEXE V	Distribution de la durée des microtrajets	69
ANNEXE VI	Cycle normalisé <i>ETSA</i>	71
ANNEXE VII	Cycle normalisé <i>ETSB</i>	73
ANNEXE VIII	Code <i>MATLAB</i> élaboré dans le cadre du projet de recherche.....	75
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	.....	93

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Cycles normalisés utilisés pour l'application de normes antipollution	7
Tableau 1.2	Critères de caractérisation pour la construction de cycles normalisés.....	14
Tableau 1.3	Matrice de transition	18
Tableau 2.1	Indicateurs pour la caractérisation des comportements routiers	26
Tableau 3.1	Données issues de la phase de collecte de terrain.....	36
Tableau 3.2	Caractérisation des données et comparaison aux cycles standards.....	37
Tableau 3.3	Propriétés statistiques des microtrajets produits	40
Tableau 3.4	Caractéristiques du cycle <i>ETSA</i> et comparaison aux données de terrain.....	46
Tableau 3.5	Caractéristiques du cycle <i>ETSB</i> et comparaison aux données de terrain.....	48
Tableau 4.1	Propriétés des cycles <i>ETSA</i> , <i>ETSB</i> et des standard nord-américains	52

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Cycles utilisés pour l'application de normes d'émissions aux États-Unis et au Canada 8
Figure 1.2	Véhicule sur un dynamomètre à rouleau 11
Figure 1.3	Fragmentation d'un extrait de profil de vitesse 17
Figure 2.1	Boîtier d'acquisition <i>ISAAC DRU-900</i> 23
Figure 2.2	Microtrajets dans un profil de vitesse 30
Figure 2.3	Structure d'un cycle candidat comprenant un microtrajet..... 33
Figure 2.4	Structure d'un cycle candidat comprenant deux microtrajets 33
Figure 2.5	Structure générique d'un cycle comprenant k microtrajets 33
Figure 3.1	Représentation graphique des matrices SAFD pour les sites A et B 38
Figure 3.2	Vitesse maximale atteinte selon la durée du microtrajet 42
Figure 3.3	Vitesse moyenne selon la durée du microtrajet 42

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MLE	Maximum Likelihood Estimation
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OBD-II	On-Board Diagnosis II
PKE	Positive Kinetic Energy
PV	Performance Value
SAFD	Speed-Acceleration Frequency Distribution
SSD	Sum of Squared Differences
US CFR	United States Code of Federal Regulations

Espèces chimiques

CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
CH ₄	Méthane
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NO _x	Oxydes d'azote
SO ₂	Dioxyde de soufre

Cycles normalisés

CADC	Common Artemis Driving Cycles
CUEDC	Composite Urban Emission Driving Cycles
ETSA	École de Technologie Supérieure, cycle A
ETSB	École de Technologie Supérieure, cycle B
FTP	Federal Test Procedure
HWFET	Highway Federal Emission Test
JC08	Japan Cycle 08
SFTP	Supplemental Federal Test Procedure
UDDS	Urban Driving Dynamometer Schedule

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Unités

Distance

km	kilomètre
m	mètre

Temps

min	minute
h	heure
s	seconde

Fréquence

Hz	hertz
----	-------

Vitesse

km.h ⁻¹	kilomètre par heure
--------------------	---------------------

Accélération

m.s ⁻²	mètre par seconde carrée
-------------------	--------------------------

Énergie

MTEp	mégatonne équivalent-pétrole
------	------------------------------

Consommation de carburant

L/100 km	litre par cent kilomètres
MPG	mille par gallon US

Symboles

$\theta, \overline{\theta}_t$	caractéristiques des données de terrain
$\varepsilon, \overline{\theta}_l$	caractéristiques du cycle candidat
W	poids des indicateurs de caractérisation
Δ_{cycle}	indice de représentativité
PV	valeur de performance
PM	erreur paramétrique

INTRODUCTION

Les transports routiers sont un contributeur majeur de la pollution atmosphérique à l'échelle mondiale. La combustion de carburant issu du pétrole – essence et diesel principalement – est responsable de rejets ayant des impacts à l'échelle locale, régionale et globale.

Le domaine des transports est dans une dynamique de croissance forte, tant pour le transport des personnes que de marchandises. Une augmentation des distances parcourues est attendue dans les prochaines décennies, significative dans les pays occidentaux et explosive dans les pays en voie de développement (Rekacewicz, 2007). Par conséquent, les enjeux sanitaires et environnementaux liés aux aspects énergétiques des transports sont amenés à prendre une place toujours plus importante dans l'aménagement du territoire, les politiques énergétiques nationales et régionales ainsi que les développements technologiques de l'industrie automobile.

Des outils sont nécessaires pour appréhender la dimension quantitative des émissions polluantes. Sans information sur les taux et masses d'émissions de gaz à effet de serre et autres polluants gazeux ou particulaires, il est impossible de piloter pertinemment l'aménagement d'un territoire ou un choix technologique.

Les cycles normalisés sont un outil essentiel dans l'application des normes antipollution pour les transports routiers, et permettent également la réalisation de bilans de masse des émissions à l'échappement pour des réseaux, véhicules et carburants divers. Un cycle normalisé est un court trajet routier qui permet la répétabilité d'un comportement routier donné et, par là même, la mesure des émissions polluantes associées à l'opération d'une flotte de véhicules.

La présente recherche vise à élaborer deux cycles normalisés spécifiques, chacun étant représentatif des comportements routiers d'une flotte de véhicules utilitaires de la région de Montréal. Ces cycles doivent permettre une mesure des taux d'émissions de gaz à effet de serre lors des déplacements des véhicules dans leur milieu d'opération. Pour atteindre cet objectif, trois étapes sont nécessaires :

- la collecte de données auprès des flottes de véhicules étudiées;
- la caractérisation des comportements par traitement des données collectées;
- l'assemblage des cycles normalisés représentatifs des comportements observés.

Le premier chapitre du mémoire est un état des connaissances dans le domaine des émissions polluantes liées à l'automobile. Il pose le contexte général de la contribution des transports routiers aux problèmes de qualité de l'air, avant de s'intéresser plus spécifiquement aux approches existantes pour la construction de cycles normalisés. En s'appuyant sur cet état des connaissances, le deuxième chapitre présente une méthodologie complète d'assemblage de cycles normalisés spécifiques. Il couvre successivement les étapes de la collecte des données, de leur caractérisation et de l'assemblage de cycles à proprement parler. Cette méthodologie est appliquée à deux flottes de véhicules et le troisième chapitre en présente les résultats, dont les deux cycles spécifiques sont l'aboutissement. Enfin, le quatrième chapitre est consacré à une mise en perspective des résultats et apporte également des pistes pour l'amélioration de la méthodologie sur la base des limites rencontrées.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le premier chapitre présente l'état actuel des connaissances dans le domaine des bilans des émissions polluantes des véhicules routiers. Cette revue de littérature abordera successivement les thèmes de la pollution atmosphérique associée aux véhicules individuels et de l'évaluation de ces émissions avant de rentrer dans le vif du sujet : les cycles normalisés, leurs rôles et les méthodes pour leur élaboration.

1.1 Pollution atmosphérique

1.1.1 Une problématique énergétique

L'apparition d'une pollution atmosphérique significative est étroitement liée à l'histoire industrielle (Andres et al., 1999). Initiée en Grande-Bretagne au XVIII^e siècle puis en Europe occidentale et en Amérique du Nord au XIX^e siècle, la révolution industrielle repose sur l'exploitation de la machine à vapeur (Kuehn, 1996). Disponible en grande quantité en Angleterre, meilleur combustible et meilleur marché que le bois, le charbon est très vite devenu la source énergétique par excellence du monde occidental, contribuant à transformer le paysage économique et social, révolutionnant le transport maritime et accompagnant l'essor du chemin de fer (Singh et al., 2008).

Depuis, les besoins énergétiques se sont multipliés et les sources, diversifiées. Les combustibles fossiles restent cependant la source prédominante d'énergie primaire à l'échelle mondiale, contribuant pour 87,9 % aux 11 164 MTep¹ d'énergie primaire consommées dans le monde en 2009 (BP, 2010).

¹ Mégatonnes équivalent-pétrole

La combustion des ressources fossiles telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel entraîne des émissions atmosphériques. Le CO₂ ou dioxyde de carbone, produit principal de la combustion de carburants fossiles, est responsable au premier chef du réchauffement climatique provoqué par les activités humaines (Florides et Christodoulides, 2009; Zecca et Chiari, 2010).

D'autres polluants majeurs sont émis, tels que le CO ou monoxyde de carbone, les particules fines ou aérosols, les NO_x ou oxydes d'azote, le SO₂ ou dioxyde de soufre (Huggins et al., 2004; Kim et al., 2009; Raub, 1999; U.S. Environmental Protection Agency, 1998; Vestreng et al., 2007).

La consommation d'énergies fossiles a atteint des niveaux tels qu'elle est responsable de problèmes sanitaires à l'échelle mondiale. L'*Organisation mondiale de la santé* estime à 2 millions le nombre annuel de décès prématurés liés à la qualité de l'air (Organisation mondiale de la santé, 2008). Par ailleurs, les dommages environnementaux liés à la pollution atmosphérique sont considérables. Le réchauffement du climat, provoqué en partie par l'émission anthropique de CO₂, fait planer une menace sur l'équilibre de mécanismes climatiques complexes, mettant en péril des populations humaines, d'innombrables écosystèmes et la diversité du vivant (Alexiadis, 2007; McAlpine et al., 2010; Viola, Paiva et Savi, 2010).

1.1.2 Rôle de l'automobile dans la pollution atmosphérique

En 2008, le secteur des transports était responsable de 19 % de la demande mondiale en énergie primaire et contribuait pour 23 % aux émissions mondiales de CO₂ associées à la combustion d'énergies fossiles. À lui seul, le transport routier contribue à hauteur de 75 % à la consommation énergétique et aux émissions de CO₂ du secteur des transports (International Energy Agency, 2011; Swedish Energy Agency, 2010). Il est également à l'origine de la moitié des émissions anthropiques de NO_x, contribue de manière importante à

l'émission des particules fines et est une source non négligeable de CO (CITEPA, 2010; U.S. Environmental Protection Agency, 1998).

Ces quelques statistiques traduisent le rôle significatif du transport routier dans la pollution atmosphérique, locale comme globale. Il représente donc une cible prioritaire pour la réduction des émissions atmosphériques liées à la consommation énergétique à l'échelle mondiale. Dans cette optique, toute réponse aux problèmes environnementaux et sanitaires soulevés par les transports routiers implique d'optimiser l'efficacité énergétique et les taux de pollution du système de transport en intervenant sur le tracé et la gestion des réseaux (Deng, Cheng et Zheng, 2009), les véhicules et les sources énergétiques (Arteconi et al., 2010; Murugesan et al., 2009)

Ce point a fait l'objet d'une prise de conscience au cours des années 1950 et 1960 aux États-Unis et en Europe, accompagnée d'une volonté de réduire les émissions polluantes des véhicules. Le *California Motor Vehicle Pollution Control Board*² est à l'origine des premières normes antipollution pour véhicules routiers. Les contrôles des taux d'émissions instaurés en 1966 en Californie portaient sur le CO et les hydrocarbures (California Environmental Protection Agency, 2012). Ces mesures ont ouvert la voie à des réglementations similaires à l'échelle des États-Unis par l'intermédiaire de l'*Environmental Protection Agency* (EPA), puis en Europe (Conseil des Communautés européennes, 1970).

Depuis les années 1960, les normes d'émissions se sont considérablement abaissées et concernent davantage d'espèces chimiques (U.S. Environmental Protection Agency, 2007). Les NO_x sont contrôlés depuis la première moitié des années 1970 tandis que des limites d'émissions ont été instaurées sur les matières particulaires au début des années 1980. Le resserrement des réglementations sur la qualité de l'air a conduit à une amélioration des performances des véhicules en termes de pollution. L'apparition des premiers échappements catalytiques en 1975, auxquels ont succédé les catalyseurs à trois voies à partir de 1980,

² En anglais, *Conseil pour le contrôle de la pollution des véhicules motorisés*. Cet organisme dépendant du gouvernement californien a été fusionné en 1967 au *Bureau of Air Sanitation* pour former l'actuel *Air Resources Board*.

représente un jalon important dans la baisse des taux d'émissions (Gandhi, Graham et McCabe, 2003; Shelef et McCabe, 2000).

Par ailleurs, l'essor des carburants alternatifs tels que le gaz naturel ou des produits issus de la biomasse ajoute une nouvelle dimension à l'amélioration des performances énergétiques et environnementales du parc mondial de véhicules routiers (Liu et Helfand, 2009; Shen, Zhang et Han, 2007).

1.2 Mesure des taux d'émissions des véhicules individuels

Le développement technologique continu, tant dans la conception des moteurs que dans le traitement des gaz d'échappement ou la recherche sur les carburants se traduit par une baisse tendancielle des taux d'émissions depuis un demi-siècle. Depuis le début de cette dynamique, les normes réglementaires limitant les niveaux d'émissions sont un incitatif fort à la recherche universitaire et industrielle sur la pollution atmosphérique. À la racine de ces leviers réglementaires se trouve un ensemble d'outils dédiés à la mesure des performances environnementales des véhicules : les *cycles normalisés*.

1.2.1 Cycles normalisés : une exigence réglementaire

Les taux d'émission de chaque polluant sont intrinsèquement liés au carburant utilisé (Hoyer et Holden, 2007; Liu et al., 2007), aux caractéristiques des véhicules, et varient fortement selon les conditions d'opération, la typologie de réseau et le comportement du conducteur (Felstead, McDonald et Fowkes, 2009; Gassmann, 1990; Nesamani et Subramanian, 2006; Van Mierlo et al., 2004). Définir des normes antipollution implique donc de définir des protocoles de mesures, afin de permettre une comparaison entre les performances des véhicules et les critères réglementaires.

Composante centrale de ces méthodologies, les cycles normalisés – *driving cycles* en anglais – ont pour objectif de transposer au laboratoire les caractéristiques d'un certain comportement routier. Un cycle normalisé est un profil de vitesse standardisé de quelques

dizaines de minutes. Sa structure est très simple : elle comprend des repères temporels et les vitesses instantanées correspondantes. De nombreux cycles discrétisent les vitesses à 1 Hz, tel que le cycle américain *UDDS*³.

Les premiers cycles normalisés utilisés à grande échelle, en Europe (Conseil des Communautés européennes, 1970) comme aux États-Unis (U.S. Environmental Protection Agency, 1993) furent mis sur pied en même temps que les premières normes antipollution. Depuis lors, la standardisation des cycles et procédures encadre les méthodes de mesure et autorise la comparaison entre véhicules ou carburants. Quatre familles de cycles normalisés coexistent à l'échelle mondiale pour le contrôle des émissions polluantes liées à l'automobile, telles que listées dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Cycles normalisés utilisés pour l'application de normes antipollution
Tiré de DieselNet.com < www.dieselnet.com >

Cycles normalisés		Type de trajet
États-Unis	UDDS <i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i>	Urbain
	HWFET <i>Highway Fuel Economy Test</i>	Autoroutier
	SFTP 2 cycles <i>Supplemental Federal Test Procedure</i>	Routier
Europe	CADC 4 cycles <i>Common Artemis Driving Cycles</i>	Urbain Routier Autoroutier
Australie	CUEDC 6 cycles <i>Composite Urban Emissions Drive Cycle</i>	Mixte
Japon	JC08	Urbain

³ *Urban Driving Dynamometer Schedule*

Les cycles *UDDS* et *HWFET* ont été développés aux États-Unis au début des années 1970 (U.S. Environmental Protection Agency, 1993). À l'heure actuelle, ils sont toujours utilisés dans les procédures de contrôle des émissions de NO_x , de CO et d'hydrocarbures des parcs américain et canadien de véhicules légers (Canada, 2003; U.S. Environmental Protection Agency, 2004). Le profil de ces deux cycles est présenté dans la Figure 1.1.

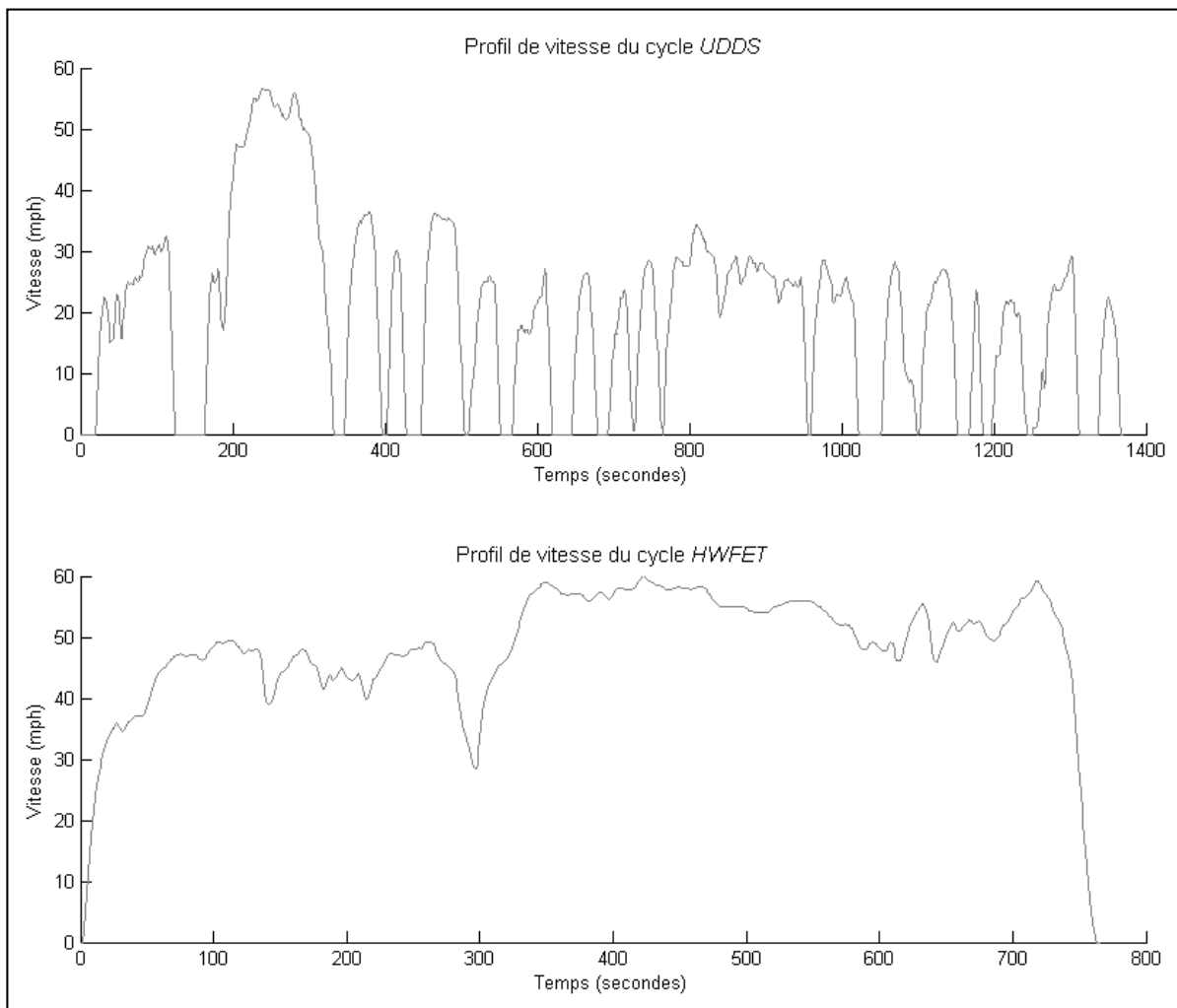


Figure 1.1 Cycles utilisés pour l'application de normes d'émissions aux États-Unis et au Canada

Tirée de U.S. Environmental Protection Agency < www.epa.gov >

1.2.2 Cycles normalisés : un outil de diagnostic

Outre leur rôle dans l'application des normes antipollution, les cycles normalisés sont utilisés comme outils de diagnostic pour la réalisation de bilans des émissions polluantes liées aux véhicules routiers (Lin et Niemeier, 2003; Schifter et al., 2005).

Des cycles spécifiques, caractéristiques des villes ou des régions étudiées, sont développés à travers le monde (Hung et al., 2007; Kamble, Mathew et Sharma, 2009; Saleh et al., 2009; Watson, Milkins et Braunsteins, 1982). Ces cycles spécifiques sont généralement très différents des cycles standard utilisés pour l'application des normes antipollution. D'autre part, les cycles spécifiques peuvent être très différents les uns des autres : leurs particularités dépendent essentiellement de la topologie et de l'engorgement du réseau, de la topographie du territoire, des comportements des usagers. Ces grandeurs peuvent varier significativement selon les territoires observés, et évoluent également au fil des années. Les propriétés observées auprès d'un réseau routier permettent donc de dresser un portrait de la région sous l'angle de la mobilité routière.

Un cycle spécifique qui rend compte des particularités du réseau est nécessaire pour un juste estimé des émissions réelles. Les essais en laboratoire renseignent sur les taux d'émission, en masse par distance, dont est responsable le parc de véhicules étudié. Les valeurs obtenues permettent une comparaison entre plusieurs parcs de véhicules ou plusieurs régions, du point de vue de l'efficacité énergétique comme des émissions polluantes.

Cependant, ces valeurs ne sont pas suffisantes pour réaliser un bilan massique des émissions. Il est indispensable de connaître la distance parcourue par le parc de véhicules pour un temps donné : instrumentation embarquée, enquêtes de mobilité, comptages sont autant de moyens de quantifier les distances. Par le produit des taux d'émissions et des distances parcourues, la masse de polluants émise peut alors être déterminée.

Les bilans d'émissions permettent de dresser un portrait de la pollution atmosphérique engendrée par les véhicules routiers et contribuent au développement de stratégies de réduction de la pollution locale, régionale et globale (Biona et Culaba, 2006; Lin et Niemeier, 2003).

1.2.3 Tests sur dynamomètre

L'exécution d'un cycle normalisé pour la mesure des taux d'émissions fait l'objet de procédures précises et détaillées pour permettre la répétabilité et la comparabilité des résultats. Le document de référence aux États-Unis est le *U.S. Code of Federal Regulations (US CFR) Title 40 Part 86* (U.S. Environmental Protection Agency, 2004). Son équivalent canadien est le *Canadian Environmental Protection Act* (Canada, 1999). Les prochains paragraphes présentent dans les grandes lignes les procédures nord-américaines en vigueur.

Le véhicule sélectionné pour réaliser le test est maintenu dans un local à température contrôlée pendant 24 heures. Il est alors installé, moteur éteint, sur un dynamomètre à rouleau électrique. Le rouleau du dynamomètre est entraîné par les roues motrices du véhicule. Il exerce une résistance qui simule l'inertie, la résistance au roulement, la traînée aérodynamique et le gradient d'altitude qu'affronte le véhicule lors d'un trajet réel. La vitesse du véhicule est calculée à partir de la vitesse de rotation du rouleau. L'opérateur au volant ajuste sa vitesse instantanée, affichée sous forme de curseur sur un écran de contrôle, pour suivre le profil de vitesse du cycle en cours d'exécution.

Les gaz d'échappement du véhicule sont collectés et dilués grâce à un système d'échantillonnage à volume constant⁴. Une fraction de ces gaz dilués est emmagasinée dans des sacs et est soumise à analyse après la complétion du test. La masse totale émise d'une variété de polluants est calculable à partir des concentrations des échantillons contenus dans les sacs. La consommation de carburant est calculée par bilan de masse sur le carbone. Les unités couramment utilisées pour exprimer les niveaux d'émission sont le *g/km* ou *g/mi* (CO₂,

⁴ En anglais, *CVS system* pour *constant volume sampling system*

CO_{2-eq}, CO, NO_x, hydrocarbures) ainsi que le *mg/km* ou *mg/mi* (matières particulaires, N₂O, CH₄), tandis que les consommations de carburant sont ramenées en *L/100 km* ou *MPG*⁵.

La Figure 1.2 montre un véhicule installé sur un dynamomètre pour une mesure des taux d'émissions. Sont visibles : le rouleau, sous le train avant du véhicule; l'écran de contrôle, face à l'habitacle; la conduite de collecte des gaz d'échappement, en arrière-plan; un ventilateur utilisé pour assurer le refroidissement du moteur, en avant-plan.



Figure 1.2 Véhicule sur un dynamomètre à rouleau
Tirée de Joint Research Center, European Commission < <http://ec.europa.eu> >

⁵ De l'anglais *miles per gallon*, mille par gallon US

1.3 Construction de cycles normalisés

L'assemblage d'un cycle normalisé transitoire comprend trois étapes. La première est une phase de collecte de données auprès de la flotte étudiée. La deuxième consiste en une caractérisation des comportements observés. La dernière est l'assemblage du cycle normalisé à proprement parler (André, 2004).

1.3.1 Collecte des données de terrain

L'élaboration d'un cycle normalisé commence nécessairement par une collecte de données de terrain. Plus spécifiquement, il s'agit d'enregistrer des vitesses instantanées de véhicules dans leur milieu d'opération. Les profils de vitesses ainsi collectés répondent à deux objectifs : d'une part, ils permettent une caractérisation des comportements réels qui doivent être transposés au cycle normalisé; d'autre part, des fragments de ces mêmes enregistrements sont destinés à être assemblés pour former le cycle normalisé.

