



HAL
open science

Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules

Michel Andre

► **To cite this version:**

Michel Andre. Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules. Environnement et Société. INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON, 1998. Français. NNT: . tel-00990622

HAL Id: tel-00990622

<https://theses.hal.science/tel-00990622>

Submitted on 13 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée devant

L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

en

INGÉNIERIE INFORMATIQUE

par

Michel ANDRÉ

Ingénieur I.N.S.A. - D.E.A. Mécanique

**Construction de cycles de conduite représentatifs pour la
mesure des émissions de polluants des véhicules**

Soutenue le 3 février 1998

devant la Commission d'Examen

Jury Mmes	N. VINCENT	Professeur à l'Université François Rabelais, Tours
	J. NOPPE	Ingénieur à l'ADEME, Paris
MM.	P. PRÉVOT	Professeur à l'INSA de Lyon
	G. d'AUBIGNY	Professeur à l'Université P. Mendès-France, Grenoble
	J. DELSEY	Directeur de Recherche à l'INRETS, Bron
	J.C. GUIBET	Professeur à l'Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison
	A. ABDALI	Maître de conférence à l'Univ. P. Mendès-France, Grenoble

THÈSE

présentée devant

L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

en

INGÉNIERIE INFORMATIQUE

par

Michel ANDRÉ

Ingénieur I.N.S.A. - D.E.A. Mécanique

**Construction de cycles de conduite représentatifs pour la
mesure des émissions de polluants des véhicules**

Soutenue le 3 février 1998

devant la Commission d'Examen

Jury Mmes	N. VINCENT*	Professeur à l'Université François Rabelais, Tours
	J. NOPPE	Ingénieur à l'ADEME, Paris
MM.	P. PRÉVOT	Professeur à l'INSA de Lyon
	G. d'AUBIGNY*	Professeur à l'Université P. Mendès-France, Grenoble
	J. DELSEY*	Directeur de Recherche à l'INRETS, Bron
	J.C. GUIBET	Professeur à l'Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison
	A. ABDALI	Maître de conférence à l'Univ. P. Mendès-France, Grenoble

* également rapporteurs

Fiche bibliographique

1 UR (1er auteur) Laboratoire Energie Nuisances		2 Projet n