Deux méthodes existent pour collecter les données de terrain, et sont choisies selon les contraintes du milieu (Niemeier, 1999; Tong et Hung, 2008). La première approche est appelée *car chase*⁶ : un véhicule instrumenté est inséré dans un flux de circulation, et imite le comportement d'un grand nombre de véhicules choisis successivement dans le trafic. Cette méthode est la mieux adaptée à de grandes flottes hétérogènes, car elle reflète la diversité des trajets, des véhicules et des conducteurs. En revanche, il existe une part d'arbitraire dans le choix des axes et des véhicules suivis.

La deuxième méthode revient à instrumenter directement un ou plusieurs véhicules choisis dans la flotte étudiée et de s'intéresser uniquement à leurs comportements. Un boîtier d'acquisition ou une «cinquième roue» sont installés sur le véhicule. Le suivi des vitesses instantanées se fait typiquement à une fréquence de 1 Hz, dès que le moteur est en marche. Un tel système permet d'enregistrer les déplacements dans leur intégralité, y compris les

⁶ Poursuite de véhicules, en anglais

premières secondes, et de prendre en compte l'ensemble des conditions rencontrées. En revanche, le choix des véhicules instrumentés peut influencer les résultats de la collecte de données : si l'acquisition se fait sur un véhicule non représentatif de sa flotte, un biais peut apparaître entre les propriétés réelles et mesurées.

Quel que soit le type d'acquisition choisi, il est préférable de maximiser le volume d'information collectée ainsi que le nombre des sources de données. Ceci permet d'éviter qu'un comportement hors normes ne biaise les grandes tendances observables, en réduisant le poids relatif de chaque trajet et de chaque véhicule.

Enfin, il est pertinent de prendre en compte un éventuel effet Hawthorne. Mis en évidence par le psychologue et sociologue Elton Mayo, ce phénomène est une modification temporaire du comportement des sujets d'une expérience lorsqu'ils savent qu'ils sont observés (Mayo, 1939). Dans le cas d'un suivi des déplacements routiers, l'effet Hawthorne pourrait se traduire par une conduite moins agressive et plus économe, ce qui introduirait un biais expérimental et conduirait, à terme, à la production d'un cycle normalisé non représentatif de la réalité.

1.3.2 Caractérisation des comportements

Les données collectées au cours de la première phase sont analysées afin de mettre en évidence les caractéristiques des comportements observés. En d'autres termes, il s'agit de définir une cible paramétrique pour la fabrication du cycle normalisé qui, à terme, doit présenter les mêmes propriétés que les données de terrain.

L'analyse des données repose sur des indicateurs quantitatifs à même d'appréhender leurs spécificités (Hung et al., 2005; Hung et al., 2007). Le Tableau 1.2 répertorie des indicateurs fréquemment rencontrés dans la littérature et les cycles pour lesquels ils ont été utilisés.

Tableau 1.2 Critères de caractérisation pour la construction de cycles normalisés
Adapté de Hung et al. (2007)

Cycle normalisé	Indicateurs pour caractérisation
FTP72, FTP75	Nombre d'arrêts par distance Vitesse moyenne Vitesse maximale Nombre d'arrêts
LA92 / Unified cycle	Codistribution de fréquence des vitesses et accélérations
LA01	Vitesse moyenne Vitesse maximale Vitesse minimale 95e percentile de vitesse Puissance aux roues 95e percentile de la puissance
Edinburgh cycle	Codes de vitesse (méthode TRAFIX)
Improved European cycle	Vitesse moyenne Vitesse roulante moyenne Accélérations et décélérations moyennes Durée médiane des microtrajets Nombre de changements d'accélérations et décélérations Nombre d'arrêts par microtrajet Proportions de ralenti, d'accélération, de croisière, de décélération
Sydney cycle	Codistribution de fréquence des vitesses et accélérations Vitesse moyenne Valeur efficace des accélérations Proportions de ralenti
Melbourne peak cycle	Vitesse moyenne Valeur efficace des vitesses Valeur efficace des accélérations PKE Proportions de ralenti Fonction de densité de probabilité des vitesses et accélérations
Perth cycle	Vitesse moyenne Nombre d'arrêts par distance PKE Écart type des accélérations Proportions de ralenti Distribution des vitesses

Tous les indicateurs présentés ici se basent sur une analyse des vitesses et accélérations instantanées. Certains quantifient des événements extrêmes (vitesse et accélération maximales), d'autres traduisent des tendances (vitesse moyenne, nombre d'arrêts par trajet), d'autres encore prennent en compte la diversité des conditions d'opération au cœur de chaque trajet (répartition temporelle des modes d'opération, codistribution de fréquence des vitesses et accélérations). Enfin, la combinaison et le nombre des indicateurs retenus varient sensiblement d'étude en étude.

1.3.3 Assemblage du cycle normalisé

L'objectif est d'assembler un trajet court qui présente les mêmes propriétés que l'ensemble du jeu de données dont il est issu. Cette phase est itérative, en ce sens qu'elle consiste à produire un grand nombre de cycles candidats – généralement plusieurs milliers. Au terme de l'itération, le profil de vitesse qui présente les propriétés les plus proches des données de terrain est conservé puisqu'il est le plus représentatif de la réalité. Il est alors considéré comme le cycle normalisé final.

La production d'un cycle candidat repose sur la juxtaposition des segments issus de l'enregistrement des données de terrain (Biona et Culaba, 2006; Kamble, Mathew et Sharma, 2009). Le processus de construction repose sur une sélection aléatoire ou semi-aléatoire des segments assemblés. Diverses méthodes de traitement statistique sont présentées dans la littérature, ce qui témoigne de la diversité des approches disponibles. Toutes tendent cependant vers le même objectif : produire des cycles normalisés représentatifs en un temps de calcul raisonnable (Jiang et al., 2009; Lin et Niemeier, 2003).

1.3.3.1 Des trajets réels aux microtrajets

Les cycles normalisés sont assemblés à partir de courts fragments de trajets réels. Ces éléments unitaires, couramment appelés *microtrajets* ou *segments*, sont omniprésents dans la littérature mais leur définition technique n'est pas universelle : plusieurs méthodes de

fragmentation des profils de vitesse coexistent. Ainsi, un microtrajet peut correspondre à un déplacement complet, soit le profil de vitesse compris entre deux arrêts successifs du véhicule. Le profil de vitesse peut également être découpé en une succession d'événements modaux homogènes : une phase d'accélération, une phase de décélération, un ralenti, etc. Enfin, il peut être subdivisé en segments de même durée, typiquement 10 à 20 secondes (Hung et al., 2007). La Figure 1.3 illustre par l'exemple ces différentes méthodes.

1.3.3.2 Méthodes pour l'assemblage de cycles candidats

L'assemblage d'un cycle normalisé repose systématiquement sur un mécanisme itératif : de nombreux profils de vitesse sont construits et testés, jusqu'à ce que le degré de représentativité souhaité soit atteint (Jiang et al., 2009; Lin et Niemeier, 2003). Néanmoins, les algorithmes utilisés pour l'assemblage de ces cycles candidats varient significativement d'étude en étude. Deux approches coexistent et sont présentées dans cette section.

La méthode la plus conventionnelle et la plus utilisée pour l'assemblage de cycles normalisés repose sur une approche essai-erreur. Le traitement des enregistrements de terrain permet la construction d'une banque de microtrajets, sans ségrégation ni hiérarchisation des éléments. Des microtrajets sont sélectionnés *aléatoirement* dans cette banque et juxtaposés pour former un profil de vitesse d'une durée prédéterminée. Cette étape est répétée : de nombreux cycles candidats sont assemblés de manière totalement aléatoire jusqu'à ce que l'un d'entre eux soit jugé représentatif des données de terrain qu'il représente (Saleh et al., 2009; Tamsanya, Chungpaibulpatana et Limmeechokchai, 2009; Watson, Milkins et Braunsteins, 1982).

Une présélection des microtrajets est une variante possible de la méthode, avec pour objectif d'accélérer la convergence vers un cycle représentatif. Le terme de *sélection quasi aléatoire des microtrajets* est alors utilisé. Dans Austin et al. (1993) et Gammariello et Long (1996) les microtrajets sélectionnés aléatoirement ne sont conservés que s'ils améliorent la représentativité du cycle candidat en cours d'assemblage. Dans Kamble, Mathew et Sharma

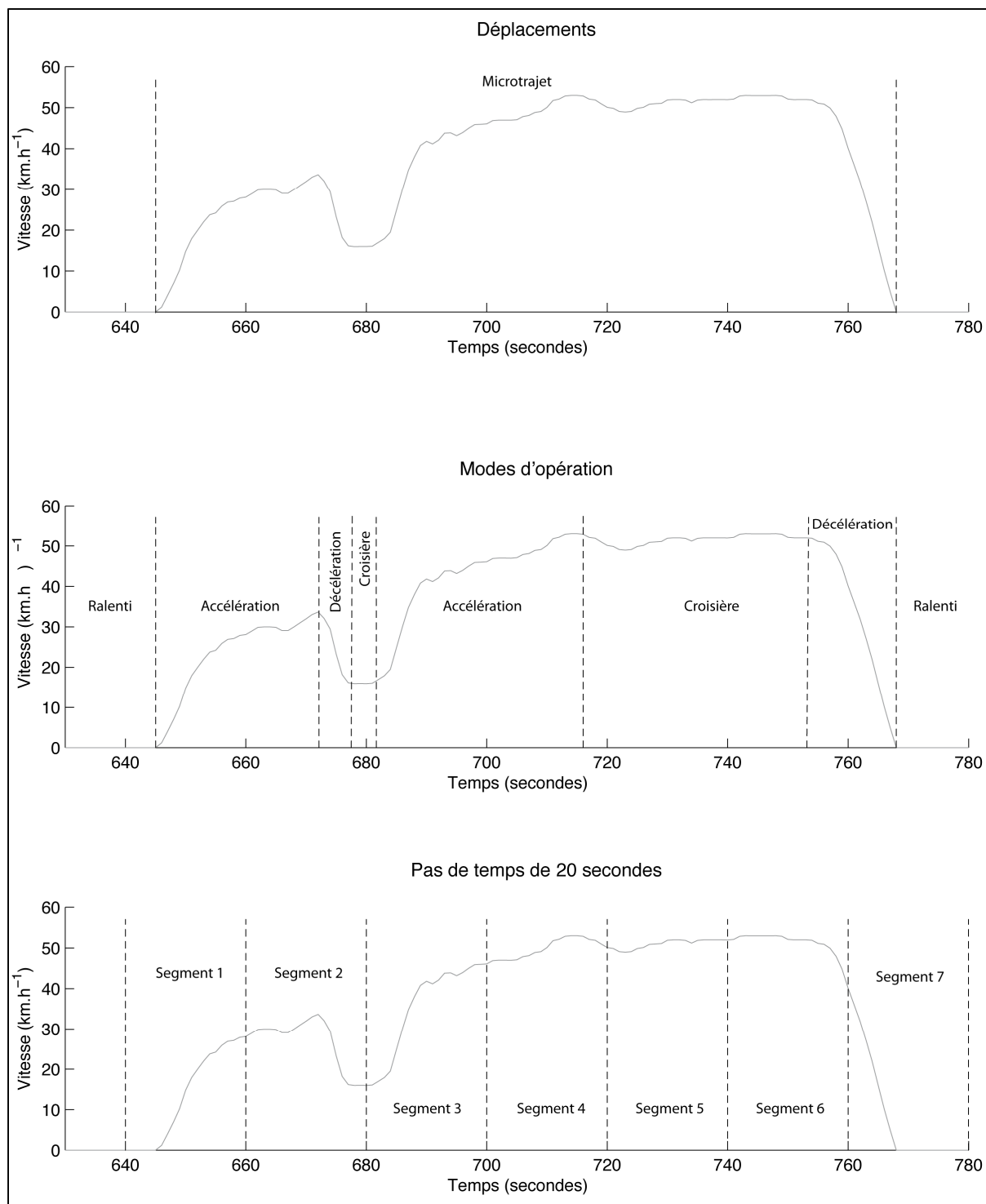


Figure 1.3 Fragmentation d'un extrait de profil de vitesse

(2009), la banque de K microtrajets est réduite à k éléments ($k \leq K \forall k, K \in \mathbb{N}^*$) avant assemblage. Pour ce faire, seul le plus court de plusieurs microtrajets similaires est conservé.

D'autre part, Lin et Niemeier (2002) et plus récemment Shi et al. (2011) préconisent une approche très différente, tant pour le découpage des enregistrements de terrain que pour le processus d'assemblage du cycle normalisé, qui est basée sur le *maximum de vraisemblance* (parfois appelée *MLE* pour *Maximum Likelihood Estimation*) et les *processus de Markov*.

Par utilisation du *MLE*, les enregistrements de terrain sont scindés en événements homogènes : les profils de vitesse transitoires sont décomposés en courtes phases d'accélération, de décélération, de croisière, de ralenti. Ces segments sont alors regroupés en classes modales – Lin et Niemeier (2002) en proposent six, Shi et al. (2011) quatre – selon diverses propriétés telles que les vitesses moyennes, maximales et minimales et les taux d'accélération moyens.

L'enchaînement des segments des diverses classes modales est décrit comme un phénomène stochastique : la probabilité d'occurrence de chaque classe modale dépend uniquement de la classe modale de l'élément précédent. Dans le processus d'assemblage des cycles, ceci se traduit par le calcul d'une matrice de transition qui décrit la probabilité d'enchaînement des différentes classes modales. Le Tableau 1.3 présente un exemple générique de matrice de transition entre n classes modales. Un segment de la classe i a une probabilité $p_{i,j}$ d'être suivi par un segment de la classe j (pour i et j entiers, non nuls et inférieurs ou égaux à n).

Tableau 1.3 Matrice de transition
Adapté de Lin et Niemeier (2002)

N° de classe De ...	.. à				Total
	1	2	...	n	
1	$p_{1,1}$	$p_{1,2}$	...	$p_{1,n}$	1
2	$p_{2,1}$	$p_{2,2}$	...	$p_{2,n}$	1
...	
n	$p_{n,1}$	$p_{n,2}$	...	$p_{n,n}$	1

Un grand nombre de cycles normalisés candidats est produit par juxtaposition de segments. Si un cycle en cours d'assemblage contient k segments, la sélection du segment $k + 1$ se déroule en deux temps. Premièrement, la classe modale du segment $k + 1$ est choisie parmi n connaissant la classe du segment k et la matrice de transition. Deuxièmement, le segment $k + 1$ est sélectionné aléatoirement parmi la classe adéquate et juxtaposé aux k segments précédents.

Parmi les cycles candidats assemblés, le plus représentatif des données de terrain est conservé et devient le cycle normalisé final associé à la région ou à la flotte étudiées.

1.3.3.3 Comparaison des cycles candidats à la cible paramétrique

Comme mentionné dans la section 1.3.2, la caractérisation des données de terrain permet de mettre en lumière les propriétés des comportements observés. La valeur des indicateurs de caractérisation représente donc une cible paramétrique vers laquelle tend le processus d'assemblage du cycle normalisé. Différentes approches sont disponibles dans la littérature pour appréhender l'écart entre les propriétés d'un cycle candidat et cette cible paramétrique qui détermine le degré de représentativité du cycle.

Dans Gammariello et Long (1996), la caractérisation s'appuie sur plusieurs indicateurs. Les caractéristiques des cycles candidats sont comparées une à une à celles des données de terrain. Un cycle est recevable si chacune de ses caractéristiques diffère de moins de 5 % de celles des données de terrain. Lorsque cette condition est remplie, le processus d'assemblage est arrêté et le cycle final est connu.

D'autres études quantifient l'écart entre les propriétés d'un cycle candidat et la cible paramétrique grâce au calcul d'un *indice de représentativité*. Le cycle le plus représentatif peut alors être identifié. La limite inférieure de tels indices est zéro, atteinte lorsque le cycle et les données de terrain ont des propriétés égales; plus généralement, une valeur faible de l'indice traduit une bonne représentativité du cycle.

Lorsque la caractérisation des comportements repose sur un unique indicateur, la comparaison est immédiate. Ce cas de figure concerne typiquement les méthodes d'assemblage qui s'appuient exclusivement sur la codistribution de fréquence des vitesses et accélérations, couramment appelées *matrices SAFD*. Les différences entre la matrice des données de terrain d'une part, celle du cycle candidat d'autre part, sont aisément quantifiables par le calcul de la somme des différences au carré entre les deux matrices, ou *SSD*⁷. L'équation (1.2) en détaille l'expression : p (resp. q) est la matrice SAFD de taille $N_i \times N_j$ pour les données de terrain (resp. du cycle candidat).

$$SSD = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} (p_{ij} - q_{ij})^2 \quad (1.2)$$

Si plusieurs indicateurs sont utilisés pour la caractérisation des comportements, il est nécessaire de calculer un indice de représentativité capable d'agréger plusieurs dimensions. La différence relative est calculée entre chaque caractéristique du cycle et des données de référence; ces différences sont sommées pour obtenir une *valeur de performance PV* (Hung et al., 2007) ou une *erreur paramétrique PM* (Shi et al., 2011). Dans l'équation (1.3), la valeur de performance *PV* du cycle candidat i dépend de ses caractéristiques $\vec{\theta}_i$, des caractéristiques des données de terrain $\vec{\theta}_t$ et d'un vecteur W qui spécifie le poids de chaque indicateur.

$$PV = |\vec{\theta}_i - \vec{\theta}_t| \cdot W \quad (1.3)$$

⁷ De l'anglais *Sum of squared differences*

1.4 Synthèse

Les cycles normalisés permettent la transposition en milieu contrôlé de comportements routiers réels, à des fins de mesures d'émissions polluantes justes et précises. D'une part, les cycles standard servent de base méthodologique reproductible et assurent l'applicabilité des réglementations antipollution. Les cycles spécifiques, quant à eux, sont développés à petite échelle et rendent possible des bilans d'émissions polluantes pour une région ou une flotte de véhicules. L'assemblage de ces cycles spécifiques repose sur une collecte de données de terrain, dont le traitement révèle les caractéristiques des comportements observés et conduit à l'assemblage d'un profil de vitesse qui en est représentatif.

S'appuyant sur l'état des connaissances réalisé plus haut, le CHAPITRE 2 dépeint une méthodologie complète élaborée pour la production de cycles normalisés. Cette méthodologie permettra d'atteindre le premier sous-objectif du mémoire afin de créer deux cycles normalisés spécifiques.

CHAPITRE 2

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'objectif du projet est l'assemblage de deux cycles normalisés, représentatifs des comportements de deux flottes de véhicules utilitaires. Les premiers véhicules dépendent d'une compagnie privée et circulent exclusivement dans l'enceinte d'un site fermé, tandis que les seconds sont utilisés pour les travaux de voirie et d'entretien d'une municipalité québécoise. Le présent chapitre détaille la méthodologie mise en place, de la collecte des données auprès de chaque flotte jusqu'à l'assemblage des cycles normalisés. Par ailleurs, le code *MATLAB* développé et utilisé pour l'étude est présenté dans son intégralité en ANNEXE VIII.

2.1 Collecte des données

Le matériel choisi pour l'enregistrement est un boîtier d'acquisition embarqué, installé à bord des véhicules. Il s'agit du modèle *DRU-900* de la compagnie *ISAAC Instruments*, présenté à la Figure 2.1. Un seul boîtier enregistreur est utilisé au cours de l'étude. Par conséquent, la collecte d'informations est réalisée successivement auprès de chaque flotte avec le même matériel.



Figure 2.1 Boîtier d'acquisition ISAAC DRU-900
Tirée de ISAAC Instruments (2010)

Un court questionnaire (joint en ANNEXE II) fut élaboré pour comprendre *a priori* le type d'utilisation des véhicules étudiés, et soumis au responsable de chacune des deux flottes étudiées. Les réponses apportées montrent que les véhicules sont utilisés de manière similaire sur les deux sites. D'une part, les véhicules circulent à charge constante : la configuration standard correspond au transport d'un ou deux hommes et de matériel léger. Le transport de charges lourdes est exceptionnel, sinon inexistant. D'autre part, les régions parcourues ne présentent pas de dénivellation notable et les routes empruntées peuvent être considérées comme plates.

Ces deux éléments ont une importance significative sur la méthodologie de collecte des données. Si l'on considère que le gradient de la route est nul et que la masse du véhicule est constante, alors le suivi des vitesses instantanées est suffisant pour une caractérisation complète des comportements observés. Cette affirmation prend pour appui un ouvrage de Popp et Schiehlen (1993) et est démontrée en ANNEXE I.

Par ailleurs, les opérateurs des véhicules instrumentés ignorent la présence de l'enregistreur à bord. Cette précaution est prise pour éviter l'effet Hawthorne, à savoir une modification du comportement des conducteurs qui se savent observés : conduite moins agressive, vitesses moins élevées, arrêt immédiat du moteur à la fin d'un trajet (Anon, 2006).

Compte tenu de ces contraintes, la phase de collecte des données est organisée de la sorte. Au sein de la flotte étudiée, un véhicule en particulier est choisi pour porter le boîtier d'acquisition. Il s'agit d'identifier *a priori* un véhicule au comportement représentatif de l'ensemble de la flotte, afin d'éviter de baser la construction du cycle normalisé sur des propriétés anormales. Par exemple, ceci revient à utiliser le véhicule d'un opérateur et non d'un chef d'équipe, qui peut être amené à circuler en dehors du périmètre habituel de la flotte.

Le boîtier d'acquisition *ISAAC DRU-900* est connecté au port OBD-II (*On-Board Diagnosis II*) du véhicule et paramétré pour une acquisition de la vitesse aux roues. La

fréquence d'enregistrement choisie est 1 Hz. Les vitesses enregistrées sont précises au kilomètre-heure près; en effet, l'ordinateur de bord du véhicule instrumenté n'autorise pas une meilleure précision pour les acquisitions du boîtier. Après son installation dans le véhicule récepteur, le boîtier d'acquisition collecte automatiquement les vitesses instantanées dès le démarrage du moteur, jusqu'à son extinction.

Enfin, afin d'éviter tout biais lié aux variations de comportement à court terme (à l'échelle de la journée, de la semaine) l'acquisition des données se fait sur la période la plus longue possible, soit six semaines sur le premier site et huit semaines sur le deuxième.

2.2 Traitement des données

Après acquisition, les données sont récupérées sur le système embarqué par le port USB d'un ordinateur portable puis passées à la plateforme *MATLAB R2009b* pour traitement. Les algorithmes et leur implémentation sous *MATLAB* furent réalisés expressément pour cette étude et sont maintenant présentés.

2.2.1 Caractérisation

La phase de caractérisation est la première manipulation des données collectées sur le terrain. Elle s'appuie sur neuf indicateurs quantitatifs. Ceux-ci ont été choisis en s'appuyant sur des publications antérieures, de telle sorte qu'ils permettent d'appréhender toutes les dimensions spécifiques des comportements routiers étudiés (Hung et al., 2007; Lin et Niemeier, 2003). Le Tableau 2.1 détaille les indicateurs choisis pour la caractérisation des comportements routiers.

Tableau 2.1 Indicateurs pour la caractérisation des comportements routiers

Indicateur	Définition	Unité
Vitesse moyenne	Distance parcourue sur temps de parcours	km.h ⁻¹
Vitesse maximale	Plus grande vitesse instantanée observée	km.h ⁻¹
Modes d'opération du véhicule	Ralenti	$v = 0 \text{ km.h}^{-1}$
	Accélération	$a > 1 \text{ m.s}^{-2}$ $v > 5 \text{ km.h}^{-1}$
	Décélération	$a < -1 \text{ m.s}^{-2}$ $v > 5 \text{ km.h}^{-1}$
	Croisière	$\alpha \in [-1; 1] \text{ m.s}^{-2}$ $v > 5 \text{ km.h}^{-1}$
	Basse vitesse	$v \in]0; 5] \text{ km.h}^{-1}$
PKE	$PKE = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n-1} (v_{i+1}^2 - v_i^2), \forall v_{i+1} > v_i \quad (2.1)$ <p>Avec avec v_i la vitesse instantanée au temps i et D la distance parcourue</p>	m.s ⁻²
SAFD	Codistribution de fréquence des vitesses et accélérations Intervalles de vitesse : 5 km.h^{-1} Intervalles d'accélération : 1 m.s^{-2}	% temps

Un jeu de cinq indicateurs traduit la répartition des différents *modes d'opération du véhicule* (ralenti/à l'arrêt, accélération, décélération, basse vitesse, croisière). Le poids de chaque mode est exprimé en pourcentage du temps total d'opération.

L'indice PKE est une mesure du travail fourni par le moteur lors des accélérations du véhicule (Watson, Milkins et Braunsteins, 1982). Homogène à une accélération et corrélé positivement au niveau des émissions polluantes à l'échappement, le PKE est utilisé comme «indicateur d'agressivité» de la conduite (Lin et Niemeier, 2003).

Enfin, une matrice est utilisée qui présente la répartition des vitesses et accélérations longitudinales, sous la forme d'un spectre en trois dimensions : il s'agit de la matrice SAFD

(pour *speed-acceleration frequency distribution*⁸) ou courbe de Watson (Nesamani et Subramanian, 2006). La matrice SAFD est complémentaire des premiers indicateurs : elle apporte des informations sur les plages de vitesses et d'accélération dans lesquelles le véhicule opère. En ce sens, il s'agit d'un outil plus fin que la simple répartition temporelle des modes d'opération. Par ailleurs, un affichage en trois dimensions permet une visualisation des plages de fonctionnement préférentielles et met également en évidence les événements extrêmes.

2.2.2 Δ_{cycle} : un indice de représentativité

Le processus d'assemblage d'un cycle normalisé fonctionne par comparaison entre des cycles «candidats», produits en grand nombre, et les données de terrain. L'écart entre le cycle normalisé et les données de référence doit être minimisé de telle sorte que le cycle final soit jugé représentatif de la réalité.

Dans la présente étude, la caractérisation des comportements s'appuie sur les neuf indicateurs présentés dans la section 2.2.1. La comparaison entre cycle et données de référence doit donc tenir compte de l'ensemble de ces indicateurs. La méthode adoptée est d'utiliser un *indice de proximité*, symbolisé par le terme Δ_{cycle} . Calculé à partir de l'ensemble des indicateurs de caractérisation entre le cycle et les données de terrain, il est défini de la sorte :

$$\Delta_{cycle} = \sum_{i=1}^n \frac{|\theta_i - \varepsilon_i|}{\min(\theta_i; \varepsilon_i)} + \delta_{SAFD} \quad (2.2)$$

Δ_{cycle} est la somme de deux composantes :

- θ_i (resp. ε_i) est le $i^{\text{ème}}$ indicateur parmi n du jeu de référence (resp. du cycle candidat)
- δ_{SAFD} quantifie l'écart entre les matrices SAFD de référence et du cycle candidat. Ce terme est calculé par somme quadratique des différences, élément par élément.

⁸ En français, codistribution de fréquence des vitesses et accélérations

Une petite valeur de Δ_{cycle} correspond à une bonne proximité des jeux de données comparés. La limite inférieure de l'indice est $\Delta_{cycle} = 0$, atteinte lorsque les deux jeux ont des propriétés identiques.

Enfin, si le poids d'un des cinq modes d'opération est jugé trop faible, il est exclu du calcul de l'indice Δ_{cycle} . En effet, la comparaison de petits indicateurs peut mettre en avant des différences relatives considérables, alors même que les deux termes présentent des valeurs absolues voisines. Un tel cas de figure conduirait à une surévaluation de l'indice Δ_{cycle} et introduirait un biais dans le processus d'assemblage du cycle normalisé.

Le seuil d'exclusion est fixé à 5 % : tout mode d'opération dont le poids est inférieur à cette valeur n'est pas pris en compte dans le calcul de l'indice de représentativité Δ_{cycle} .

2.2.3 Ralenti initial et final

Le terme de ralenti initial désigne l'intervalle entre le démarrage du moteur (qui active le boîtier enregistreur) et le début du premier déplacement. De la même manière, le ralenti final correspond au temps passé à l'arrêt après le dernier déplacement du véhicule jusqu'à l'arrêt du moteur (qui interrompt l'enregistrement par le boîtier).

Les durées moyennes des ralenti initiaux et finaux sont calculées, en préparation de la construction des cycles normalisés spécifiques. En effet, ces mêmes durées moyennes seront reproduites dans les cycles finaux, pour une meilleure représentativité. Les symboles ral_i et ral_f sont attribués aux moyennes respectives des ralenti initiaux et finaux d'un jeu de données.

2.3 Construction du cycle normalisé

Cette dernière étape a pour objectif de produire un grand nombre de cycles normalisés potentiels, par assemblage de microtrajets issus des enregistrements de terrain. La structure complète de l'algorithme d'assemblage est présentée en ANNEXE III.

L'algorithme fut élaboré spécifiquement pour ce projet, avant d'être transposé dans *MATLAB*. Il s'appuie sur un mécanisme itératif : un grand nombre de cycles potentiels est successivement assemblé, mais seul le cycle le plus proche des données réelles est retenu. Le détail de la méthode suivie est présenté dans les pages suivantes.

2.3.1 Préparation des microtrajets

Après caractérisation, l'ensemble des profils de vitesse collectés sur le terrain est scindé en microtrajets. Il existe plusieurs méthodes pour extraire des microtrajets d'un même profil de vitesse. La définition retenue et utilisée dans cette étude peut être énoncée de la sorte :

Un microtrajet est un profil de vitesse ininterrompu, qui commence et se termine nécessairement par une valeur de vitesse nulle et ne contient aucun arrêt intermédiaire.

La Figure 2.2 illustre par l'exemple cette définition. Il apparaît clairement que les périodes de ralenti entre deux microtrajets ne sont pas conservées lors du découpage des profils de vitesse.

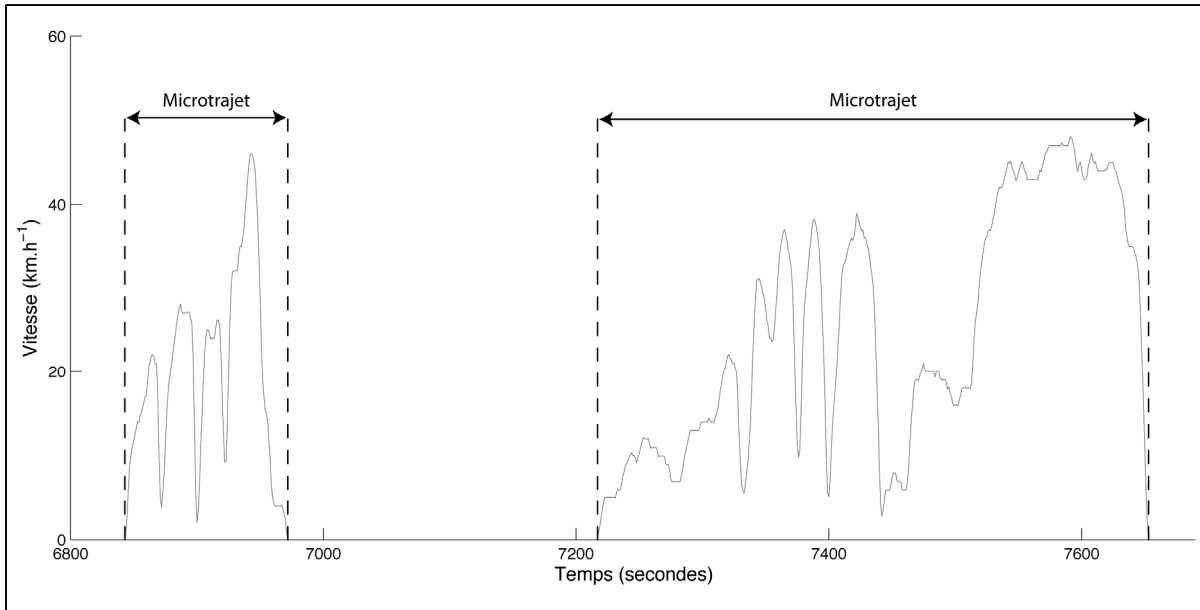


Figure 2.2 Microtrajets dans un profil de vitesse

Les microtrajets produits au cours de cette étape sont stockés dans une base de données sur laquelle l'algorithme d'assemblage est amené à s'appuyer. Ils sont l'élément unitaire de la construction des cycles normalisés.

2.3.2 Paramétrage

La durée des cycles normalisés produits est fixée arbitrairement. Les cycles transitoires durent typiquement entre 10 et 30 minutes (Hung et al., 2007). La durée t_{cycle} choisie pour les cycles spécifiques est comparable : 20 minutes soit 1200 secondes.

Comme énoncé précédemment, la configuration des cycles produits dépend des valeurs de ral_i et ral_f tels que définis dans la section 2.2.3. Les paramètres ral_i et ral_f assurent un début et une fin de cycle réaliste : les intervalles de temps passés au ralenti juste après le démarrage du moteur et juste avant son arrêt sont représentatifs de la réalité.

Par ailleurs, une valeur plafond est définie pour la durée cumulée des microtrajets $t_{microtrajets}$. Lorsque le cycle comprend moins de 10 secondes de ralenti (hors ral_i et ral_f),

il est considéré comme saturé. Cet état commande une sortie de boucle, de telle sorte qu'une nouvelle série de cycles candidats puisse être assemblée. Le test porte sur la condition suivante :

$$t_{microtrajets} \geq t_{cycle} - (ral_i + ral_f + 10) \quad (2.3)$$

Enfin, une limite de temps est spécifiée pour l'exécution du processus d'assemblage. L'algorithme ne comprend pas de condition d'arrêt basée sur la qualité des cycles candidats produits : quel que soit le meilleur cycle Δ_{cycle} rencontré, de nouveaux candidats seront assemblés et testés. Une condition temporelle est alors incluse dans l'algorithme, définie arbitrairement selon le temps disponible pour l'assemblage. Dans le cadre de cette étude, le processus était autorisé à fonctionner pendant une semaine pleine, d'où le temps de calcul maximal $t_{calcul} = \left(7d * 24 \frac{h}{d} * 3600 \frac{s}{h}\right) = 604800s$. Cette durée a été définie de manière empirique. Des essais préliminaires du processus d'assemblage permis de mesurer le taux de production des cycles candidats à 61 cycles à la seconde, soit 220 000 cycles à l'heure. À ce rythme, environ 4 jours d'exécution sont nécessaires pour obtenir un cycle caractéristique des données de terrain, tandis que 2 à 3 jours supplémentaires permettent d'améliorer légèrement encore la représentativité du cycle. Au-delà de cette durée, aucune convergence du cycle vers les propriétés des données de terrains n'est observable.

2.3.3 Exécution itérative

Un processus itératif permet de générer des cycles candidats à partir des microtrajets disponibles. Cette section en détaille le mécanisme.

- 1) le point de départ du processus est la sélection d'un premier microtrajet, choisi au hasard parmi l'ensemble des microtrajets disponibles. Il est flanqué d'un ralenti initial ral_i en début de cycle. Il est également adjoint d'un ralenti final, d'une durée telle que le profil de vitesse ainsi établi atteigne la durée souhaitée t_{cycle} (voir Figure 2.3). Cette structure, bien que simpliste, correspond au premier cycle candidat;
- 2) un deuxième microtrajet, nécessairement différent du premier, est sélectionné. Il est combiné au premier et complété de ralenti, dans la configuration suivante (voir Figure 2.4) :
 - a) ral_i et ral_f en début et fin de cycle respectivement;
 - b) les deux microtrajets sont séparés d'une phase de ralenti, de telle sorte que la durée totale du profil de vitesse atteigne t_{cycle} .
 À son tour, cette structure est considérée comme un cycle candidat;
- 3) un k ème ($k > 2$) microtrajet est sélectionné et adjoint aux microtrajets précédents. ral_i et ral_f sont situés en début et fin de cycle, et des phases de ralenti sont réparties aléatoirement entre les microtrajets pour amener le cycle à sa durée souhaitée. La Figure 2.5 illustre une telle structure à k microtrajets;
- 4) l'ajout de microtrajets successifs est interrompu lorsque la condition portant sur $t_{microtrajets}$ est rencontrée (équation (2.3)). L'algorithme reprend alors à l'étape 1 par la sélection d'un nouveau microtrajet initial.

Chaque fois qu'un cycle candidat est produit (étapes 1, 2, 3) son métrique de proximité Δ_{cycle} est calculé. Si la valeur de Δ_{cycle} est la plus petite rencontrée à date, le cycle candidat est conservé en mémoire. Dans le cas contraire, il est effacé.

Enfin, lorsque le processus atteint le temps limite t_{calcul} la construction de cycles candidats est interrompue. De tous les cycles candidats assemblés, celui qui se caractérise par le plus petit métrique Δ_{cycle} devient le cycle normalisé final.

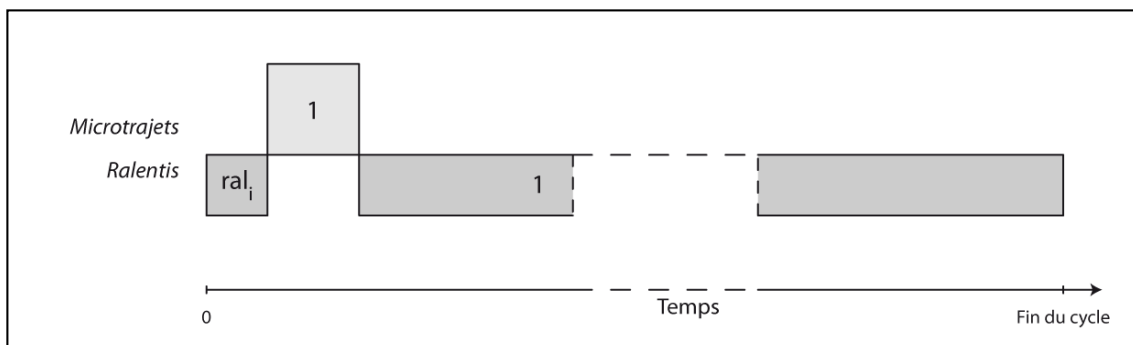


Figure 2.3 Structure d'un cycle candidat comprenant un microtrajet

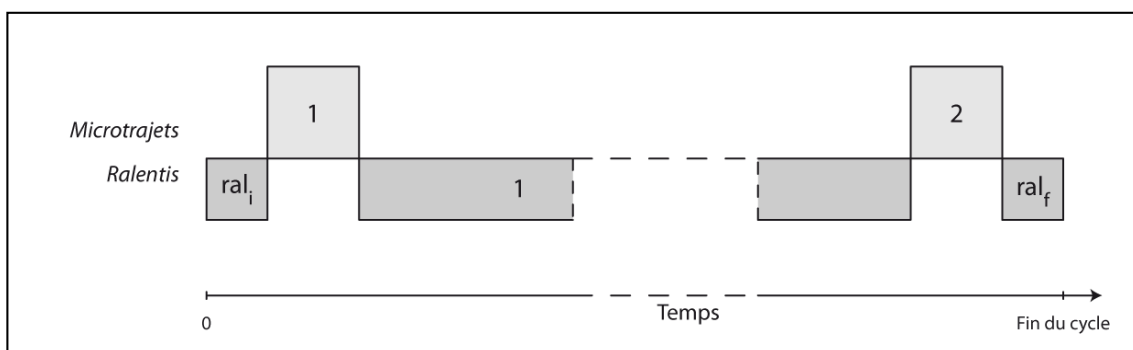
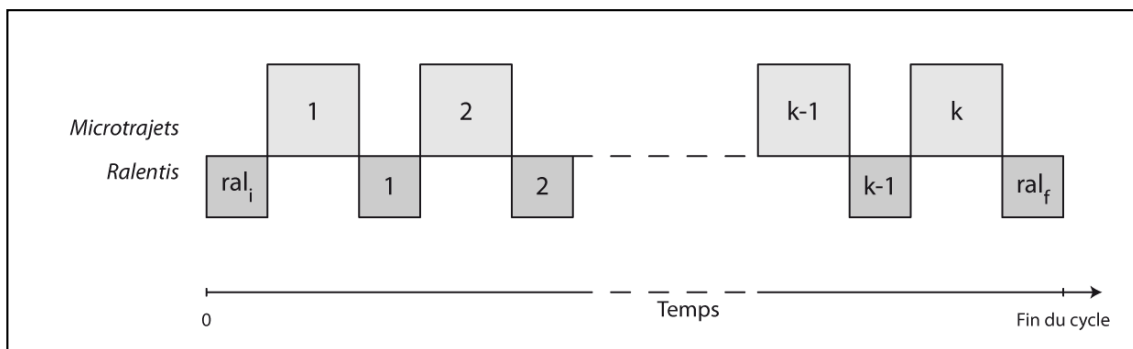


Figure 2.4 Structure d'un cycle candidat comprenant deux microtrajets

Figure 2.5 Structure générique d'un cycle comprenant k microtrajets

2.4 Synthèse

Une méthodologie complète est mise en place pour la construction de cycles normalisés spécifiques. La collecte des données de terrain, première des trois phases, se fait par instrumentation directe : un véhicule représentatif de la flotte étudiée est équipé d'un boîtier enregistreur pour un suivi des vitesses instantanées. Dans un deuxième temps, les comportements observés sont caractérisés selon neuf indicateurs quantitatifs et les profils de vitesse enregistrés sont fragmentés en microtrajets. Enfin, le processus d'assemblage à proprement parler s'appuie sur une sélection aléatoire de microtrajets pour produire un grand nombre de cycles candidats. Les propriétés de chaque cycle candidat sont comparées à celles de l'ensemble des données de terrain : le cycle dont les caractéristiques sont les plus proches des comportements réels est conservé.

Le CHAPITRE 3 traite de l'application de cette méthodologie à deux flottes de véhicules utilitaires de la région de Montréal.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

La méthodologie présentée au CHAPITRE 2 fut mise en place auprès de deux flottes de véhicules utilitaires de la région de Montréal. Les résultats des phases successives – collecte et traitement des données, assemblage des cycles normalisés – sont présentés dans les prochaines pages. Pour des raisons de confidentialité vis-à-vis des partenaires du projet, les sites étudiés seront désignés par les termes *site A* et *site B* tandis que les cycles normalisés qui y sont associés seront appelés *ETSA* et *ETSB*.

3.1 Collecte des données

Le site A, premier milieu étudié, correspond à l’environnement de travail d’une compagnie privée. Les opérateurs sont amenés à circuler en majorité dans l’enceinte d’un site fermé et très peu sur le réseau routier conventionnel. Après discussion avec le chef d’équipe, un véhicule fut choisi pour représenter l’ensemble de la flotte concernée. Ce véhicule porta le boîtier enregistreur lors d’une campagne de mesures de 6 semaines, au cours de laquelle 28 heures d’enregistrements furent accumulées pour une distance parcourue de 614 km.

La deuxième flotte étudiée est utilisée sur le site B, une municipalité québécoise. Les véhicules circulent sur le réseau routier, essentiellement en milieu urbain et dans une certaine mesure sur autoroute. Là encore, le véhicule jugé le plus représentatif fut équipé à son tour du boîtier enregistreur. Les 8 semaines de relevés livrèrent 129 heures de données, correspondant à 2256 km parcourus.

Les principales caractéristiques des données enregistrées sur les sites A et B sont présentées au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Données issues de la phase de collecte de terrain

	Site A	Site B
Nombre de trajets enregistrés	185	499
Durée totale des enregistrements	28 h 25 min	129 h 27 min
Distance totale parcourue	614 km	2256 km
Durée moyenne des trajets	9 min 13 s	15 min 34 s
Distance moyenne par trajet	3324 m	4502 m

Par ailleurs, la quantité de données collectées est équivalente ou supérieure aux données collectées pour la construction de divers cycles normalisés. En particulier, le cycle américain *Unified Cycle* ou *LA01* est issu de 28 heures d'enregistrements (Lin et Niemeier, 2002), le cycle spécifique à Hong-Kong provient d'environ 35 heures d'enregistrements (Hung et al., 2007) et le cycle de Pune a été assemblé à partir de seulement 3 heures de données (Kamble, Mathew et Sharma, 2009).

3.2 Caractérisation des comportements observés

Les enregistrements réalisés auprès des véhicules instrumentés furent extraits du boîtier *ISAAC*, transférés sur ordinateur et passés à la plateforme *MATLAB* pour leur caractérisation. Les propriétés des mesures de terrain sont présentées dans le Tableau 3.2; elles y sont également comparées aux principaux cycles normalisés standard d'Amérique du Nord. La Figure 3.1 présente, quant à elle, leur codistribution des vitesses et accélérations tirées des matrices SAFD.

Tableau 3.2 Caractérisation des données et comparaison aux cycles standards

Indicateurs		Site A	Site B	<i>UDDS</i> urbain	<i>HWFET</i> autoroutier	<i>US06</i> urbain	<i>NYCC</i> urbain
Vitesse moyenne	km.h ⁻¹	21,6	17,4	31,5	77,6	77,2	11,4
Vitesse maximale	km.h ⁻¹	127,5	130,4	91,2	96,4	129,2	44,6
Modes d'opération du véhicule	Ralenti $v = 0 \text{ km.h}^{-1}$	31,1	43,6	18,9	0,8	7,5	35,0
	Accélération $a > 1 \text{ m.s}^{-2}$ $v > 5 \text{ km.h}^{-1}$	20,9	13,7	21,0	8,2	22,0	19,9
	Décélération $a < -1 \text{ m.s}^{-2}$ $v > 5 \text{ km.h}^{-1}$	17,6	12,1	17,2	8,4	23,3	20,2
	Croisière $a \in [-1; 1] \text{ m.s}^{-2}$ $v > 5 \text{ km.h}^{-1}$	28,1	26,6	42,1	82,6	46,1	17,9
	Basse vitesse $v \in]0; 5] \text{ km.h}^{-1}$	2,3	4,0	0,7	0,0	1,1	7,0
	% temps						
PKE	m.s ⁻²	0,55	0,37	0,35	0,14	0,42	0,62

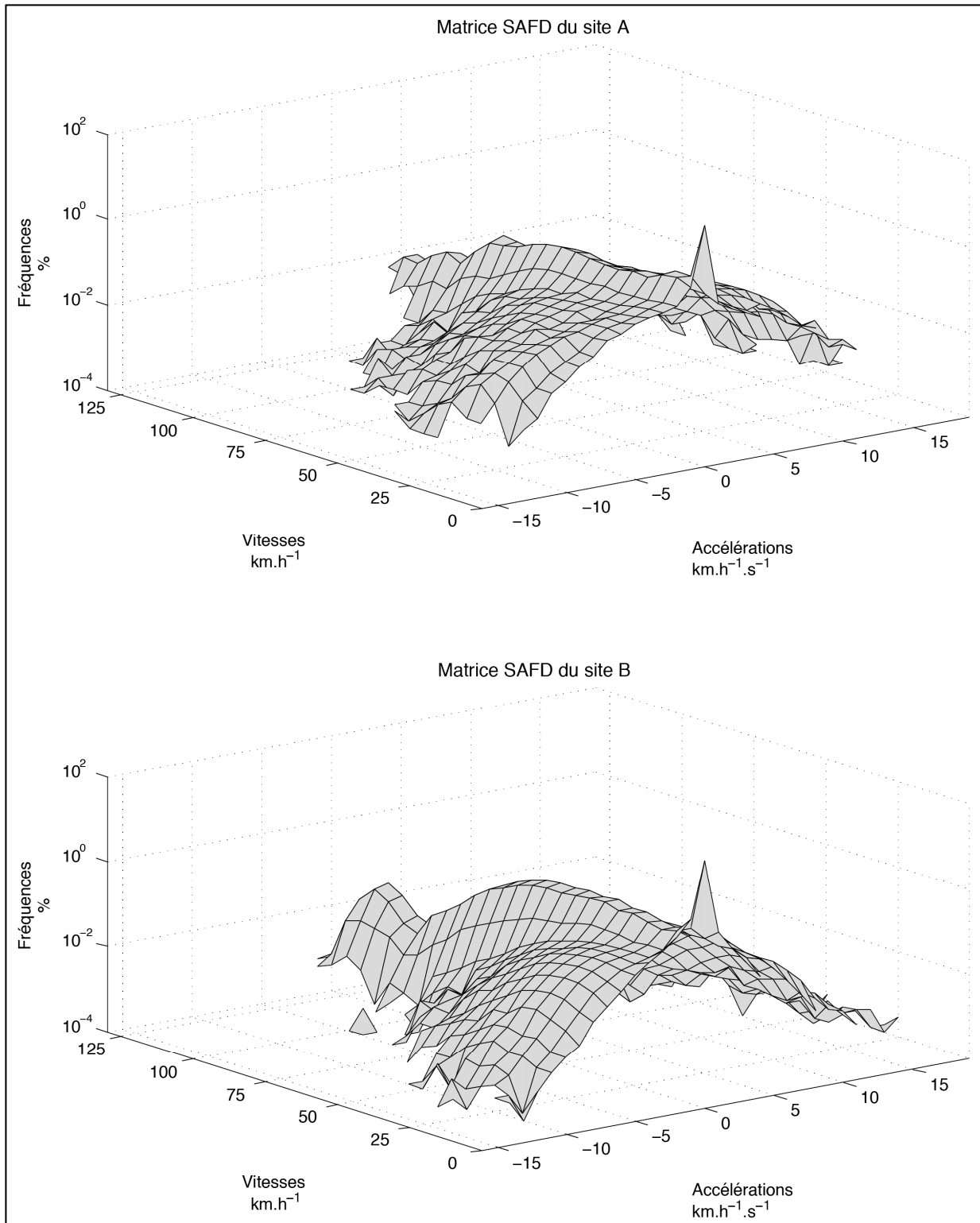


Figure 3.1 Représentation graphique des matrices SAFD pour les sites A et B

Pour les deux sites étudiés, les trajets enregistrés sortent de la norme et diffèrent significativement des cycles standard. En particulier, la répartition des modes d'opération montre une tendance importante au ralenti, au-delà des 30% au site A et proche des 45 % au site B, alors que la fraction habituelle des cycles routiers est généralement en dessous des 20 %. Il existe aussi un fort contraste entre les vitesses maximales (élevées) et moyennes (basses) : on observe un rapport de 1:5,9 au site A et 1:7,5 au site B, de loin supérieur aux cycles standard. Enfin, un indice PKE élevé de $0,55 \text{ m.s}^{-2}$ traduit l'agressivité de la conduite sur le site A, significativement supérieure aux cycles routiers et semblable aux cycles urbains denses.

Le standard le plus proche est le cycle urbain new-yorkais *NYCC*, qui présente quelques similarités avec les sites A et B. En particulier, il comporte un taux de ralenti comparable (35 %) et simule une conduite agressive ($\text{PKE} = 0,62 \text{ m.s}^{-2}$). Le site A et *NYCC* partagent également des fractions d'accélération et décélération voisines des 20 %. En revanche, *NYCC* est un cycle intrinsèquement lent : la vitesse maximale est de $44,6 \text{ km.h}^{-1}$ et la moyenne est de $11,4 \text{ km.h}^{-1}$. Ces valeurs ne sont en rien comparables aux enregistrements réalisés sur les sites A et B, pour lesquels la vitesse moyenne est double et la vitesse maximale est triple.

Par conséquent, la caractérisation des données de terrain donne des résultats hors du commun. Les conditions d'opération observées ne correspondent pas aux cycles existants, ce qui justifie la construction de cycles normalisés spécifiques pour l'estimation des émissions polluantes sur les deux sites étudiés.

Enfin, l'indicateur de basse vitesse présente des valeurs absolues inférieures à 5 % pour les deux sites étudiés. D'après la section 2.2.2, ceci signifie que cet indicateur ne sera pas pris en compte dans le calcul de l'indice de représentativité Δ_{cycle} .

3.3 Cycles normalisés

Cette section présente le résultat de la phase de traitement des données, de la préparation des microtrajets à l'assemblage des cycles normalisés *ETSA* et *ETSB*.

3.3.1 Microtrajets issus des enregistrements de terrain

Les données collectées sur chaque site sont découpées en microtrajets, dans l'optique de l'assemblage des cycles normalisés finaux. Comme défini dans la section 2.3.1, le terme de microtrajet désigne tout déplacement du véhicule entre deux arrêts successifs. Les enregistrements réalisés sur les sites A (28 heures) et B (129 heures) furent respectivement scindés en 1087 et 4333 microtrajets.

Tableau 3.3 Propriétés statistiques des microtrajets produits

	Site A	Site B
Durée moyenne	66 s	62 s
Quartile inférieur	8 s	9 s
Deuxième quartile (médiane)	27 s	20 s
Quartile supérieur	83,5 s	83 s
Décile supérieur	178 s	167 s
Durée des deux microtrajets les plus longs	770 s 773 s	1261 s 1506 s

Le Tableau 3.3 présente des informations sur la répartition statistique des durées des microtrajets produits à partir des données des sites A et B. Des quantiles remarquables permettent de comparer la distribution des durées entre les deux sites d'étude. Par ailleurs, l'histogramme joint en ANNEXE V présente conjointement la distribution de ces mêmes microtrajets. Des intervalles de 20 secondes ont été définis et le poids de chaque classe de durée est exprimé en pourcentage du nombre total de microtrajets.

Les distributions des durées sur les deux sites étudiés présentent plusieurs similarités. En particulier, leurs premier et dernier quartiles sont très proches – aux alentours de 9 secondes et 83 secondes respectivement – et leurs durées moyennes sont aussi comparables, valant 66 secondes au site A et 62 secondes au site B. Le décile supérieur est également du même ordre de grandeur – respectivement 178 secondes et 167 secondes pour A et B. Ceci signifie qu'environ 90 % des microtrajets durent moins de trois minutes, quel que soit le site étudié.

En revanche, la médiane diffère significativement entre les deux jeux de données : elle s'élève à 27 secondes sur le site A contre seulement 20 secondes sur le site B. Ceci traduit pour ce dernier une plus grande proportion de microtrajets dont la durée est comprise entre 9 et 20 secondes. Enfin, les microtrajets les plus longs y durent 1506 et 1261 secondes, contre 773 et 770 secondes au site A. Le site B présente donc simultanément une proportion importante de microtrajets courts ainsi que quelques microtrajets très longs.

La Figure 3.2 croise, pour les sites A et B, les durées des microtrajets et les vitesses maximales atteintes. Sa lecture révèle une tendance différente pour chaque site étudié. En ce qui concerne le site A, aucune corrélation ne semble se dégager entre durées et vitesses maximales. Les pointes au-delà de 100 km.h^{-1} sont atteintes au cours de microtrajets de durées très variables, s'échelonnant entre 82 et 770 secondes, et la vitesse la plus haute de $127,5 \text{ km.h}^{-1}$ correspond à un microtrajet de 193 secondes. À l'inverse, les données du site B montrent une corrélation positive entre la durée des microtrajets et les vitesses maximales. En particulier, deux groupes de microtrajets se démarquent (indiqués sur la Figure 3.2).

Groupe 1 : 4 microtrajets d'une durée comprise entre 880 et 1000 secondes présentent une vitesse de pointe supérieure à 120 km.h^{-1} . Ce sont les plus rapides du jeu de données.

Groupe 2 : 7 microtrajets d'une durée supérieure à 880 secondes ont une vitesse de pointe voisine des 80 km.h^{-1} .

En deçà de 880 secondes, les vitesses atteintes sont significativement plus faibles, avec seulement 3 événements au-delà de 100 km.h^{-1} .

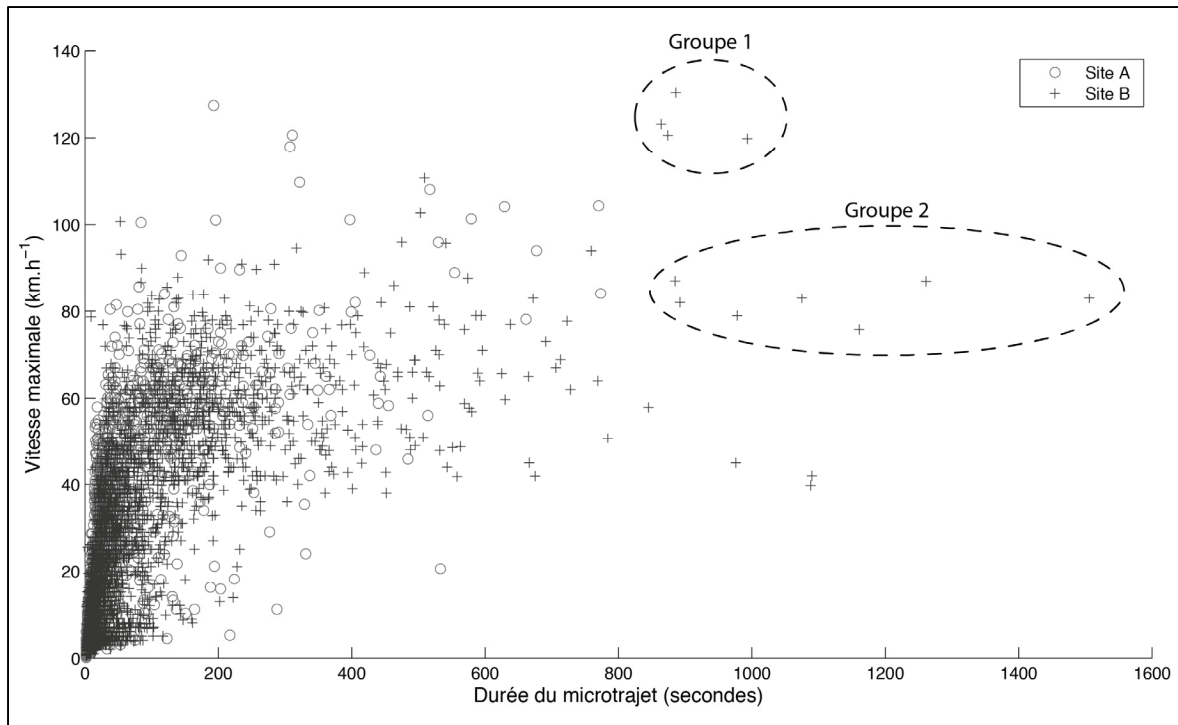


Figure 3.2 Vitesse maximale atteinte selon la durée du microtrajet

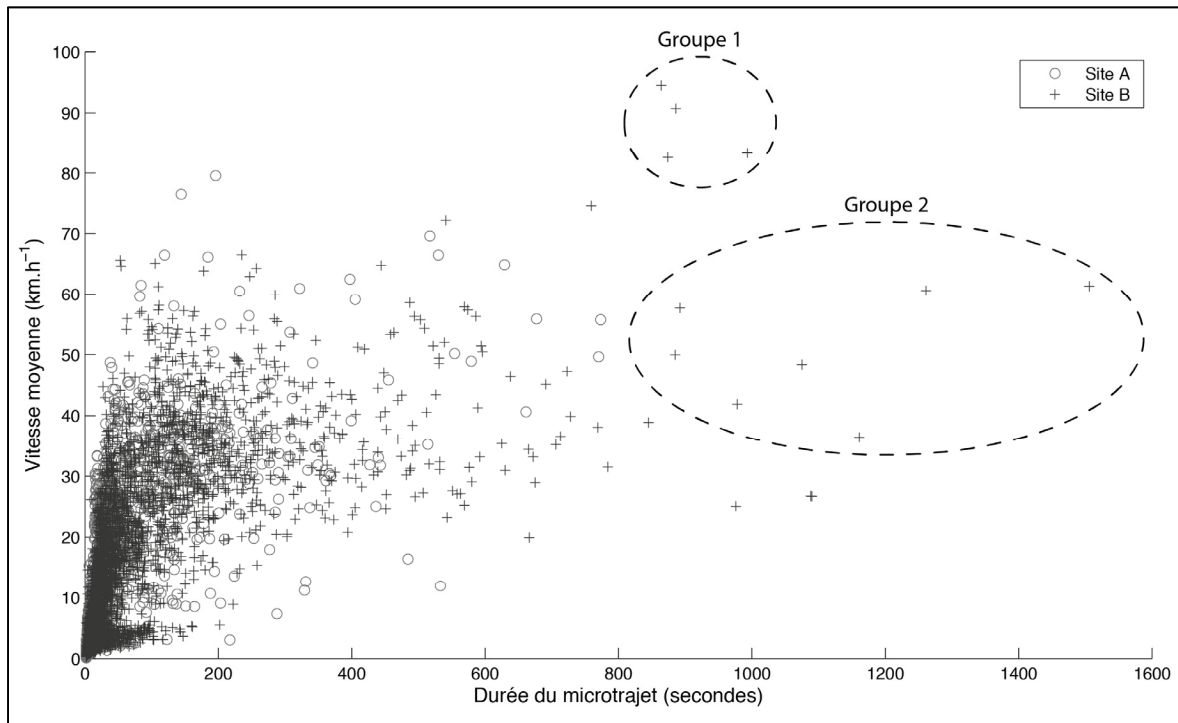


Figure 3.3 Vitesse moyenne selon la durée du microtrajet

La Figure 3.3 présente, quant à elle, les vitesses moyennes des mêmes microtrajets en fonction de leur durée. Ce graphique appuie les affirmations faites plus haut.

D'une part, les microtrajets issus du site A ne montrent aucune corrélation entre leurs durées et leurs vitesses moyennes. Les vitesses moyennes au-delà de 50 km.h^{-1} correspondent à des microtrajets de 82 à 770 secondes. En d'autres termes, les vitesses élevées ne sont pas l'apanage des microtrajets les plus longs.

D'autre part, les microtrajets du site B rassemblés dans le Groupe 1 (Figure 3.2) sont également remarquables de par leurs vitesses moyennes. En effet, le Groupe 1 présente des vitesses moyennes supérieures à 80 km.h^{-1} qui sont les plus élevées du jeu de données. La corrélation positive entre la durée des microtrajets et les vitesses rencontrées se confirme.

3.3.2 Caractéristiques des microtrajets et comportements routiers

La distribution des durées des microtrajets apporte des informations sur le comportement routier des flottes étudiées. Les hypothèses posées quant aux types de route empruntés par chaque flotte semblent se vérifier. En particulier, il est attendu que les véhicules du site B évoluent majoritairement en milieu urbain mais soient amenés occasionnellement à circuler sur autoroute. L'analyse des microtrajets abonde en ce sens.

D'une part, les microtrajets de 9 à 20 secondes – entre le premier quartile et la médiane des durées – sont présents en forte proportion. Les vitesses maximales de ces microtrajets ne dépassent pas 50 km.h^{-1} , à l'exception d'une pointe à 79 km.h^{-1} . Ces valeurs sont compatibles avec un comportement urbain qui se caractérise par des déplacements régulièrement interrompus (intersections, feux de circulation, congestion) et à vitesse réduite. D'autre part, les microtrajets des Groupes 1 et 2 (Figure 3.2 et Figure 3.3) durent plus de 880 secondes et présentent des vitesses moyennes et maximales élevées. Ces caractéristiques sont typiques de déplacements autoroutiers.

À l'inverse, l'absence de corrélation entre la durée des microtrajets et les vitesses maximales et moyennes ne permet pas d'identifier de comportement remarquable – urbain ou autoroutier – pour les véhicules du site A. L'hypothèse d'une circulation exclusive en milieu contrôlé, déconnecté du réseau routier conventionnel, est compatible avec ces observations.

3.3.3 Impact attendu de la durée des microtrajets sur l'assemblage des cycles normalisés

Comme expliqué à la section 2.3.3, la méthode d'assemblage des cycles s'appuie sur une sélection aléatoire de microtrajets. Ils sont agencés bout à bout de telle sorte que la longueur totale du profil de vitesse atteigne une durée de référence. Par conséquent, il est impossible de regrouper dans un même cycle des microtrajets dont la somme des durées est supérieure à la durée de référence.

Soit un cycle candidat de durée t_{cycle} . Il comprend k microtrajets de durées respectives $(T_i)_{i \in \{1 \dots k\}}$. Les microtrajets sont séparés par $k - 1$ ralentis de durées respectives $(t_i)_{i \in \{1 \dots k-1\}}$ et les ralentis initial et final présentent les durées respectives ral_i et ral_f . La durée cumulée des ralentis vaut donc :

$$t_{ralenti} = ral_i + ral_f + \sum_{i=1}^{k-1} t_i \quad (3.1)$$

Le processus d'assemblage peut uniquement sélectionner des microtrajets de durée inférieure à $t_{ralenti}$ ou, en d'autres termes, si leur durée est «compatible» avec les microtrajets déjà présents dans le cycle candidat. Un microtrajet court a donc une probabilité plus élevée d'être présent dans un cycle candidat qu'un microtrajet long.

L'analyse des microtrajets produits pour le site A ne met en évidence aucune corrélation entre leur durée et leurs propriétés. Le processus d'assemblage peut donc s'appuyer sur des microtrajets relativement courts tout en produisant un cycle normalisé représentatif des comportements réels.

À l'inverse, une corrélation positive entre durée des microtrajets et vitesse maximale a été identifiée sur le site B. La durée importante des microtrajets les plus rapides constitue un obstacle potentiel dans la production d'un cycle normalisé représentatif. En effet, la caractérisation des comportements révèle un fort taux de ralenti (43,6 %). Sa durée totale étant fixée à 1200 secondes, un cycle normalisé représentatif doit donc comprendre environ 520 secondes de ralenti et 680 secondes de déplacement.

Or, les microtrajets qui comprennent des vitesses au-delà de 120 km.h^{-1} durent entre 850 et 1000 secondes (Groupe 1 de la Figure 3.2), ce qui est supérieur aux 680 secondes de déplacement souhaitées. Il y a donc incompatibilité entre les deux conditions : un cycle comprenant 43,6 % de ralenti ne peut pas présenter une vitesse maximale représentative de la réalité. Une sous-évaluation significative de la vitesse maximale du cycle normalisé est attendue.

3.3.4 Cycles normalisés finaux

Un cycle normalisé de 20 minutes (1200 secondes) fut produit pour chacun des deux sites étudiés. Ils résultent de l'exécution pendant une semaine des algorithmes d'assemblage présentés dans le CHAPITRE 2.

3.3.4.1 Site A et cycle *ETSA*

Le cycle *ETSA* est le cycle normalisé caractéristique des comportements observés sur le site A. Il est le meilleur cycle produit après 7 jours d'exécution du programme d'assemblage, avec un métricateur de proximité $\Delta_{cycle} = 0,149$.

Le profil du cycle *ETSA* est présenté en ANNEXE VI.

Tableau 3.4 Caractéristiques du cycle *ETSA* et comparaison aux données de terrain

Indicateurs	Site A	Cycle <i>ETSA</i>	Différence	
Temps	28 h 25 min	20 min 00 s	--	
Distance	614 km	7,4 km	--	
Vitesse moyenne	21,6 km.h ⁻¹	22,2 km.h ⁻¹	2,5 %	
Vitesse maximale	127,5 km.h ⁻¹	120,6 km.h ⁻¹	5,7 %	
Modes d'opération du véhicule	Ralenti	31,1 %	31,2 %	< 0,1 %
	Accélération	20,9 %	20,9 %	0,2 %
	Décélération	17,6 %	17,8 %	1,1 %
	Basse vitesse	2,3 %	0,8 %	Donnée non pertinente
	Croisière	28,1 %	29,4 %	4,8 %
PKE	0,554 m.s ⁻²	0,556 m.s ⁻²	0,4 %	
SAFD	--	--	0,0020	

Le Tableau 3.4 présente les propriétés d'*ETSA* d'une part, des données de terrain d'autre part, ainsi que leur différence relative pour chaque indicateur.

Parmi les indicateurs choisis pour contrôler la représentativité du cycle normalisé construit, tous diffèrent de moins de 10 % entre les données collectées et le cycle final. En particulier, la fraction des modes d'opération est très proche entre le cycle et les mesures, avec un écart relatif maximal de 4,8 % (croisière). De plus, le cycle normalisé traduit très bien l'agressivité des comportements observés, comme en témoigne l'indice PKE qui ne diffère que de 0,4 %.

Seules les vitesses maximales diffèrent de plus de 5 %. Cet écart est certes significatif, mais ne conduit pas à une disqualification du cycle : la vitesse maximale du cycle correspond au deuxième maximum observé sur le terrain, et se situe largement dans le 99^e centile.

À titre de comparaison, la méthode proposée par Hung et al. (2007) pour la construction de cycles spécifiques à Hong Kong repose sur 14 indicateurs. Les caractéristiques de deux d'entre eux – urbain et suburbain – diffèrent de moins de 5 % des données de celles des données de terrain, à l'exception de la vitesse maximale du cycle suburbain qui est surévaluée de 20 %. Le troisième cycle – autoroutier – présente des propriétés plus éloignées des données de terrain : sept indicateurs diffèrent de moins de 5 %, cinq d'entre eux diffèrent de 5 % à 10 % et deux autres diffèrent de plus de 10 %. Par ailleurs, Kamble, Mathew et Sharma (2009) basent leur méthodologie sur la répartition de quatre modes d'opération des véhicules – accélération, décélération, croisière, ralenti. Le cycle de Pune ainsi élaboré présente des propriétés qui diffèrent de 2,5 % à 7,1 % des caractéristiques des données de terrain.

À la lumière de ces éléments, il est raisonnable d'affirmer que le programme d'assemblage a produit un cycle normalisé représentatif. En effet, le cycle *ETSA* présente des caractéristiques très proches des données de terrain dont il est issu. Le degré de proximité entre cycle et comportements réels est équivalent ou meilleur que dans les diverses études citées, ce qui confirme que la méthodologie employée est pertinente et exploitable.

3.3.4.2 Site B et cycle *ETSB*

Le cycle *ETSB* est le cycle normalisé construit pour le site B. Son profil est présenté en ANNEXE VII.

Lui aussi issu de 7 jours d'exécution du programme d'assemblage, le cycle *ETSB* présente un méta-indicateur de proximité $\Delta_{cycle} = 0,486$. Cette valeur, plus élevée que pour *ETSA*, indique immédiatement une moins bonne correspondance entre le cycle et les données de terrain.

Tableau 3.5 Caractéristiques du cycle *ETSB* et comparaison aux données de terrain

Indicateurs		Site B	Cycle <i>ETSB</i>	Différence
Temps		129 h 27 min	20 min 00 s	--
Distance		2256 km	5,7 km	--
Vitesse moyenne		17,4 km.h ⁻¹	17,1 km.h ⁻¹	2,1 %
Vitesse maximale		130,4 km.h ⁻¹	100,7 km.h ⁻¹	29,5 %
Modes d'opération du véhicule	Ralenti	43,6 %	43,5 %	0,2 %
	Accélération	13,7 %	13,4 %	2,2 %
	Décélération	12,1 %	12,1 %	0,2 %
	Basse vitesse	4,0 %	4,2 %	Donnée non pertinente
	Croisière	26,6 %	26,8 %	1,0 %
PKE		0,368 m.s ⁻²	0,417 m.s ⁻²	13,2 %
SAFD		--	--	0,0019

Le Tableau 3.5 présente le détail des écarts, indicateur par indicateur, entre le cycle *ETSB* et les données de terrain. Il révèle des résultats plus contrastés pour le cycle *ETSB* qu'ils ne le sont pour *ETSA*. D'un côté, la fraction des différents modes d'opération est très similaire entre le cycle et les données de terrain, avec un écart relatif maximal de 2,2 % (accélération). Les vitesses moyennes sont également très proches et ne diffèrent que de 2,1 %. En revanche,

deux indicateurs diffèrent de plus de 10 % entre le cycle et les données collectées : la vitesse maximale et l'indice PKE.

La vitesse maximale du cycle (100,7 km.h⁻¹, soit 29,7 km.h⁻¹ inférieure à la valeur visée) est l'indicateur le plus critique. Cette différence très significative était attendue, comme l'explique l'analyse des microtrajets qui est faite à la section 3.3.3. Malgré tout, la vitesse maximale du cycle est dans le 98^e percentile des vitesses maximales sur site. Le cycle ne reproduit donc pas le comportement extrême mais traduit néanmoins la tendance aux hautes vitesses observée dans la réalité.

Par ailleurs, l'indice PKE est surévalué de 13,2 % dans le cycle *ETSB*. Les deux valeurs restent du même ordre de grandeur, et sont comparables à celles de cycles urbains standard (*UDDS* 0,350 m.s⁻²; *SC03* 0,412 m.s⁻²; *US06* 0,410 m.s⁻²). Par conséquent, même s'il diffère significativement des comportements observés, le cycle présente une valeur réaliste du PKE.

Enfin, les erreurs mesurées entre *ETSB* et les données de terrain peuvent être comparées à d'autres études – comme cela a été fait pour le cycle *ETSA* à la section 3.3.4.1. Il en ressort que les erreurs constatées pour deux des neuf indicateurs révèlent bien une limite de la méthodologie, mais que le cycle *ETSB* peut néanmoins être considéré représentatif des comportements réels qu'il doit reproduire.

3.4 Synthèse

La phase de mesure de terrain, de six à huit semaines pour chaque site, a produit un grand volume d'informations. Les profils de vitesse enregistrés à bord des véhicules instrumentés ont permis de dresser le portrait des comportements spécifiques à chaque flotte étudiée. Les données enregistrées ont été scindées en microtrajets, lesquels ont permis l'assemblage de deux cycles normalisés pour simuler les caractéristiques réelles d'opération. Une limite de la méthodologie employée a cependant été découverte, qui sous certaines conditions peut impacter la représentativité des cycles produits.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Le CHAPITRE 4 traite du bien-fondé et de la pertinence du projet de recherche qui a conduit aux cycles *ETSA* et *ETSB*, présentés plus haut. Quelques perspectives et pistes de réflexion y sont également apportées, qui portent un regard plus dynamique et systémique sur l’outil des cycles normalisés. Enfin, des recommandations sont faites pour corriger les limites de l’algorithme mises en évidence par l’analyse des résultats.

4.1 Pertinence et spécificité des cycles spécifiques assemblés

La Loi canadienne sur la protection de l'environnement (Canada, 1999) définit les normes antipollution auxquelles est soumis le parc automobile national. Les cycles *UDDS* et *HWFET*, également employés aux États-Unis, servent de base méthodologique pour la mesure des taux d'émissions.

Comme le montre le Tableau 4.1, les cycles normalisés *ETSA* et *ETSB* ont peu en commun avec les cycles standard mentionnés plus haut. Il existe une dichotomie entre les deux cycles spécifiques, représentatifs de l'opération des véhicules dans leur environnement, et les procédures associées aux normes antipollution, qui servent d’outil réglementaire sans réel lien avec les usages des véhicules étudiés.

Les principales divergences entre *ETSA* et *ETSB* d’une part, les cycles standard d’autre part concernent l’agressivité des comportements simulés. En effet, tant *UDDS* que *HWFET* présentent des vitesses maximales et des valeurs de PKE significativement inférieures aux deux cycles spécifiques *ETSA* et *ETSB*. Ils sous-évaluent également le temps passé au ralenti, ainsi que l’amplitude entre la vitesse moyenne et la vitesse maximale.

Tableau 4.1 Propriétés des cycles *ETSA*, *ETSB* et des standard nord-américains

Indicateurs		<i>ETSA</i>	<i>ETSB</i>	<i>UDDS</i> urbain	<i>HWFET</i> autoroutier	<i>US06</i> urbain	<i>NYCC</i> urbain
Temps		20 min 00 s	20 min 00 s	22 min 49 s	12 min 45 s	9 min 56 s	9 min 58 s
Distance	km	7,4	5,7	12,0	16,5	12,9	1,9
Vitesse moyenne	km.h ⁻¹	22,4	17,1	31,5	77,6	77,2	11,4
Vitesse maximale	km.h ⁻¹	120,6	100,7	91,2	96,4	129,2	44,6
Modes d'opération	Ralenti	31,2	43,5	18,9	0,8	7,5	35,0
	Accélération	20,9	13,4	21,0	8,2	22,0	19,9
	Décélération	17,8	12,1	17,2	8,4	23,3	20,2
	Basse vitesse	0,8	4,2	0,7	0,0	1,1	7,0
	Croisière	29,4	26,8	42,1	82,6	46,1	17,9
PKE	m.s ⁻²	0,56	0,42	0,35	0,14	0,42	0,62

À la lumière des résultats de cette étude, il apparaît plus que pertinent que les bilans d'émissions des deux flottes étudiées soient réalisés avec des cycles assemblés à cette fin, par opposition aux cycles déjà disponibles dans la littérature.

4.2 Utilisation des cycles dans le bilan d'émissions polluantes

Comme il a été mentionné dans le CHAPITRE 1, les cycles normalisés peuvent être utilisés selon deux approches. D'une part, ils sont à la base de la réglementation antipollution et servent de trajets de référence pour l'expression des taux d'émission. D'autre part, ils permettent une caractérisation des réseaux et comportements routiers régionaux à des fins de diagnostics de mobilité et environnementaux.

Les cycles *ETSA* et *ETSB*, dont le profil et les caractéristiques sont présentés et analysés dans le présent document, servent à des fins de bilans d'émissions polluantes. Plus spécifiquement, chacun représente le comportement d'une flotte de véhicules utilitaires fonctionnant au

propane. L'objectif est de quantifier les différences, en termes d'émissions de gaz à effet de serre, associés à l'utilisation de propane comme alternative à l'essence.

Un véhicule appartenant à chaque flotte étudiée exécute le cycle spécifique qui lui est associé, en utilisant alternativement de l'essence et du propane. Les émissions de gaz à effet de serre sont mesurées et permettent d'exprimer les taux d'émission moyens dépendamment du carburant utilisé.

Par ailleurs, une campagne de mesure est en cours pour connaître la distance parcourue par les flottes de véhicules concernées. Ainsi, les émissions de gaz à effet de serre pourront être calculées par le produit des distances (mesurées sur site) et des taux d'émission (mesurés en laboratoire) et exprimées en masse d'équivalent-CO₂ par unité de temps. Une comparaison directe est alors possible entre les émissions réelles, imputables au propane, et les émissions que la flotte dégagerait si elle utilisait de l'essence dans les conditions d'opération réelles.

4.3 Vers un bilan dynamique des émissions

La caractérisation des comportements routiers est une étape fondamentale dans la construction de cycles normalisés. Elle a pour objectif de définir un ensemble d'indicateurs quantitatifs, qui joue un rôle de cible paramétrique vers laquelle tend le cycle normalisé final. Par conséquent, tout biais dans la caractérisation induit nécessairement un décalage entre la réalité et le cycle normalisé qui doit en être représentatif.

Dans le cadre de l'étude présentée dans ces pages, six à huit semaines furent allouées à la collecte des données de terrain. Une telle durée est suffisante pour s'affranchir des variations quotidiennes et hebdomadaires – trajets des véhicules, conduite, conditions de trafic – et dresser un portrait représentatif des comportements à cette période. En revanche, elle laisse en suspens la question des variations à moyen ou long terme. En particulier, les conditions météorologiques hivernales peuvent avoir un impact significatif sur le comportement des conducteurs. Vitesses maximales plus faibles, accélérations et décélérations moins

agressives, marche au ralenti pour le chauffage de l'habitacle : ces quelques exemples illustrent les différences attendues par rapport à un usage des véhicules à la belle saison.

Par ailleurs, des variations de comportement d'une année sur l'autre ne sont pas à exclure. La modification de la topologie du réseau routier, l'évolution du niveau de congestion ou la modification des tâches remplies par les opérateurs des véhicules peuvent, sur le long terme, altérer significativement les caractéristiques de l'utilisation des flottes. Un suivi sur le long terme des émissions de gaz à effet de serre implique donc une mise à jour régulière des cycles normalisés. Pour ce faire, les véhicules utilisés sont instrumentés de manière permanente : une base de données est construite à partir de l'ensemble des déplacements enregistrés. Le matériel utilisé peut être similaire à celui utilisé dans cette étude, la mémoire du boîtier enregistreur étant régulièrement transférée vers un ordinateur. Cette opération peut être manuelle, ce qui requiert l'intervention d'un opérateur pour récupérer les enregistrements, mais une solution automatique est également envisageable. Par exemple, les postes de remplissage en carburant peuvent être équipés d'équipements sans fil de type *Wi-Fi* ou *BlueTooth™* pour un transfert automatique des enregistrements à chaque plein du véhicule. Accessoirement, ces véhicules instrumentés pourraient jouer un rôle de balises de l'état du réseau, ce qui ouvre la porte à des systèmes de diagnostic en temps réel – identification des axes et nœuds engorgés – mais également de planification et de conception des infrastructures.

Grâce à la base de données des déplacements ainsi constituée, le comportement des véhicules peut être caractérisé sur une base annuelle, ce qui met en évidence la dynamique d'évolution des comportements. Des caractérisations plus fines sont également pertinentes, telles qu'une comparaison entre les comportements estivaux et hivernaux. Des cycles spécifiques sont produits lorsqu'il est jugé nécessaire.

La mesure des taux d'émissions est normalement réalisée grâce à des essais en laboratoire; il est possible de s'affranchir de cette étape grâce à des outils de simulation. En particulier, le simulateur *ADVISOR* développée par le NREL (National Renewable Energy Laboratory,

2012) est une plate-forme pertinente pour une telle tâche, comme le montre le travail de Jazcilevich et al. (2007).

Une telle combinaison de suivi systématique des déplacements, de mise à jour des cycles normalisés et de simulation des taux d'émissions apporte une dimension dynamique aux bilans d'émissions, leur donnant par là même davantage de poids et de crédibilité.

4.4 **Recommandations : approche stochastique et théorie de Markov**

La méthode de construction de cycles normalisés présentée dans ces pages a permis l'élaboration de deux cycles spécifiques. Le cycle *ETSA* est représentatif des données de terrain dont il est issu et présente des caractéristiques très proches des comportements réels. En revanche, le cycle *ETSB* diffère significativement des comportements routiers selon deux indicateurs : la vitesse maximale et l'indice PKE.

Comme présenté à la section 3.3.3, la probabilité d'un microtrajet à être inclus dans un cycle candidat est inversement proportionnelle à la durée de ce microtrajet. Lorsqu'il existe une corrélation entre la durée des microtrajets et certaines de leurs propriétés, ce phénomène peut limiter la convergence du cycle normalisé vers les caractéristiques des comportements réels. La section 3.3.4.2 montre comment la corrélation positive entre la durée des microtrajets et les vitesses maximales atteintes a limité la représentativité du cycle normalisé *ETSB*. À l'origine de ce problème, la définition même des *microtrajets* telle que choisie pour l'étude : tout déplacement d'un véhicule entre deux arrêts successifs.

La méthode stochastique d'assemblage présentée à la section 1.3.3.2 (Lin et Niemeier, 2002; Shi et al., 2011) peut répondre aux problèmes soulevés ici. Les profils de vitesse enregistrés à bord des véhicules sont fragmentés en événements modaux – phases successives de ralenti, accélération, décélération, croisière. La fragmentation des profils de vitesse est plus fine et les segments produits sont significativement plus courts que les microtrajets utilisés dans

cette étude, ce qui permet d'éliminer tout biais lié à leur durée. La Figure 1.3 illustre la différence entre les deux fragmentations (voir CHAPITRE 1).

Les cycles candidats assemblés grâce à cette méthode stochastique sont synthétiques mais réalistes : bien que les trajets dépeints soient assemblés artificiellement, ils conservent les propriétés des comportements réels. Par ailleurs, l'utilisation de segments courts se traduit par une grande flexibilité du processus d'assemblage, ce qui permet une meilleure convergence entre les caractéristiques des comportements réels et celles du cycle normalisé qui les représentent.

CONCLUSION

La construction de cycles normalisés permet de réaliser des bilans d'émissions polluantes de véhicules routiers. Cet outil doit son apparition aux premières réglementations antipollution dont les taux limites d'émissions ont été exprimées sur la base de l'exécution de trajets répétables : les cycles normalisés standard. Comme l'illustrent de nombreuses publications, y compris le présent mémoire, des cycles normalisés spécifiques sont développés pour reproduire sur dynamomètre des conditions d'opération particulières à l'échelle d'une région, d'une ville ou d'une flotte de véhicules.

L'objectif de cette recherche est la production de deux cycles spécifiques, représentatifs de l'opération de véhicules utilitaires dans la région de Montréal. Une méthodologie complète a été élaborée pour atteindre ces objectifs. Une collecte de données de six à huit semaines, réalisée à l'aide d'un boîtier enregistreur embarqué, a permis le suivi des déplacements de véhicules choisis dans les flottes étudiées. L'analyse de ces données a mis en évidence des comportements significativement différents de ceux dépeints par les cycles standard. En particulier, un fort taux de ralenti, des vitesses maximales élevées et un comportement agressif sont les traits marquants qui ressortent de la caractérisation des comportements. Enfin, un processus d'assemblage basé sur une sélection aléatoire de microtrajets issus des enregistrements de terrain a conduit à la production des cycles spécifiques *ETSA* et *ETSB*. La représentativité du premier est excellente et les tendances observées dans la réalité sont reproduites avec fidélité dans le cycle. En revanche, le second cycle diffère significativement des comportements réels selon deux dimensions : la vitesse maximale et l'indice PKE.

Par l'analyse des microtrajets utilisés pour le cycle *ETSB*, une limite de la méthodologie a été mise en évidence. La fragmentation des enregistrements de terrain en microtrajets, parfois exagérément longs, a introduit un biais dans le processus d'assemblage du cycle. Il est probable que l'approche stochastique initialement proposée par Lin et Niemeier (2002) soit une solution aux problèmes rencontrés. En particulier, cette méthode permet une

fragmentation plus fine des profils de vitesse enregistrés, ce qui apporterait davantage de flexibilité lors de l'assemblage des cycles.

Les flottes de véhicules étudiées dans cette recherche fonctionnent au propane en lieu et place de l'essence conventionnelle. Les cycles *ETSA* et *ETSB* ont permis la comparaison des émissions de gaz à effet de serre à l'essence d'une part, au propane d'autre part. Les résultats ont apporté des informations fiables sur la pertinence d'utiliser le propane comme carburant alternatif dans les conditions d'opération particulières des deux flottes concernées.

Le travail mené dans le cadre de cette recherche ouvre également la porte à la réalisation de bilans dynamiques, par l'instrumentation permanente des véhicules. Ainsi, les cycles normalisés *ETSA* et *ETSB* pourraient être actualisés sur une base régulière et, couplés à des tests sur dynamomètre ou à des outils de simulation, autoriseraient un suivi des émissions de gaz à effet de serre sur le long terme. Les informations ainsi produites pourraient être prises en compte dans la gestion des flottes de véhicules.

ANNEXE I

Caractérisation des comportements par suivi de la vitesse instantanée

Le contexte de l'étude permet de poser deux hypothèses simplificatrices : les véhicules étudiés circulent à *masse constante* et sur des routes *sans gradient*. Il est démontré ici que ces deux hypothèses permettent d'affirmer que le suivi des vitesses instantanées est suffisant pour caractériser le comportement routier observé.

La démonstration de ce point s'appuie sur l'équation fondamentale du mouvement longitudinal d'un véhicule routier (Popp et Schiehlen, 1993). L'équation de base met en relation les paramètres du véhicule et le gradient de la route d'une part, la charge imposée au moteur d'autre part :

$$\left(m + m_V + m_H + \frac{I_V + I_H}{r^2}\right)\ddot{x} = \frac{M_V + M_H}{r} - W_L - W_R - G \sin \alpha$$

avec :

- \ddot{x} : accélération longitudinale du véhicule;
- m : masse du véhicule, hors trains avant et arrière;
- m_V, m_H : masse respective des trains avant et arrière;
- G : poids total du véhicule, soit $G = (m + m_V + m_H)g$;
- I_V, I_H : moment d'inertie respectif des trains avant et arrière;
- M_V, M_H : couple transmis respectivement aux roues avant et arrière;
- r : rayon des roues;
- W_L : force de résistance à l'avancement dans l'air;
- W_R : force de résistance au roulement;
- α : gradient de la route.

Toujours d'après Popp et Schiehlen (1993), W_L et W_R peuvent être exprimés de la sorte :

$$W_L = \frac{1}{2} \rho c_W A (\dot{x})$$

$$W_R = \overline{\varphi_r} G \cos \alpha$$

avec :

- \dot{x} : vitesse longitudinale;
- ρ : densité de l'air ambiant;
- c_W : coefficient de résistance à l'air;
- A : surface frontale du véhicule;
- $\overline{\varphi_r}$: coefficient de résistance au roulement.

L'équation fondamentale du mouvement longitudinal d'un véhicule routier peut alors être reformulée ainsi (avec M_D : couple total aux roues, moteur ou de freinage) :

$$M_L + M_H = M_D$$

$$= \left[\left(G + \frac{I_V + I_H}{r^2} \right) \ddot{x} + \frac{1}{2} \rho c_W A (\dot{x}) + G (\overline{\varphi_r} \cos \alpha + \sin \alpha) \right] r$$

Les hypothèses de travail énoncées plus haut reviennent à considérer G , I_V , I_H constants et α nul. D'où, avec C_1 , C_2 , C_3 trois constantes :

$$M_D = C_1 \ddot{x} + C_2 \dot{x} + C_3$$

Il est donc établi que, d'après les hypothèses posées, le couple aux roues est fonction de la vitesse et de l'accélération du véhicule. De plus, Popp et Schiehlen (1993) montrent qu'il est possible d'établir une relation entre *couple aux roues* et *couple en sortie de moteur*, valable lorsque le couple de freinage est nul :

$$M_D = \eta i_D i_G M_M(\dot{x}) - [(i_D i_G)^2 I_M + (i_D)^2 I_G] \frac{\ddot{x}}{r}$$

avec :

- M_M : couple en sortie de moteur;
- η : efficacité mécanique de la transmission;
- i_D, i_G : rapports de démultiplication du différentiel et de la boîte de vitesse;
- I_G, I_M : moments d'inertie de la boîte de vitesse et du moteur.

Enfin, étant donné que les véhicules étudiés sont équipés d'une boîte automatique, un même rapport de boîte de vitesse sera sélectionné pour des conditions équivalentes de vitesse et d'accélération. Les paramètres i_D, i_G, I_G, I_M sont donc une fonction de la vitesse et de l'accélération, ce qui permet d'exprimer la charge moteur de la sorte :

$$M_M = f_1(M_D) = f_1(C_1 \ddot{x} + C_2 \dot{x} + C_3) = f_2(\dot{x}, \ddot{x})$$

Il apparaît alors que la charge moteur peut elle-même être exprimée comme une fonction de la vitesse instantanée. Compte tenu des hypothèses posées sur la masse du véhicule et le gradient de la route, une caractérisation des déplacements est possible par simple enregistrement des vitesses instantanées.

ANNEXE II

Questionnaire préalable à l'étude

Guillaume Nachin
École de Technologie Supérieure

Projet *Véhicules au propane : cycles normalisés*
03/06/2010

Questionnaire

Document soumis aux clients de *Budget Propane 98 inc.*

Objectifs du questionnaire

Dans le cadre d'un projet-pilote, l'École de Technologie Supérieure de Montréal a été mandatée par Budget Propane 98 inc. pour évaluer l'impact, en termes d'émissions de CO₂, de l'utilisation de propane comme carburant de substitution par des flottes de véhicules pick-up participant à l'étude.

L'objectif du présent questionnaire est de collecter des informations auprès des clients de Budget Propane 98 inc. afin de choisir la méthodologie la plus appropriée.

Merci d'adresser vos réponses par courriel à Guillaume Nachin : guillaume.nachin.1@ens.etsmtl.ca

Contact de la personne répondant au questionnaire

- Nom,
- fonction,
- coordonnées

Questions

1. Est-ce qu'un véhicule est utilisé par plusieurs conducteurs ?

Si oui, combien de conducteurs peuvent utiliser le même véhicule ?

- a. 2
- b. 3 à 5
- c. plus de 5

Si oui, à quelle fréquence se produisent les changements de conducteur ?

- d. tous les jours
- e. toutes les semaines
- f. tous les mois
- g. plus rarement

2. Peut-on identifier les changements de conducteur entre les différents trajets (sans identification du chauffeur) ?

3. Les véhicules sont-ils utilisés pour transporter des charges lourdes ?

Si oui, à quelle fréquence ?

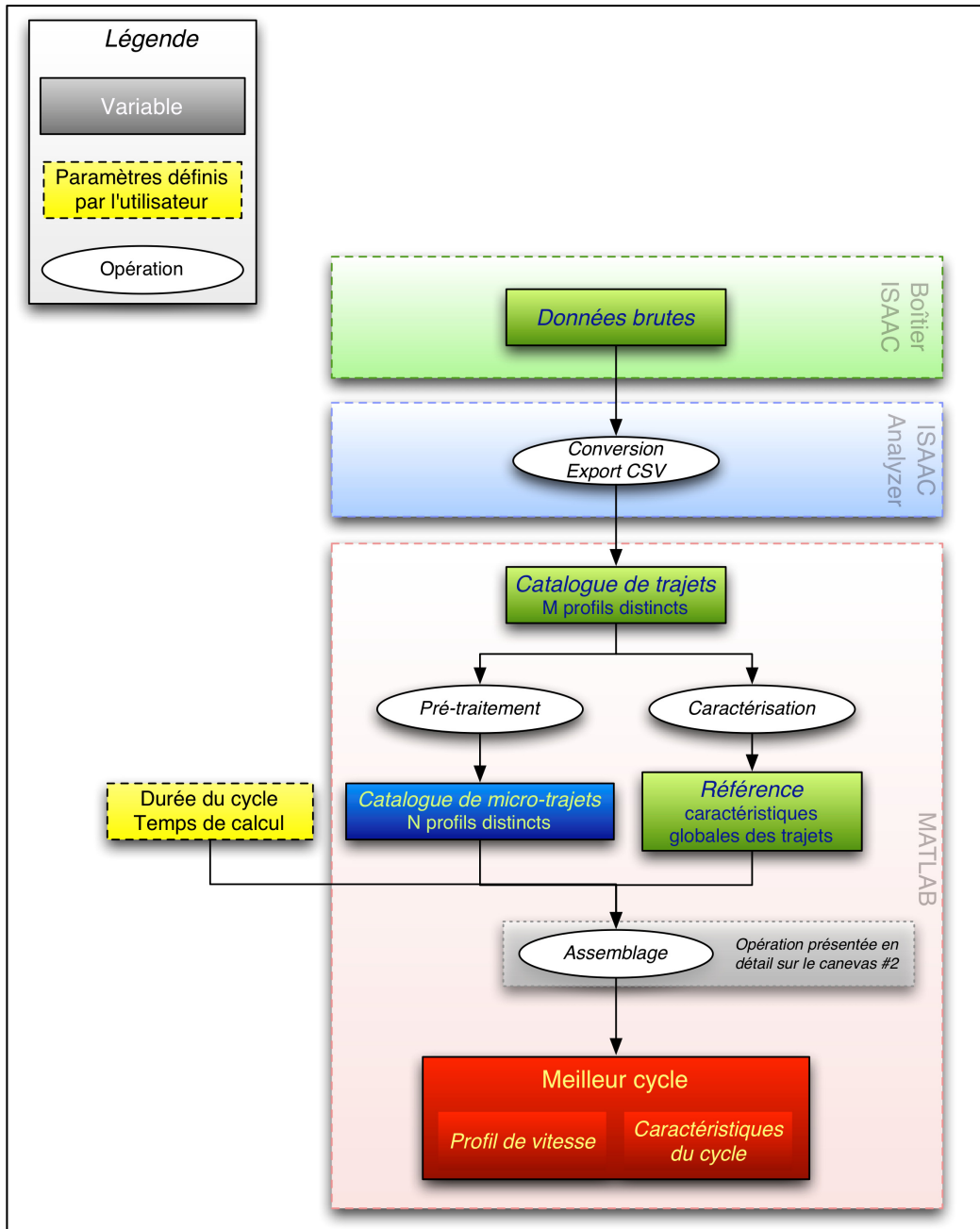
- a. Exceptionnellement
- b. 1 fois par semaine
- c. plusieurs fois par semaine

4. Les véhicules sont-ils utilisés :

- a. dans des zones vallonnées ?
- b. ou sur des routes planes ?

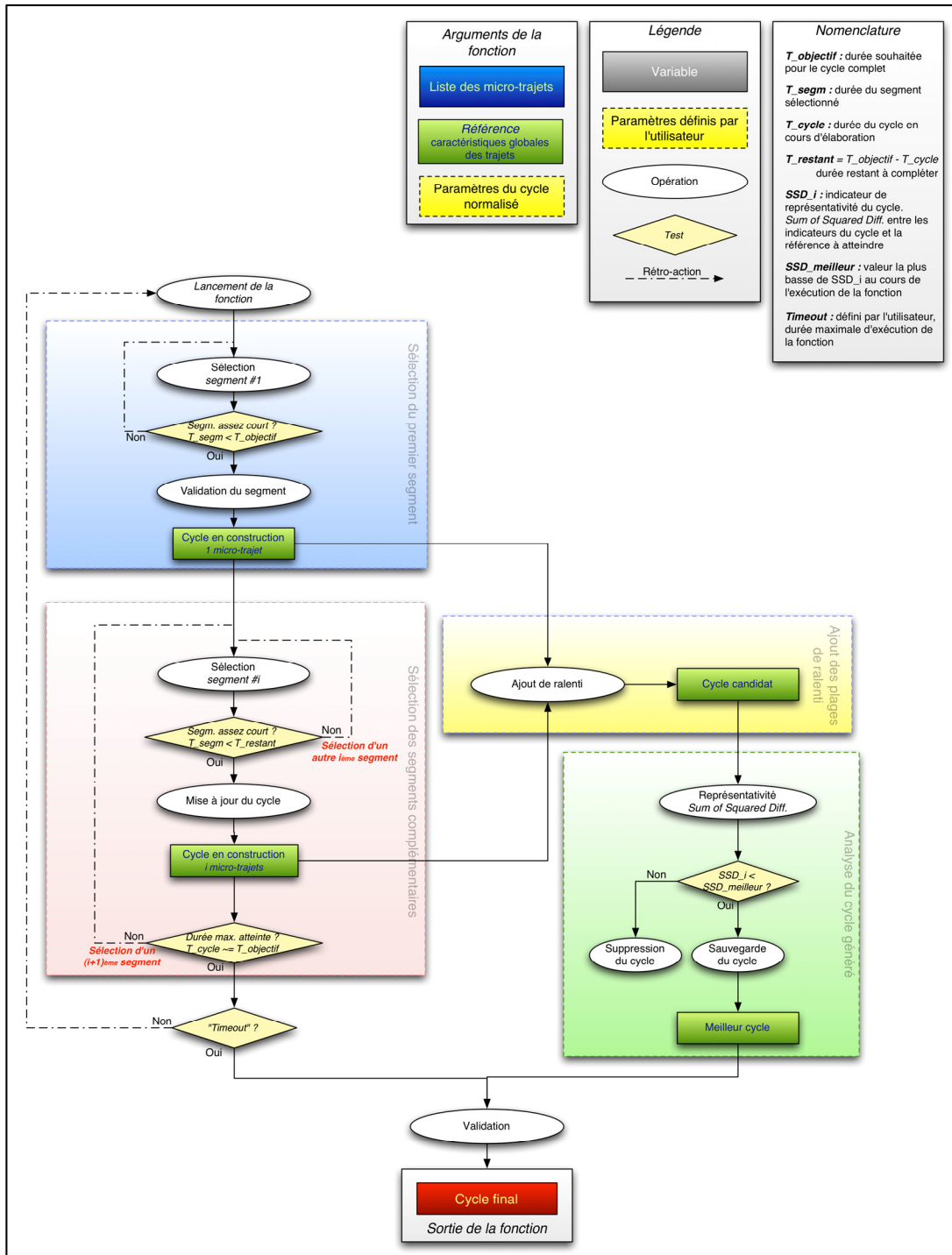
ANNEXE III

Algorithme général du traitement des données



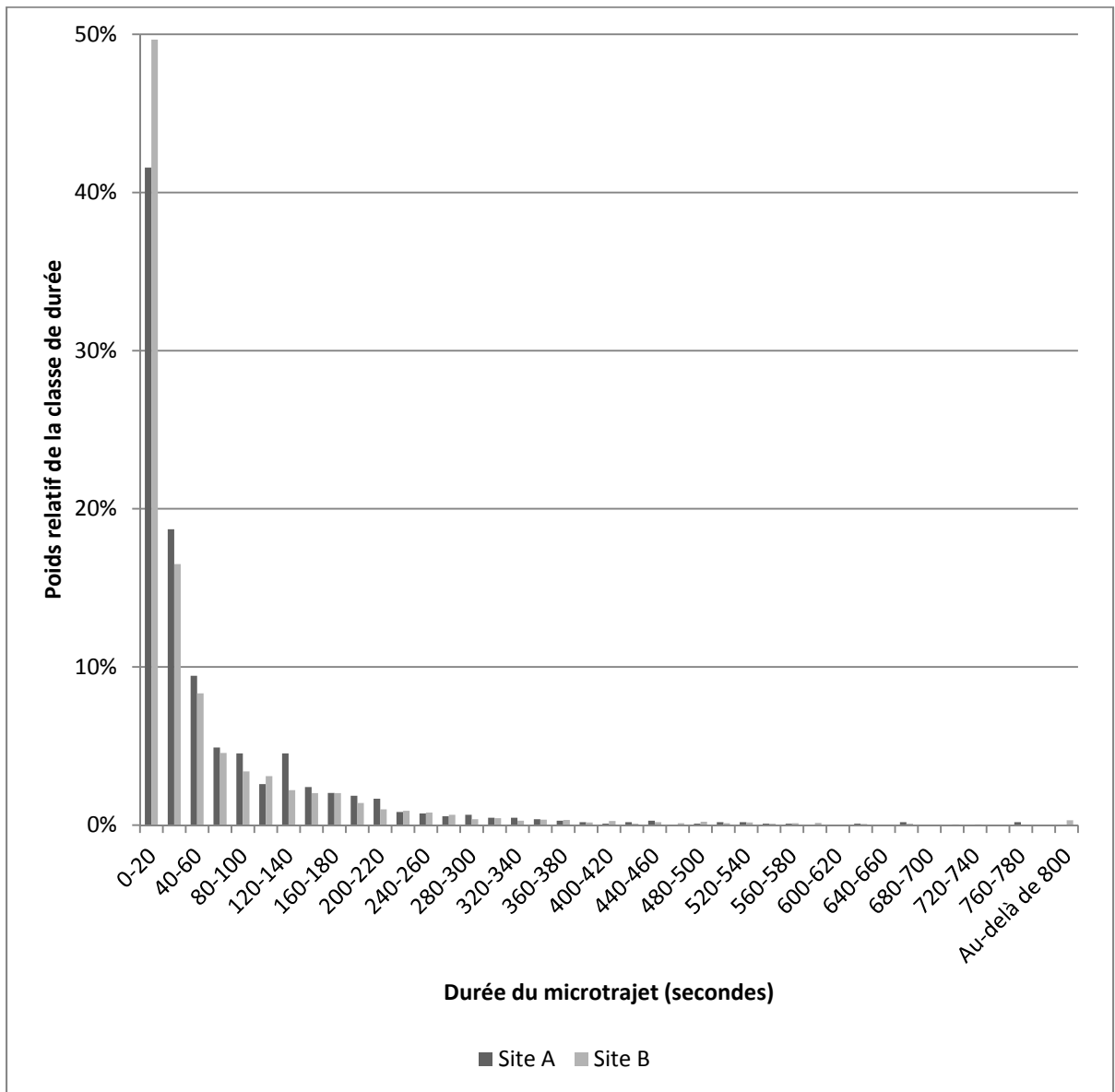
ANNEXE IV

Algorithme de la fonction d'assemblage du cycle normalisé



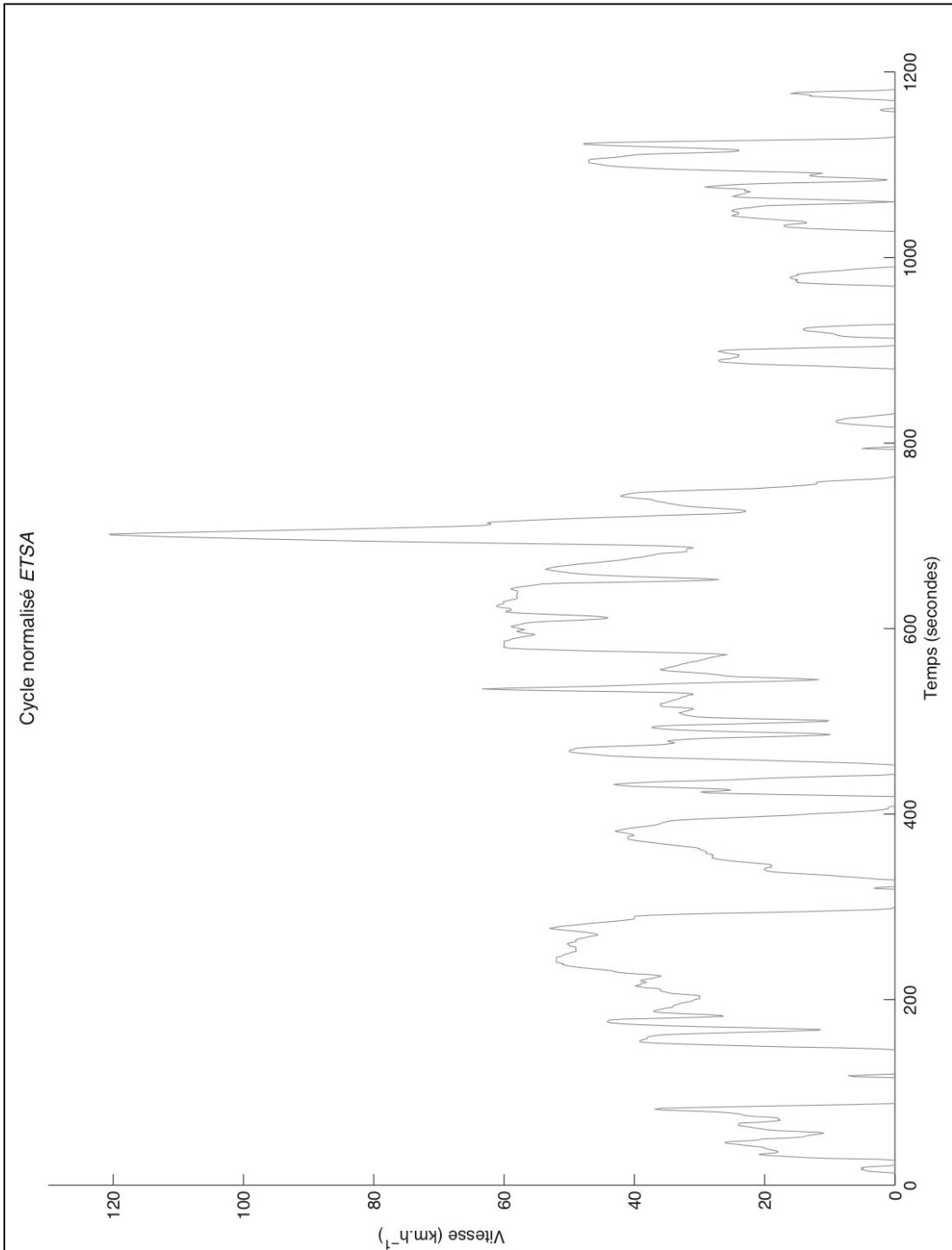
ANNEXE V

Distribution de la durée des microtrajets



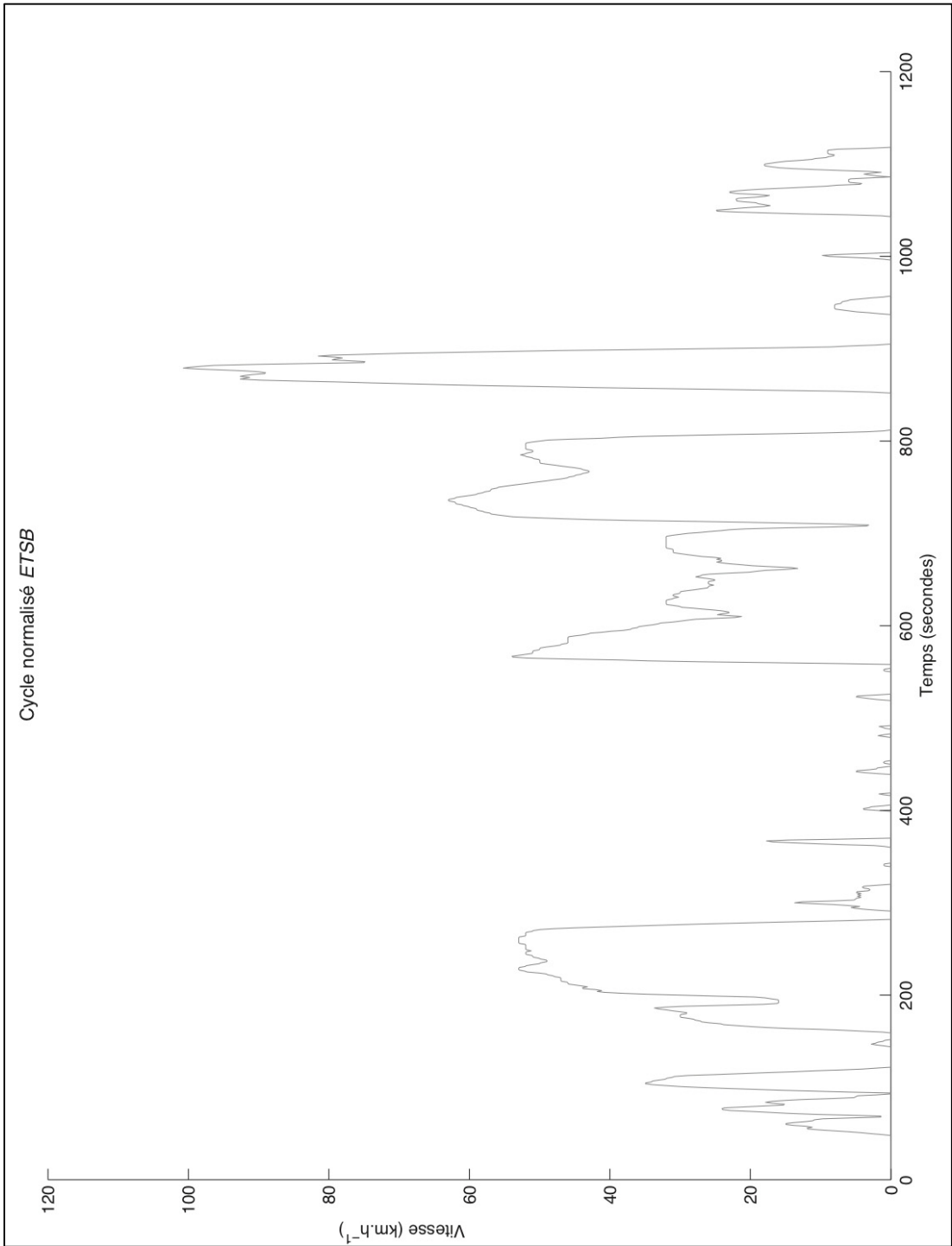
ANNEXE VI

Cycle normalisé *ETSA*



ANNEXE VII

Cycle normalisé *ETSB*



ANNEXE VIII

Code *MATLAB* élaboré dans le cadre du projet de recherche

```
%Paramètres et constantes
fprintf('Constantes et paramètres définies par l''utilisateur\n') ;

%Condition pour conserver le segment (en secondes)
constantes.time_trajet = 10 ;
constantes.time_microTrajet = 0 ;

%Paramètres pour le traitement des données
% Classes idle, croise, accel, decel
% Vitesses
param.vMin = 5 ; %km/h En-deça de cette vitesse, considéré comme IDLE
param.vMax = 140 ; %km/h Au-delà de cette vitesse, ramené à cette vitesse
% Accélération
param.accMin = 1 ; %km/h.s Au-delà de cette valeur, considéré comme ACC
param.accMax = 20 ; %km/h.s Au-delà de cette valeur, ramené à cette valeur
fprintf('\tCaractérisation des trajets :\n') ;
fprintf('\t\t%u - %u km/h\n\t\t%u - %u
km/h.s\n', param.vMin, param.vMax, param.accMin, param.accMax) ;
% Incréments
param.incV = 5 ; %km/h Largeur d'une classe de vitesse (SAFD)
param.incAcc = 1 ; %km/h.s Largeur d'une classe d'accélération (SAFD)
fprintf('\tIntervalle pour la construction des matrices SAFD\n') ;
fprintf('\t\t%u km/h, %u km/h.s\n', param.incV, param.incAcc) ;

%Carburants
param.consigne = 90 ; %Température de consigne pour le basculement essence/propane
fprintf('\tTempérature de consigne pour le basculement essence/propane :
%u°C\n', param.consigne) ;

%Assemblage du cycle
param.target_sec = 20 * 60 ; %Durée visée, en secondes
param.tempsCalcul = 60 * 60 * 24 * .5 ; %Durée pendant laquelle la fonction "assemblage"
tourne
fprintf('\tConstruction du cycle normalisé\n\tExécution de la fonction : %u secondes (%u
heures)\n', param.tempsCalcul, round(param.tempsCalcul/3600)) ;

%Paramètres de références pour "idle de synthèse"
param.fuelRate = 2.40 ; %L/h débit nominal au ralenti
param.engTemp = 90 ; %°C température de référence

%Définition des chemins de travail
% Création des dossiers
[ path ] = creationDossiers( ) ;

%Importation, fractionnement et caractérisation des données

fprintf('\nDébut du prétraitement\n') ;
%Liste des fichiers CSV + comptage
[ csv_list ] = liste_CSV(path.csv) ;
%Création des catalogues de trajets et micro-trajets (STRUCT)
% Prend déjà en compte le calcul des indicateurs individuels
fprintf('\tCréation des catalogues de trajets et micro-trajets\n') ;
[ freq catalogue_trajets catalogue_microTrajets catalogue_ralenti ] = csv2matrix(csv_list,
path.csv, constantes, param) ;
compteurs.csv = length(csv_list) ;
compteurs.trajets = length(catalogue_trajets) ;
compteurs.microTrajets = length(catalogue_microTrajets) ;
fprintf('\t\t%u fichiers CSV\n\t\t%u trajets\n\t\t%u micro-
trajets\n', compteurs.csv, compteurs.trajets, compteurs.microTrajets) ;
```

```

%Calcul des références
reference = ref_trajets(catalogue_trajets, param, freq) ;
fprintf('\tCaractéristiques de l'ensemble des trajets\n') ;
fprintf('\t\t\t3.1f km en %2.1f heures\n',reference.distanceKM,reference.tempsH) ;
fprintf('\t\t\t3.1f km/h (moyenne) & %3.1f km/h (maximale)\n',reference.vMoy,reference.vMax) ;
fprintf('\t\t\t3.1f L/100km (%1.0f:%1.0f essence:propane
vol.)\n',reference.carburantL100km,reference.ratioCarburants.volume_essence_percent,reference
.ratioCarburants.volume_propane_percent) ;
fprintf('\t\t\t3.1f%% (idle), %3.1f%% (crawl), %3.1f%% (cruise), %3.1f%% (acc.), %3.1f%%
(dec.)\n',100 * reference.idle,100 * reference.crawl,100 * reference.cruise,100 *
reference.acceleration,100 * reference.deceleration) ;
fprintf('\t\tPKE : %2.2f\n',reference.PKE) ;
%param.target_sec = round(mean([catalogue_trajets.temps])) ;
fprintf('\tDurée moyenne des trajets\n\t\t\t%u
secondes\n\t\t\t%u"%n',param.target_sec,floor(param.target_sec / 60),param.target_sec -
floor(param.target_sec / 60) * 60) ;

%Calcul des distributions vitesses/accélérations
[reference.SAFD.norm reference.SAFD.pc reference.SAFD.abs reference.SAFD.param] =
SAFD_fc(vertcat(catalogue_trajets.profilVitesse_resampled),vertcat(catalogue_trajets.profilAc
celeration_resampled),param) ;

%Assemblage d'un cycle normalisé
fprintf('\nAssemblage d'un cycle de %u secondes (%u secondes
d'exécution)\n',param.target_sec,param.tempsCalcul) ;

meilleur.SSD = 100 ; %Initialisation de la variable SSD
t1 = clock ; %Chronomètre

%Création du dossier de sauvegarde
if exist(fullfile(pwd,'autosave',mat2str(param.target_sec),'dir') == 0
    mkdir(fullfile(pwd,'autosave'),mat2str(param.target_sec)) ;
end

compteurCandidats = 0;

while (etime(clock,t1) < param.tempsCalcul)
    [ candidat, compteurVar ] = assemblage(catalogue_microTrajets,reference,param,freq) ;
    compteurCandidats = compteurCandidats+compteurVar;
    if (candidat.SSD < meilleur.SSD)

        %Sauvegarde du meilleur cycle
        meilleur = candidat ;
        [meilleur.cycle] = agenceZero(meilleur.catalogue,reference,freq,param) ;
        meilleur.date = datestr(clock) ;

        %Mise à jour du "catalogue de meilleurs cycles"
        if exist('catalogue_cycles','var')
            catalogue_cycles(end+1) = meilleur ; %#ok<SAGROW>
        else
            catalogue_cycles = meilleur ;
        end

        %Affichage du résultat
        fprintf('\tMeilleur SSD : %2.2f (%s)\n',meilleur.SSD,datestr(clock)) ;

save(fullfile(path.autosave,mat2str(param.target_sec),['meilleur_',datestr(clock,30),'_'],mat2
str(meilleur.SSD,3),'.mat'],'meilleur') ;
end
end

clear SSD catalogue t1 indicateurs ;

%Sauvegarde des cycles fabriqués
save(fullfile(path.autosave,mat2str(param.target_sec),['autosave_final_',datestr(clock,30),'_
',mat2str(meilleur.SSD,3),'.mat'])) ;

```



```

function [ accMoy, decMoy ] = accDecMoy( vecteurV, freq)
%ACCDECMOY Calcule l'accélération et la décélération moyennes
vecteurAcc = (vecteurV - [0 ; vecteurV(1:end-1)]) * freq ;
temps = length(vecteurAcc) / freq ;
tempsAcc = sum(vecteurAcc > 0) / freq ;
tempsDec = sum(vecteurAcc < 0) / freq ;
accMoy = mean((vecteurAcc > 0) .* vecteurAcc) * temps/tempsAcc ;
decMoy = mean((vecteurAcc < 0) .* vecteurAcc) * temps/tempsDec ;
if (isnan(accMoy) == 1)
    accMoy = 0 ;
end
if (isnan(decMoy) == 1)
    decMoy = 0 ;
end
end

function [ ] = aff_fuelTemp( catalogue, id, freq )
%AFF_FUELTEMP Affichage des profils de consommation et temp. moteur
% Items
N = length(catalogue(id).profilFuel) ;
% Vecteur temps
X1 = (0:1:N-1) / freq ;
Y1 = catalogue(id).profilFuel ;
Y2 = catalogue(id).profilTemp ;
plotyy ( X1, Y1, X1, Y2) ;
end

function [ ] = affichageExtrait( data, freq, titre )
%AFFICHAGEEXTRAIT Affiche un extrait de profil de vitesse et sa moyenne
t = (0:1:length(data)-1) / freq ;
moy = ones(size(data)) .* mean(data) ;
plot1 = plot(t,data,'-',t,moy,':');figure(gcf)
xlabel({'Temps (secondes)'});
ylabel({'Flux de carburant, en équivalent-essence (L/h)'});
title({'titre',...
    'FontWeight','demi',...
    'FontSize',11});
leg1 = ['Valeur moyenne : ',mat2str(mean(data),3),' L/h'] ;
set(plot1(1),'DisplayName','Extrait du profil de vitesse');
set(plot1(2),'DisplayName',leg1);
legend('show');
xlim([0 max(t)])
ylim = ylim ;
ylim([0 ylim(2)])
end

function [ ] = affichageProfil( meilleur )
%AFFICHAGEPROFIL Affiche le meilleur profil de vitesse

%Nom et date du profil
prompt = {'Nom du profil de vitesse ?';'Date d'assemblage ?'} ;
dlg_title = 'Nom & date' ;
num_lines = 1 ;
def = {'ETSx Driving Cycle' ; ['Final version ',meilleur.date]} ;
id_profil = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def) ;
%Affichage des stats
x.repr = strcat('Représentativité : ',mat2str(meilleur.SSD,3)) ;
x.idle = ['Idle : ' mat2str(meilleur.cycle.idle*100,3), '%'] ;
x.cruise = ['Cruise : ' mat2str(meilleur.cycle.cruise*100,3), '%'] ;
x.acc = ['Accélération : ' mat2str(meilleur.cycle.acceleration*100,3), '%'] ;
x.dec = ['Décélération : ' mat2str(meilleur.cycle.deceleration*100,3), '%'] ;
x.creep = ['Creeping" : ' mat2str(meilleur.cycle.crawl*100,1), '%'] ;
figure('Position',[200,200,1200,800]) ;
plot(meilleur.cycle.profilVitesse_resampled);figure(gcf)
xlabel('Time (seconds)') ;

```

```

ylabel('Speed (km.h-1)') ;
title(id_profil,...
      'FontWeight','demi',...
      'FontSize',11) ;
end

function [ profil ] = agenceZero( catalogue, reference, freq, param )
%AGENCEZERO Répartit les périodes de idle entre les micro-trajets
% En entrée, catalogue de micro-trajets avec idle final et référence
% En sortie, un cycle fusionné

Pi = zeros(round(reference.idle_initial * freq),1) ; %Idle initial
Pf = zeros(round(reference.idle_final * freq),1) ; %Idle final
X = length(catalogue(end).profilVitesse) ; %Idle en fin de trajet
X = X - length([Pi ; Pf]) ; %Idle à répartir entre les micro-trajets
N = length(catalogue) - 1 ; %Nombre de micro-trajets à transformer
n = N-1 ; %Nombre d'intervalles à combler (hors idle initial)
distrX = rand(N-1,1) ;
distrX = [length(Pi) ; round(distrX * X / sum(distrX))] ;
distrX(end) = distrX(end) - (sum(distrX) - X) ;
for i = 1:N
    catalogue(i) = allonge_microTrajet(catalogue(i),distrX(i),freq,param) ;
end
catalogue = zerosCycle(catalogue(1:end-1),param,freq) ;
profil = fusionCycle(catalogue,param,freq) ;
end

function [ microTrajet ] = allonge_microTrajet( microTrajet, zero, freq, param )
%ALLONGE_MICROTRAJET Ajoute "zero" incréments à 0km/h
% Appliqué à un micro-trajet tiré d'un catalogue

%"Zéro" de référence
Z = zeros(zero,1) ;
%Profils de vitesse
microTrajet.profilVitesse = [Z ; microTrajet.profilVitesse] ;
microTrajet.profilVitesse_resampled = downsample(microTrajet.profilVitesse,freq) ;
%Profils d'accélération
microTrajet.profilAcceleration = [Z ; microTrajet.profilAcceleration] ;
microTrajet.profilAcceleration_resampled = resample(microTrajet.profilAcceleration,1,freq) ;
%Temps
microTrajet.temps = length(microTrajet.profilVitesse) / freq ;
microTrajet.tempsH = microTrajet.temps / 3600 ;
%Carburant
microTrajet.carburantL = microTrajet.carburantL + zero/(3600*freq) * param.fuelRate ;
microTrajet.carburantL100km = 100 * microTrajet.carburantL / microTrajet.distanceKM ;
end

function [ meil, nCandidats ] = assemblage( catalogue, reference, param, freq )
%ASSEMBLAGE Assemblage d'un cycle d'une durée définie param.target_sec

t = 0 ;
nCandidats = 0 ;
target2 = param.target_sec - 2 ; % - round(reference.idle_final) ;
meil.SSD = 1000 ;
%Choix des segments
% Sélection "chronométrique"
while (t < target2 && isempty(catalogue) == 0)
    id = ceil(rand() * (length(catalogue)-1) + 1) ;
    if (catalogue(id).temps <= (param.target_sec - t))
        if (exist('candidat','var') == 0)
            candidat = catalogue(id) ;
        else
            candidat(end+1,1) = catalogue(id) ;
        end
        candidat(end).profilTemp = 90 * ones(length(candidat(end).profilVitesse),1) ;
        catalogue(id) = [] ;
    end
end

```

```

        t = sum([candidat.temps]) ;
    end
    if exist('candidat','var')
        % Cycle complété par des zéros
        %test = zerosCycle(candidat,param,freq) ;
        %zero = test(end) ;
        catalogue_test = zerosCycle(candidat,param,freq) ;
        % Cycle fusionné en un seul trajet
        test = fusionCycle(catalogue_test,param,freq) ;
        % Représentativité du cycle testée
        [SSD indicateurs] = representativiteCycle(test,reference) ;
        if (SSD < meil.SSD)
            meil.SSD = SSD ;
            meil.catalogue = catalogue_test ;
            meil.indicateurs = indicateurs ;
        end
        nCandidats = nCandidats + 1 ;
    end
end
end

function [ idleParam ] = carac_ceRalenti( profilFuel, profilFuel_minus2sec )
%CARAC_CERALENTI Indicateurs relatifs à un segment de ralenti particulier
% Moyenne et écart-type de la distribution des durées de ralenti

%Moyenne & écart-type
% Tous les ralentis
idleParam.moyenne = mean(vertcat(profilFuel)) ;
idleParam.std = std(vertcat(profilFuel)) ;
% Tous les ralentis, amputés de leurs deux dernières secondes
idleParam.minus2sec_moyenne = mean(vertcat(profilFuel_minus2sec)) ;
idleParam.minus2sec_std = std(vertcat(profilFuel_minus2sec)) ;
end

function [ idle crawl cruise accel decel ] = carac_profilVitesse( profilVitesse, profilAcc,
param )
%CARAC_PROFILVITESSE Idle / Cruise / Acceleration / Deceleration

N = length(profilVitesse) ;
idle = sum(profilVitesse == 0) / N ;
crawl = sum((profilVitesse ~= 0) .* (profilVitesse <= param.vMin) .* (abs(profilAcc) <=
param.accMin)) / N ;
cruise = sum((profilVitesse > param.vMin) .* (abs(profilAcc) <= param.accMin)) / N ;
accel = sum((profilVitesse > 0) .* (profilAcc > param.accMin)) / N ;
decel = sum((profilVitesse > 0) .* (profilAcc < -param.accMin)) / N ;
end

function [ idleParam idleParam_moyennes ] = carac_ralenti( catalogue )
%CARAC_RALENTIS Moyenne et écart-type de la distribution des durées de ralenti

tous = catalogue.tous ;
sansExt = catalogue.sansExtremes ;
starter = catalogue.starter ;
off = catalogue.off ;
%Moyenne & écart-type
% Tous les ralentis
idleParam.tous_moyenne = mean(vertcat(tous.profilFuel)) ;
idleParam.tous_std = std(vertcat(tous.profilFuel)) ;
% Tous les ralentis, amputés de leurs deux dernières secondes
idleParam.tous_minus2sec_moyenne = mean(vertcat(tous.profilFuel_minus2sec)) ;
idleParam.tous_minus2sec_std = std(vertcat(tous.profilFuel_minus2sec)) ;
% Tous les ralentis, sauf premier et dernier du trajet
idleParam.sansExt_moyenne = mean(vertcat(sansExt.profilFuel)) ;
idleParam.sansExt_std = std(vertcat(sansExt.profilFuel)) ;
% Tous les ralentis, amputés des 2 dernières secondes, sauf premier/dernier
idleParam.sansExt_minus2sec_moyenne = mean(vertcat(sansExt.profilFuel_minus2sec)) ;

```

```

idleParam.sansExt_minus2sec_std = std(vertcat(sansExt.profilFuel_minus2sec)) ;
% Premier ralenti de tous les trajets
idleParam.starter_moyenne = mean(vertcat(starter.profilFuel)) ;
idleParam.starter_std = std(vertcat(starter.profilFuel)) ;
% Dernier ralenti de tous les trajets
idleParam.off_moyenne = mean(vertcat(off.profilFuel)) ;
idleParam.off_std = std(vertcat(off.profilFuel)) ;
%Travail sur les moyennes pondérées
% Vecteur des durées
param = tous.parametres ;
idleParam_moyennes.tous_moyenne = sum([param.moyenne] .* [tous.duree]) / sum([tous.duree]) ;
idleParam_moyennes.tous_std = std([param.moyenne]) ;
idleParam_moyennes.tous_minus2sec_moyenne = sum([param.minus2sec_moyenne] .* [tous.duree]) /
sum([tous.duree]) ;
idleParam_moyennes.tous_minus2sec_std = std([param.minus2sec_moyenne]) ;
param = sansExt.parametres ;
idleParam_moyennes.sansExt_moyenne = sum([param.moyenne] .* [sansExt.duree]) /
sum([sansExt.duree]) ;
idleParam_moyennes.sansExt_std = std([param.moyenne]) ;
idleParam_moyennes.sansExt_minus2sec_moyenne = sum([param.minus2sec_moyenne] .*
[sansExt.duree]) / sum([sansExt.duree]) ;
idleParam_moyennes.sansExt_minus2sec_std = std([param.minus2sec_moyenne]) ;
end

```

```

function A = catstruct(varargin)
% CATSTRUCT - concatenate structures
%
% X = CATSTRUCT(S1,S2,S3,...) concates the structures S1, S2, ... into one
% structure X.
%
% Example:
%   A.name = 'Me' ;
%   B.income = 99999 ;
%   X = catstruct(A,B)
%   % -> X.name = 'Me' ;
%   %   X.income = 99999 ;
%
% CATSTRUCT(S1,S2,'sorted') will sort the fieldnames alphabetically.
%
% If a fieldname occurs more than once in the argument list, only the last
% occurence is used, and the fields are alphabetically sorted.
%
% To sort the fieldnames of a structure A use:
%   A = CATSTRUCT(A,'sorted') ;
%
% To concatenate two similar array of structs use simple concatenation:
%   A = dir('*.mat') ; B = dir('*.m') ; C = [A ; B] ;
%
% When there is nothing to concatenate, the result will be an empty
% struct (0x0 struct array with no fields).
%
% See also CAT, STRUCT, FIELDNAMES, STRUCT2CELL

```

```

% for Matlab R13 and up
% version 2.2 (oct 2008)
% (c) Jos van der Geest
% email: jos@jasen.nl

```

```

% History
% Created: 2005
% Revisions
% 2.0 (sep 2007) removed bug when dealing with fields containing cell
%                arrays (Thanks to Rene Willeminck)
% 2.1 (sep 2008) added warning and error identifiers
% 2.2 (oct 2008) fixed error when dealing with empty structs (Thanks to
%                Lars Barring)

```

```

N = nargin ;

```

```

error(nargchk(1,Inf,N)) ;

if ~isstruct(varargin{end}),
    if isequal(varargin{end},'sorted'),
        sorted = 1 ;
        N = N-1 ;
        if N < 1,
            A = struct([]) ;
            return
        end
    else
        error('catstruct:InvalidArgument','Last argument should be a structure, or the string
"sorted".') ;
    end
else
    sorted = 0 ;
end

FN = cell(N,1) ;
VAL = cell(N,1) ;

for ii=1:N,
    X = varargin{ii} ;
    if ~isstruct(X),
        error('catstruct:InvalidArgument',['Argument #' num2str(ii) ' is not a structure.'])
    ;
    end
    if ~isempty(X),
        % empty structs are ignored
        FN{ii} = fieldnames(X) ;
        VAL{ii} = struct2cell(X) ;
    end
end

FN = cat(1,FN{:}) ;
VAL = cat(1,VAL{:}) ;
[UFN,ind] = unique(FN) ;

if numel(UFN) ~= numel(FN),
    warning('catstruct:DuplicatesFound','Duplicate fieldnames found. Last value is used and
fields are sorted') ;
    sorted = 1 ;
end

if sorted,
    VAL = VAL(ind) ;
    FN = FN(ind) ;
end

if ~isempty(FN),
    % This deals correctly with cell arrays
    A = cell2struct(VAL, FN) ;
else
    A = struct([]) ;
end
end

function [ SAFD_ref, SAFD_test ] = correcSAFD( SAFD_ref, SAFD_cyc )
%CORRECSAFD Ajustement des dimensions de la matrice SAFD d'un cycle
% Adapte la matrice aux vitesses et accélérations observées sur site

SAFD_ref = SAFD_ref.norm ;
SAFD_test = SAFD_cyc.norm ;

Vref = size(SAFD_ref,1) ;
[V A] = size(SAFD_test) ;

```

```

z_vitesse = SAFD_ref.param.SAFD_vmax - SAFD_cyc.param.SAFD_vmax ;
SAFD_test = [SAFD_test ; zeros(z_vitesse,A)] ;
V = V + z_vitesse ;

z_accmax = SAFD_ref.param.SAFD_accmax - SAFD_cyc.param.SAFD_accmax ;
if (z_accmax > 0)
    SAFD_test = [SAFD_test zeros(V,z_accmax)] ;
else
    if (z_accmax < 0)
        SAFD_ref = [SAFD_ref zeros(Vref,abs(z_accmax))] ;
    end
end

z_decmax = SAFD_ref.param.SAFD_decmax - SAFD_cyc.param.SAFD_decmax ;
if (z_decmax > 0)
    SAFD_test = [zeros(V,z_decmax) SAFD_test] ;
else
    if (z_decmax < 0)
        SAFD_ref = [SAFD_ref zeros(Vref,abs(z_decmax))] ;
    end
end

end

function [ path ] = creationDossiers( )
%CREATIONDOSSIERS Création des dossiers de travail

path.std = pwd ; %Dossier de travail
path.csv = uigetdir(fullfile(pwd,'CSV'),'Fichiers CSV à traiter') ; %Dossier des CSV
path.autosave = uigetdir(fullfile(pwd,'autosave'),'Dossier de sauvegarde des cycles
produits') ; %Dossier autosave
end

function [ freq, catalogue_trajets, catalogue_microTrajets, ralentis ] = csv2matrix(
csv_list, csv_path, constantes, param )
%CSV2MATRIX Passe tous les CSV de la liste dans une matrice

time_trajet = constantes.time_trajet ;
time_microTrajet = constantes.time_microTrajet ;
csv_N = length(csv_list) ;
catalogue_trajets = [] ;
catalogue_microTrajets = [] ;
ralentis.tous = [] ;
ralentis.sansExtremes = [] ;
ralentis.starter = [] ;
ralentis.off = [] ;

for i = 1:csv_N
    %Importation de chaque CSV
    [ header, M, time ] = importCSV( csv_list(i).name, csv_path ) ;
    %Comptage des "secondes identiques"
    % On laisse passer la première seconde qui peut être incomplète
    if length(time) > time_trajet
        i = 1 ;
        while (strcmp(time(i,:),time(1,:)))
            i = i+1 ;
        end

        %On compte le nombre de lignes pour une seconde
        j = i ;
        while((strcmp(time(j,:),time(i,:)))
            j = j+1 ;
        end

        %Fréquence = nombre de mesures en une seconde
        freq = j-i ;
    else

```

```

        M = 0 ;
    end

    %Les étapes suivantes ne sont réalisées que pour les trajets acceptés
    % Travail sur le contenu de chaque trajet
    if ( length(M) > 1)
        %Rééchantillonnage
        M_orig = M ;
        M = resample(M,1,freq) ;
        %Correction de la vitesse rééchantillonnée
        colV = rechercheEnTete(header, 'WheelBasedVehicleSpeed') ;
        M(:,colV) = M(:,colV) .* downsample(M_orig(:,colV)>0,freq) ;
        clear M_orig ;
        freq = 1 ;
        %Calcul des accélérations à partir de la vitesse (en km/h.s)
        M_acc = (M(:,colV) - [0 ; M(1:end-1,colV)]) * freq ;
        header = [header {'WheelBasedAcceleration'}] ;
        M = [M M_acc] ;
        %Trajets
        % Calcul des indicateurs (temps, vitesses, distances,
        % consommation
        csv_trajet = stats_trajet(M,header,freq,param) ;
        catalogue_trajets = [ catalogue_trajets ; csv_trajet ] ;
        %Micro-trajets et ralentis
        % Identification et découpage
        % Calcul des indicateurs
        [ csv_microTrajets temp ] = detection_microTrajets_idle(M,header,freq) ;

        if (iscell(csv_microTrajets))
            for j = 1:length(csv_microTrajets)
                if (length(csv_microTrajets{j}) > time_microTrajet)
                    csv_microTrajets{j} = stats_microTrajet(csv_microTrajets{j},freq,param) ;
                    catalogue_microTrajets = [ catalogue_microTrajets ; csv_microTrajets{j} ]
                ;
            end
        end
        end
        ralentis.tous = [ralentis.tous ; vertcat(temp.tous{1:length(temp.tous)})] ;
        ralentis.sansExtremes = [ralentis.sansExtremes ;
        vertcat(temp.sansExtremes{1:length(temp.sansExtremes)})] ;
        ralentis.starter = [ralentis.starter ; temp.starter{1}] ;
        ralentis.off = vertcat(ralentis.off, temp.off{1}) ;
    end
end
end

function [ microTrajets catalogue_ralentis ] = detection_microTrajets_idle( M, header, freq )
%DETECTION_MICROTRAJETS_IDLE Sort les micro-trajets et les ralentis

%Extraction du profil de vitesse
colV = rechercheEnTete(header, 'WheelBasedVehicleSpeed') ;
colAcc = rechercheEnTete(header, 'WheelBasedAcceleration') ;
colFuel = rechercheEnTete(header, 'EngFuelRate') ;
colTemp = rechercheEnTete(header, 'COOLANT_TEMP') ;
colAmbiant = rechercheEnTete(header, 'Ambient_Air_Temperature') ;
profilVitesse = M(:,colV) ;
profilFuel = M(:,colFuel) ;
profilTemp = M(:,colTemp) ;

%Indices des vitesses nulles
V0 = profilVitesse == 0 ;
V0_inc = V0 - [0 ; V0(1:end-1)] ;
id_init = find(V0_inc == 1) ; %Indices des débuts de ralentis
id_fin = [find(V0_inc == -1)-1 ; length(profilVitesse)] ; %Indices des fins de ralentis

%Pré-allocation
N = length(id_init) ; %Nombre de vecteurs à découper
ralentis = struct([]) ;

```

```

%ralentis = cell(N,1) ;
microTrajets = cell(N-1,1) ;

%Extraction des micro-trajets
for i = 1:N-1
    init = id_fin(i) ;
    fin = id_init(i+1)-1 ;
    % Profils
    microTrajets{i}.M = M(init:fin,:) ;
    microTrajets{i}.header = header ;
    microTrajets{i}.profilVitesse = M(init:fin,colV) ;
    microTrajets{i}.profilAcceleration = M(init:fin,colAcc) ;
    % Rééchantillonnage (vitesse et accélération)
    microTrajets{i}.profilVitesse_resampled = downsample(microTrajets{i}.profilVitesse,freq)
;
    microTrajets{i}.profilAcceleration_resampled =
resample(microTrajets{i}.profilAcceleration,1,freq) ;
    % Re-profils
    microTrajets{i}.profilFuel = M(init:fin,colFuel) ;
    microTrajets{i}.profilTemp = M(init:fin,colTemp) ;
    microTrajets{i}.profilAmbiant = mean(M(init:fin,colAmbiant)) ;
end

%Extraction des ralentis
for i = 1:N
    ralentis{i}.profilFuel = profilFuel(id_init(i):id_fin(i)) ;
    ralentis{i}.profilFuel_minus2sec = profilFuel(id_init(i):id_fin(i)-2*freq) ;
%Dernières 2 secondes amputées
    ralentis{i}.profilTemp = profilTemp(id_init(i):id_fin(i)) ;
    ralentis{i}.duree = length(ralentis{i}.profilFuel) / freq ;
    ralentis{i}.parametres = carac_ceRalenti(ralentis{i}.profilFuel,
ralentis{i}.profilFuel_minus2sec) ;
    ralentis{i}.parametres.tempAmb = mean(M(id_init(i):id_fin(i),colAmbiant)) ;
end

%Caractéristiques des micro-trajets suivants et précédents
for i = 1:N-1
    ralentis{i}.nextSegment.vMoy = mean(microTrajets{i}.profilVitesse) ;
    ralentis{i}.nextSegment.vMax = max(microTrajets{i}.profilVitesse) ;
    ralentis{i}.nextSegment.duree = length(microTrajets{i}.profilVitesse) / freq ;
    ralentis{i}.nextSegment.PKE = PKE(microTrajets{i}.profilVitesse,freq) ;
    ralentis{i+1}.prevSegment = ralentis{i}.nextSegment ;
end
vide = struct('vMoy', [], 'vMax', [], 'duree', [], 'PKE', []) ;
ralentis{1}.prevSegment = vide ;
ralentis{N}.nextSegment = vide ;

ralentis_sansExtremes = ralentis(2:end-1) ;
ralentis_starter = ralentis(1) ;
ralentis_off = ralentis(end) ;

catalogue_ralentis.tous = ralentis ;
catalogue_ralentis.sansExtremes = ralentis_sansExtremes ;
catalogue_ralentis.starter = ralentis_starter ;
catalogue_ralentis.off = ralentis_off ;
end

function [ i ] = distro( rd, poidsSum )
%DISTRO Probabilité spécifique

i = 1 ;
while rd > poidsSum(i)
    i = i+1 ;
end
end

function [ ] = export_drivingCycle_TXT( cycle )
%EXPORT_DRIVINGCYCLE_TXT Export cycle sous forme TXT

```



```

%   Chemin et nom de fichier choisis par utilisateur

%   Matrice de sortie
M = abs(cycle.profilVitesse_resampled .* (cycle.profilVitesse_resampled >= 0)) ;
sortie = [transpose(0:1:length(M)-1) M] ;
%   Création/ouverture fichier
[fichier, dossier] = uiputfile('ETSx_drivingCycle_final.txt','Export de cycle en TXT') ;
titre = cell2mat(inputdlg({'Titre du profil de vitesse'}, 'Profil', 1, {'ETSx Driving Cycle'}))
;
fid = fopen(strcat(dossier, fichier), 'w+') ;
%   écriture
fprintf(fid, '%s\t%s\r\n', fichier, titre) ;           %   Titre
fprintf(fid, '%s\t%s\r\n', 'Time (seconds)', 'Speed (km/h)') ;   %   Headers
fprintf(fid, '%u\t%1.1f\r\n', sortie) ;               %   Données
%   Sortie
fclose(fid) ;
end

function y=fractile(x,f,ascending);
% y=fractile(x,f,0);
% PURPOSE: Sort and devide a column vector x into fractiles
%-----
% USAGE: y=fractile(x,f,ascending);
% where: y = a cell array structure containing output fractiles and their index numbers
%       x = the input vector
%       f = the number of fractiles to be devided into
%       ascending = 1 or 0, the logical switch that specifies
%               an ascending sort (0) or a descending sort (1)
%-----
%
% Wei Li,
% MBA 2003, University of Chicago Graduate School of Business
% wayneli@fastmail.fm
%
% This function sorts a column vector and devide it into any number of fractiles.
%
% I use it in stock attributes analysis, for example, breaking a portfolio of
% stocks into QUINTILES by their E/P ratios (setting f=5), or into
% DECILES by their previous 1 month momentum etc. (setting f=10).
%
% Algorithm:
% In the case where the total number of observations divided by number of
% fractiles is an integer, the function divides the vector into equal parts.
% If the total number of observations can NOT be integally devide by number of
% fractiles, the last fractiles would absorb the extra observations

if (nargin ~= 3); error('wrong number of input arguments'); end;
[m,n]=size(x);
if n>1; error('The input data must be a vector'); end;
if f>m; error('The number of fractiles cannot exceed number of observations'); end;

%find the maximum length of the fractiles,
%which is actually the quotient of observations/fractiles
i=0;
while (m-i)/f~=round((m-i)/f),
    i=i+1;
end
length=(m-i)/f-1;

%sort the vector to either ascending or descending before fractile slicing

if ascending==1
    [sorted,index]=sort(x);
else
    [sorted,index]=sort(x);
    sorted=flipud(sorted); index=flipud(index);
end
end

```

```

% slicing vector into fractiles.
start=1;
for j=1:(f-1)
    y{j}=[sorted(start:(start+length)) index(start:(start+length))];
    start=start+length+1;
end
y{j+1}=[sorted(start:end) index(start:end)];
end

function [ cycle ] = fusionCycle( catalogue, param, freq )
% FUSIONCYCLE Transformation d'une liste de trajets en un trajet unique

% Profils
cycle.profilVitesse = vertcat(catalogue.profilVitesse) ;
cycle.profilAcceleration = vertcat(catalogue.profilAcceleration) ;
% Rééchantillonnage
cycle.profilVitesse_resampled = downsample(cycle.profilVitesse,freq) ;
cycle.profilAcceleration_resampled = resample(cycle.profilAcceleration,1,freq) ;
% Vitesses
cycle.vMax = max(cycle.profilVitesse) ;
cycle.vMoy = mean(cycle.profilVitesse) ;
% Accélération
[cycle.accMoy cycle.decMoy] = accDecMoy(cycle.profilVitesse,freq) ;
% Temps
cycle.temps = length(cycle.profilVitesse) / freq ;
cycle.tempsH = cycle.temps / 3600 ;
% Distance
cycle.distanceKM = cycle.vMoy * cycle.tempsH ;
cycle.distanceM = cycle.distanceKM * 1000 ;
% Consommations
cycle.carburantL = sum([catalogue.carburantL]) ;
cycle.carburantL100km = 100 * cycle.carburantL / cycle.distanceKM ;
% Caractéristiques
[cycle.idle cycle.crawl cycle.cruise cycle.acceleration cycle.deceleration] =
carac_profilVitesse(cycle.profilVitesse,cycle.profilAcceleration,param) ;
cycle.PKE = PKE(cycle.profilVitesse,freq) ;
% SAFD
[ cycle.SAFD.norm cycle.SAFD.pc cycle.SAFD.abs cycle.SAFD.param ] = SAFD_fc(
cycle.profilVitesse, cycle.profilAcceleration, param ) ;
end

function [ idle idle_i idle_f idle_all ] = idle( profilV, freq )
% ID_IDLE Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

profilV2 = [profilV(2:end) ; 1] ;
profilAcc = profilV - [0 ; profilV(1:end-1)] ;
% Indexes respectifs des débuts et fins de ralenti
idle_i = [1 ; find((profilV == 0).* profilAcc < 0)] ;
idle_f = find((profilV == 0) .* (profilV2 > 0)) ;

N = length(idle_i) ; %Nombre de périodes de idle

%Initialisation et remplissage de la matrice de sortie
idle = zeros(N,1) ;
for i = 1:N
    idle(i) = ((idle_f(i)+1) - idle_i(i)) / freq ;
end
idle_i = idle(1) ;
idle_f = idle(end) ;
idle_all = idle ;
end

function [ header, data, time ] = importCSV( nomFichier, pathFichier )
% Import des données des CSV Isaac
% Un fichier en argument 'nomFichier.csv'

```

```

% Deux sorties, HEADER et DATA

%Par défaut, on considère
% 4 lignes avant le HEADER
% 9 lignes avant les DONNÉES

hl = 5 ;
dl = 10 ;
fichierTotal = fullfile(pathFichier,nomFichier) ;
%Import de l'en-tête
header = importdata(fichierTotal,',',hl) ;
header(1:hl-1 , :) = [] ;
%Import des données numériques
data = dlmread(fichierTotal,',',dl,1) ;
%Import de la colonne DATE
fid = fopen(fichierTotal) ;
time = textscan(fid,'%19c %*[\n]', 'HeaderLines',10) ;
fclose(fid) ;
time=cell2mat(time) ;
n = size(time,2) ;
time=time(:,n-1:n) ;
%Suppression de la mention DATE dans le header
header(1) = [] ;
end

function [ listeCSV ] = liste_CSV( dossier )
%Liste les fichiers CSV présents dans dossier de travail
% Un dossier en entrée
% Une liste et un entier en sortie

%Struc Array avec CSV présents dans le dossier de travail
listeCSV = dir(fullfile(dossier,'*.csv')) ;
end

function [ PKE ] = PKE( profilV, freq )
%PKE Positive Kinetic Energy
%  $PKE = (vf^2 - vi^2)/x, dv/dt > 0$ 
%  $km^2/h^2$  ;

distance = mean(profilV) * (length(profilV) / freq) ;
profilV2 = [0 ; profilV(1:end-1)] ;
PKE = sum((profilV>profilV2) .* (profilV.^2 - profilV2.^2)) * (1000/3600) / distance ;
end

function [ nStop, mStop ] = pre_vitesse( M, header )
%PRE_VITESSE Charge matrice/en-tête et découpe le trajet en micro-trajets
% Condition de découpage : v = 0
% La période *idle* se retrouve à la fin d'un micro-trajet

%Identification de la colonne *vitesse*
colV = rechercheEnTete(header, 'WheelBasedVehicleSpeed') ;
vSeuil = 5 ; %Si vSeuil est dépassée, alors on sort du régime *idle*
%Compteur de "stops" : nStop
%Compteur de redémarrages : nGo
nStop = 0 ;
mStop = 0 ;
vMax = 0 ;
for i=2:size(M,1)
    j = size(M,1)-i+2 ;
    vMax = max(vMax, M(i,colV)) ;
    if ((M(i-1,colV) ~= 0) && (M(i,colV) == 0) && (vMax > vSeuil))
        nStop = nStop + 1 ;
        mStop ( nStop + 1 ) = i ;
        vMax = 0 ;
    end
end
end

```

```

if (nStop ~= 0)
    mStop(length(mStop)+1) = size(M,1) ;
end
end

function [ sortie ] = ratioCarburants( catalogue, consigne, freq )
%RATIOCARBURANTS Sort le ratio (en temps et en volume) essence:propane
% Catalogue de trajets en entrée

temp.essence = (vertcat(catalogue.profilTemp) < consigne) ;
temp.propane = (vertcat(catalogue.profilTemp) >= consigne) ;
temp.carburant_total = sum(vertcat(catalogue.carburantL)) ;
temp.N = length(vertcat(catalogue.profilTemp)) ;
sortie.temps_essence_percent = 100 * sum(temp.essence) / temp.N ;
sortie.temps_propane_percent = 100 * sum(temp.propane) / temp.N ;
sortie.volume_essence_L = sum(temp.essence .* vertcat(catalogue.profilFuel) ./ (freq*3600)) ;
sortie.volume_propane_L = sum(temp.propane .* vertcat(catalogue.profilFuel) ./ (freq*3600)) ;
sortie.volume_essence_percent = 100 * sortie.volume_essence_L / temp.carburant_total ;
sortie.volume_propane_percent = 100 * sortie.volume_propane_L / temp.carburant_total ;
end

function [id_col] = rechercheEnTete(header, recherche)
%Fonction recherche d'en-tête
% header = nom du HEADER parcouru
% nCol = largeur du HEADER (nb paramètres)
% recherche = 'ParamRecherche'
% ligneRecherche = ligne des en-têtes
nCol = length(header) ;
id_col = -1 ;
i = 1 ;
while ((id_col == -1) && (i<=nCol))
    if (strcmp(header(i),recherche))
        id_col = i ;
    else
        i = i+1 ;
    end
end
end

function [ reference ] = ref_trajets( catalogue, param, freq )
%REF_TRAJETS Caractéristiques de l'ensemble des données

% Vitesses
reference.vMax = max([catalogue.vMax]) ;
reference.vMoy = sum([catalogue.distanceKM]) / sum([catalogue.tempsH]) ;
% Accélérations
[reference.accMoy reference.decMoy] = accDecMoy(vertcat(catalogue.profilVitesse),freq) ;
% Temps
reference.temps = sum([catalogue.temps]) ;
reference.tempsH = reference.temps / 3600 ;
% Distances
reference.distanceKM = sum([catalogue.distanceKM]) ;
reference.distanceM = 1000 * reference.distanceKM ;
% Carburant
reference.carburantL = sum([catalogue.carburantL]) ;
reference.carburantL100km = reference.carburantL / (reference.distanceKM / 100) ;
reference.ratioCarburants = ratioCarburants(catalogue,param.consigne,freq) ;
% Caractéristiques
reference.idle = sum([catalogue.idle] .* [catalogue.temps]) / reference.temps ;
reference.crawl = sum([catalogue.crawl] .* [catalogue.temps]) / reference.temps ;
reference.cruise = sum([catalogue.cruise] .* [catalogue.temps]) / reference.temps ;
reference.acceleration = sum([catalogue.acceleration] .* [catalogue.temps]) / reference.temps ;
reference.deceleration = sum([catalogue.deceleration] .* [catalogue.temps]) / reference.temps ;

```

```

% PKE
reference.PKE = PKE(vertcat(catalogue.profilVitesse),freq) ;
% Idle
reference.idle_initial = mean([catalogue.idle_initial]) ;
reference.idle_final = mean([catalogue.idle_final]) ;
end

function [ indiceSSD comparo ] = representativiteCycle( candidat, reference )
%REPRESENTATIVITECYCLE Sum of Squared Differences
% Comparaison SSD (SAFD), vMax, vMoy, temps à différents régimes

% Vitesses
comparo.vMax = abs(candidat.vMax - reference.vMax) / min(candidat.vMax, reference.vMax) ;
comparo.vMoy = abs(candidat.vMoy - reference.vMoy) / min(candidat.vMoy, reference.vMoy) ;
% Régimes
comparo.idle = abs(candidat.idle - reference.idle) / min(candidat.idle, reference.idle) ;
%comparo.crawl = abs(candidat.crawl - reference.crawl) / min(candidat.crawl, reference.crawl) ;
;
comparo.acceleration = abs(candidat.acceleration - reference.acceleration) /
min(candidat.acceleration, reference.acceleration) ;
comparo.deceleration = abs(candidat.deceleration - reference.deceleration) /
min(candidat.deceleration, reference.deceleration) ;
comparo.cruise = abs(candidat.cruise - reference.cruise) / min(candidat.cruise,
reference.cruise) ;
% Positive Kinetic Energy
comparo.PKE = abs(candidat.PKE - reference.PKE) / min(candidat.PKE, reference.PKE) ;
% SAFD
% Ajustement de la matrice SAFD testée
SAFD_ref = reference.SAFD.norm ;
SAFD_test = candidat.SAFD.norm ;
Vref = size(SAFD_ref,1) ;
[V A] = size(SAFD_test) ;
z_vitesse = reference.SAFD.param.SAFD_vmax - candidat.SAFD.param.SAFD_vmax ;
SAFD_test = [SAFD_test ; zeros(z_vitesse,A)] ;
V = V + z_vitesse ;
z_accmax = reference.SAFD.param.SAFD_accmax - candidat.SAFD.param.SAFD_accmax ;
if (z_accmax > 0)
    SAFD_test = [SAFD_test zeros(V,z_accmax)] ;
else
    if (z_accmax < 0)
        SAFD_ref = [SAFD_ref zeros(Vref,abs(z_accmax))] ;
    end
end

z_decmax = reference.SAFD.param.SAFD_decmax - candidat.SAFD.param.SAFD_decmax ;
if (z_decmax > 0)
    SAFD_test = [zeros(V,z_decmax) SAFD_test] ;
else
    if (z_decmax < 0)
        SAFD_ref = [SAFD_ref zeros(Vref,abs(z_decmax))] ;
    end
end

% Calcul des différences (SSD)
comparo.SAFD = SAFD_comparaison(SAFD_test,SAFD_ref) ;
% Synthèse
indiceSSD = sum(cell2mat(struct2cell(comparo))) ;
end

function [ SSD ] = SAFD_comparaison( SAFD, SAFD_autres )
%SAFD_COMPARAIISON Comparaison d'un fichier par rapport à ses collègues
% Critère de comparaison : somme des carrés de différence
SSD = sum(sum((SAFD-SAFD_autres).^2)) ;
end

function [ SAFD_normalized SAFD_pourcent SAFD_absolu paramSortie ] = SAFD_fc( profilV,
profilAcc, param )

```

```

%SAFD_fc Calcule la distribution SAFD des données enregistrées
%   En entrée, profils de vitesse et d'accélération et paramètres
%   En sortie, 3 versions du SAFD

N = length(profilV) ;
%Classes de vitesse
classeV = floor(profilV/param.incV) + 1 ;
vmax = max(classeV) ;
%Classes d'accélération
classeAcc = floor(profilAcc/param.incAcc) ;
accmax = max(classeAcc) ;
decmax = abs(min(classeAcc)) ;
offset = 1 + decmax ;
N_acc = 1 + accmax + decmax ;
SAFD_absolu = zeros(vmax,N_acc) ;
for i=1:vmax
    for j=1:N_acc
        SAFD_absolu(i,j) = sum((classeV == i) .* (classeAcc + offset == j)) ;
    end
end
SAFD_normalized = SAFD_absolu / N ;
SAFD_pourcent = SAFD_normalized * 100 ;
paramSortie.SAFD_accmax = accmax ;
paramSortie.SAFD_decmax = decmax ;
paramSortie.SAFD_offset = offset ;
paramSortie.SAFD_vmax = vmax ;
end

function [ microTrajet ] = stats_microTrajet( microTrajet, freq, param )
%STATS_MICROTRAJET Distance, vitesse, consommation ... d'un micro-trajet
%   En entrée, un profil de vitesse à 'freq' Hz

%   Temps
microTrajet.temps = length(microTrajet.profilVitesse) / freq ;
microTrajet.tempsH = microTrajet.temps / 3600 ;
%   Vitesses
microTrajet.vMax = max(microTrajet.profilVitesse) ;
microTrajet.vMoy = mean(microTrajet.profilVitesse) ;
%   Distances
microTrajet.distanceKM = microTrajet.vMoy * microTrajet.tempsH ;
microTrajet.distanceM = 1000 * microTrajet.distanceKM ;
%   Consommations
microTrajet.carburantL = mean(microTrajet.profilFuel) * microTrajet.tempsH ;
microTrajet.carburantL100km = microTrajet.carburantL / (microTrajet.distanceKM / 100) ;
%Caractéristiques avancées
%   Caractéristiques des profils de vitesse
[microTrajet.idle microTrajet.cruise microTrajet.acceleration microTrajet.deceleration] =
carac_profilVitesse(microTrajet.profilVitesse,microTrajet.profilAcceleration,param) ;
end

function [ sortie ] = stats_trajet( M_trajet, header, freq, param )
%STATS_TRAJET Caractéristiques d'un trajet (avec idle)

colV = rechercheEnTete(header, 'WheelBasedVehicleSpeed') ;
colAcc = rechercheEnTete(header, 'WheelBasedAcceleration') ;
colFuel = rechercheEnTete(header, 'EngFuelRate') ;
colTemp = rechercheEnTete(header, 'COOLANT_TEMP') ;
%   Profils
sortie.M = M_trajet ;
sortie.header = header ;
sortie.profilVitesse = M_trajet(:,colV) ;
sortie.profilAcceleration = M_trajet(:,colAcc) ;
%   Rééchantillonnage
sortie.profilVitesse_resampled = downsample(sortie.profilVitesse,freq) ;
sortie.profilAcceleration_resampled = resample(sortie.profilAcceleration,1,freq) ;
sortie.profilFuel = M_trajet(:,colFuel) ;
sortie.profilTemp = M_trajet(:,colTemp) ;

```

```

% Stats de base
% Temps
sortie.temps = length(sortie.profilVitesse) / freq ;
sortie.tempsH = sortie.temps / 3600 ;
sortie.tempsRoulant = sum(sortie.profilVitesse > 0) / freq ;
sortie.tempsRoulantH = sortie.tempsRoulant / 3600 ;
% Vitesses
sortie.vMax = max(sortie.profilVitesse) ;
sortie.vMoy = mean(sortie.profilVitesse) ;
sortie.vMoyRoul = sortie.vMoy * sortie.tempsRoulant/sortie.temps ;
% Accélérations
[sortie.accMoy sortie.decMoy] = accDecMoy(sortie.profilVitesse,freq) ;
% Distances
sortie.distanceKM = sortie.vMoy * sortie.tempsH ;
sortie.distanceM = 1000 * sortie.distanceKM ;
% Consommations
sortie.carburantL = mean(sortie.profilFuel) * sortie.tempsH ;
sortie.carburantL100km = sortie.carburantL / (sortie.distanceKM / 100) ;
% Caractéristiques avancées
% Caractéristiques des profils de vitesse
[sortie.idle sortie.crawl sortie.cruise sortie.acceleration sortie.deceleration] =
carac_profilVitesse(sortie.profilVitesse,sortie.profilAcceleration,param) ;
[~, sortie.idle_initial, sortie.idle_final, sortie.idle_tous] =
idle(sortie.profilVitesse,freq) ;
end

function [ sortie ] = X_stats( cycle, reference, freq, param )
%STATS_TRAJET Caractéristiques d'un trajet (avec idle)

sortie = cycle ;
% Stats de base
% Temps
sortie.temps = length(sortie.profilVitesse) / freq ;
sortie.tempsH = sortie.temps / 3600 ;
sortie.tempsRoulant = sum(sortie.profilVitesse > 0) / freq ;
sortie.tempsRoulantH = sortie.tempsRoulant / 3600 ;
% Vitesses
sortie.vMax = max(sortie.profilVitesse) ;
sortie.vMoy = mean(sortie.profilVitesse) ;
sortie.vMoyRoul = sortie.vMoy * sortie.tempsRoulant/sortie.temps ;
% Accélérations
[sortie.accMoy sortie.decMoy] = accDecMoy(sortie.profilVitesse,freq) ;
% Distances
sortie.distanceKM = sortie.vMoy * sortie.tempsH ;
sortie.distanceM = 1000 * sortie.distanceKM ;
% Caractéristiques avancées
% Caractéristiques des profils de vitesse
[sortie.idle sortie.crawl sortie.cruise sortie.acceleration sortie.deceleration] =
carac_profilVitesse(sortie.profilVitesse,sortie.profilAcceleration,param) ;
[~, sortie.idle_initial, sortie.idle_final, sortie.idle_tous] =
idle(sortie.profilVitesse,freq) ;
end

function [ cycle ] = zerosCycle( cycle, param, freq )
%ZEROSCYCLE Complète un cycle avec des zéros pour atteindre la durée voulue

T = round((param.target_sec - sum([cycle.temps])) * freq) ; %Temps à compléter
Z = cycle(1) ; %Extraction d'un micro-trajet pour la structure des données
% Modification des profils (vitesse, accélération, temp., carburant)
Z.profilVitesse = zeros(T,1) ;
Z.profilAcceleration = Z.profilVitesse ;
Z.profilTemp = param.engTemp * ones(size(Z.profilVitesse)) ;
Z.profilFuel = param.fuelRate * ones(size(Z.profilVitesse)) ;
% Calculs des indicateurs manquants
Z = stats_microTrajet(Z,freq,param) ;
% Reconstruction d'une matrice M qui respecte le header associé
colV = rechercheEnTete(Z.header,'WheelBasedVehicleSpeed') ;

```

```
colAcc = rechercheEnTete(Z.header, 'WheelBasedAcceleration') ;  
colFuel = rechercheEnTete(Z.header, 'EngFuelRate') ;  
colTemp = rechercheEnTete(Z.header, 'COOLANT_TEMP') ;  
Z.M = zeros(T,4) ;  
Z.M(:,colV) = Z.profilVitesse ;  
Z.M(:,colAcc) = Z.profilAcceleration ;  
Z.M(:,colTemp) = Z.profilTemp ;  
Z.M(:,colFuel) = Z.profilFuel ;  
cycle(end+1) = Z ;  
end
```


LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alexiadis, Alessio. 2007. « Global warming and human activity: A model for studying the potential instability of the carbon dioxide/temperature feedback mechanism ». *Ecological Modelling*, vol. 203, n° 3-4, p. 243-256.
- André, M. 2004. « The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions ». *Science of the Total Environment*, vol. 334-35, p. 73-84.
- Andres, R. J., D. J. Fielding, G. Marland, T. A. Boden, N. Kumar et A. T. Kearney. 1999. « Carbon dioxide emissions from fossil-fuel use, 1751-1950 ». *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, vol. 51, n° 4, p. 759-765.
- Anon. 2006. « The Hawthorne effect ». *Occupational Medicine*, vol. 56, n° 3, p. 217.
- Arteconi, A., C. Brandoni, D. Evangelista et F. Polonara. 2010. « Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe ». *Applied Energy*, vol. 87, n° 6, p. 2005-2013.
- Austin, T.C., F.J. DiGenova, T.R. Carlson, R.W. Joy et K.A. Gianolini. 1993. *Characterization of driving patterns and emissions from light-duty vehicles in California. Final report.* 304 p.
- Biona, J. B. M. M., et A. B. Culaba. 2006. « Drive cycle development for tricycles ». *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 8, n° Copyright 2006, The Institution of Engineering and Technology, p. 131-7.
- BP. 2010. *BP Statistical Review of World Energy June 2010.*
- California Environmental Protection Agency. 2012. *Key Events in the History of Air Quality in California.* En ligne. < <http://www.arb.ca.gov/html/brochure/history.htm> >. Consulté le 18 avril 2012.
- Canada. 1999. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999).* En ligne. <http://lois-laws.justice.gc.ca>: Ministère de la Justice, 272 p. Consulté le 20 mars 2012.
- Canada. 2003. *Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs (2003).* Ottawa. Consulté le 25 avril 2012.
- CITEPA. 2010. « Oxydes d'azote - NO_x ». < http://www.citepa.org/emissions/nationale/Aep/aep_nox.htm >. Consulté le 16 avril 2012.
- Conseil des Communautés européennes. 1970. *Directive 70/220/CEE.*

- Deng, H. N., L. Cheng et Z. Y. Zheng. 2009. « Evaluation of Traffic Movement Organization Planning with Environmental Impact Consideration ». *Iceet: 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, Vol 1, Proceedings*, p. 138-141.
- Felstead, T., M. McDonald et M. Fowkes. 2009. « Driving style extremes and potential vehicle emission effects ». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport*, vol. 162, n° Copyright 2010, The Institution of Engineering and Technology, p. 141-8.
- Florides, Georgios A., et Paul Christodoulides. 2009. « Global warming and carbon dioxide through sciences ». *Environment International*, vol. 35, n° 2, p. 390-401.
- Gammariello, R., et J.R. Long. 1996. « Development of Unified Correction Cycles ». In *CRC Sixth Annual On-Road Vehicle Emissions Workshop*. (El Monte, CA, San Diego, CA, 18-20 mars 1996). California Air Resources Board.
- Gandhi, H. S., G. W. Graham et R. W. McCabe. 2003. « Automotive exhaust catalysis ». *Journal of Catalysis*, vol. 216, n° 1-2, p. 433-442.
- Gassmann, S. 1990. « Influences of driver, vehicle and traffic on fuel consumption in real urban traffic ». In *Eighteenth FISITA Congress - The Promise of New Technology in the Automotive Industry, May 7, 1990 - May 11, 1990*. (Torino, Italy), p. 811-815. Coll. « Proceedings - Society of Automotive Engineers »: Publ by SAE.
- Hoyer, K. G., et E. Holden. 2007. « Alternative fuels and sustainable mobility: is the future road paved by biofuels, electricity or hydrogen? ». *International Journal of Alternative Propulsion*, vol. 1, n° 4, p. 352-68.
- Huggins, F. E., G. P. Huffman, W. P. Linak et C. A. Miller. 2004. « Quantifying hazardous species in particulate matter derived from fossil-fuel combustion ». *Environmental Science & Technology*, vol. 38, n° 6, p. 1836-1842.
- Hung, W. T., K. M. Tam, C. P. Lee, L. Y. Chan et C. S. Cheung. 2005. « Comparison of driving characteristics in cities of Pearl River Delta, China ». *Atmospheric Environment*, vol. 39, n° 4, p. 615-625.
- Hung, W. T., H. Y. Tong, C. P. Lee, K. Ha et L. Y. Pao. 2007. « Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong ». *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, vol. 12, n° 2, p. 115-128.
- International Energy Agency. 2011. *CO₂ Emissions from Fuel Combustion: Highlights*. Paris: OECD/IEA.

- ISAAC Instruments. 2010. *Technical Datasheet: Data Recorder Unit, model 900 - DRU900*. Technical Datasheet. < <http://www.isaac.ca> >.
- Jazcilevich, Arón D., Alejandro García-Fragoso, Agustín García Reynoso, Michel Grutter, Ulises Diego-Ayala, Jim Lents et Nicole Davis. 2007. « A Vehicle Emissions System Using a Car Simulator and a Geographical Information System: Part 1—System Description and Testing ». *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 57, n° 10, p. 1234-1240.
- Jiang, P., Q. Shi, W. W. Chen, Y. W. Li et Q. H. Li. 2009. « Investigation of a New Construction Method of Vehicle Driving Cycle ». *Icicta: 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Vol IV, Proceedings*, p. 210-214.
- Kamble, S. H., T. V. Mathew et G. K. Sharma. 2009. « Development of real-world driving cycle: Case study of Pune, India ». *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, vol. 14, n° 2, p. 132-140.
- Kim, H. W., E. K. Ahn, B. K. Jee, H. K. Yoon, K. H. Lee et Y. Lim. 2009. « Nanoparticulate-induced toxicity and related mechanism in vitro and in vivo ». *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 11, n° 1, p. 55-65.
- Kuehn, S. E. 1996. « Power for the industrial age: A brief history of boilers ». *Power Engineering*, vol. 100, n° 2, p. 15-19.
- Lin, J., et D. A. Niemeier. 2003. « Estimating regional air quality vehicle emission inventories: Constructing robust driving cycles ». *Transportation Science*, vol. 37, n° 3, p. 330-346.
- Lin, Jie, et Debbie A. Niemeier. 2002. « An exploratory analysis comparing a stochastic driving cycle to California's regulatory cycle ». *Atmospheric Environment*, vol. 36, n° 38, p. 5759-5770.
- Liu, L., S. Y. Cheng, J. B. Li et Y. F. Huang. 2007. « Mitigating environmental pollution and impacts from fossil fuels: The role of alternative fuels ». *Energy Sources Part a-Recovery Utilization and Environmental Effects*, vol. 29, n° 12, p. 1069-1080.
- Liu, Yimin, et Gloria E. Helfand. 2009. « The Alternative Motor Fuels Act, alternative-fuel vehicles, and greenhouse gas emissions ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 43, n° 8, p. 755-764.
- Mayo, Elton. 1939. *Changing methods in industry*.
- McAlpine, C. A., J. G. Ryan, L. Seabrook, S. Thomas, P. J. Dargusch, J. I. Syktus, R. A. Pielke Sr, A. E. Etter, P. M. Fearnside et W. F. Laurance. 2010. « More than CO₂: a

broader paradigm for managing climate change and variability to avoid ecosystem collapse ». *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. In Press, Corrected Proof.

Murugesan, A., C. Umarani, R. Subramanian et N. Nedunchezian. 2009. « Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines-A review ». *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 3, p. 653-662.

National Renewable Energy Laboratory. 2012. « Vehicle Systems Analysis: Vehicle and Component Simulation ».
< http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/vsa/vehicle_simulation.html >. Consulté le 6 avril 2012.

Nesamani, K. S., et K. P. Subramanian. 2006. « Impact of real-world driving characteristics on vehicular emissions ». *Jsm International Journal Series B-Fluids and Thermal Engineering*, vol. 49, n° 1, p. 19-26.

Niemeier, D. A. 1999. *Data Collection for Driving Cycle Development: Evaluation of Data Collection Protocols*. Coll. « UC Davis-Caltrans AQ Project Report Series », UCD-ITS-RR-00-3. Davis, CA: California Department of Transportation, 83 p.

Organisation mondiale de la santé. 2008. « Air quality and health ». In *Facts Sheets*.
< <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/> >. Consulté le 10 décembre 2011.

Popp, Karl, et Werner Schiehlen. 1993. *Ground Vehicle Dynamics*. Stuttgart: B.G. Teubner, 352 p.

Raub, J. A. 1999. « Health effects of exposure to ambient carbon monoxide ». *Chemosphere - Global Change Science*, vol. 1, n° 1-3, p. 331-351.

Rekacewicz, Philippe. 2007. *Prévisions mondiales de la demande de transports routiers*.
< <http://www.cartografareilpresente.org/IMG/pdf/energietransports.pdf> >. Consulté le 17 avril 2012.

Saleh, W., R. Kumar, H. Kirby et P. Kumar. 2009. « Real world driving cycle for motorcycles in Edinburgh ». *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, vol. 14, n° 5, p. 326-333.

Schifter, I., L. Diaz, R. Rodriguez et E. Lopez-Salinas. 2005. « A driving cycle for vehicle emissions estimation in the metropolitan area of Mexico City ». *Environmental Technology*, vol. 26, n° 2, p. 145-154.

Shelef, M., et R. W. McCabe. 2000. « Twenty-five years after introduction of automotive catalysts: what next? ». *Catalysis Today*, vol. 62, n° 1, p. 35-50.

- Shen, Wei, A. Ling Zhang et Wei-Jian Han. 2007. « Alternative vehicle fuels strategy in China: Well-to-wheel analysis on energy use and greenhouse gases emission ». In *2006 International Conference on Management Science and Engineering, ICMSE'06, October 5, 2006 - October 7, 2006*. (Lille, France), p. 1735-1739. Coll. « Proceedings of 2006 International Conference on Management Science and Engineering, ICMSE'06 (13th) »: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. < <http://dx.doi.org/10.1109/ICMSE.2006.314070> >.
- Shi, Qin, YuBo Zheng, RunShen Wang et YouWen Li. 2011. « The study of a new method of driving cycles construction ». *Procedia Engineering*, vol. 16, n° 0, p. 79-87.
- Singh, R. N., A. S. Atkins, D. Mamurekli et M. Mamurekli. 2008. « Review of the coal mining industry in the UK 2008 ». In *21st World Mining Congress*. (Krakow), p. 10.
- Swedish Energy Agency. 2010. *Energy in Sweden 2010: Facts and figures*. Eskilstuna.
- Tamsanya, S., S. Chungpaibulpatana et B. Limmeechokchai. 2009. « Development of a Driving Cycle for the Measurement of Fuel Consumption and Exhaust Emissions of Automobiles in Bangkok during Peak Periods ». *International Journal of Automotive Technology*, vol. 10, n° 2, p. 251-264.
- Tong, H. Y., et W. T. Hung. 2008. « Driving Cycle Approaches in Characterising Driving Patterns ». *Transportation and Management Science*, p. 137-145.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1993. « Federal Test Procedure Review Project: Preliminary Technical Report ». U.S. Environmental Protection Agency, 203 p.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1998. *NOx, how nitrogen oxides affect the way we live and breathe [microform] : the regional transport of ozone : new EPA rulemaking on nitrogen oxide emissions*. Accessed from <http://nla.gov.au/nla.cat-vn4140660>. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2004. *U.S. Code of Federal Regulations: Title 40 Part 86*. En ligne. National Archives and Records Administration. < <http://ecfr.gpoaccess.gov> >. Consulté le 18 avril 2012.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2007. *Summary of Current and Historical Light-Duty Vehicle Emission Standards*. En ligne. < <http://www.epa.gov/greenvehicles/detailedchart.pdf> >. Consulté le 18 avril 2012.
- Van Mierlo, J., G. Maggetto, E. van de Burgwal et R. Gense. 2004. « Driving style and traffic measures - influence on vehicle emissions and fuel consumption ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, vol. 218, n° D1, p. 43-50.

- Vestreng, Vigdis, Gunnar Myhre, Hilde Fagerli, Stefan Reis et Leonor Tarrason. 2007. « Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe ». *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 7, n° 13, p. 3663-3681.
- Viola, Flavio M., Susana L. D. Paiva et Marcelo A. Savi. 2010. « Analysis of the global warming dynamics from temperature time series ». *Ecological Modelling*, vol. 221, n° 16, p. 1964-1978.
- Watson, H.C, E.E. Milkins et J. Braunsteins. 1982. « The development of the Melbourne Peak Drive Cycle ». In *SAE/ARRB Second Conference on Traffic Energy and Emissions*. (Melbourne).
- Zecca, Antonio, et Luca Chiari. 2010. « Fossil-fuel constraints on global warming ». *Energy Policy*, vol. 38, n° 1, p. 1-3.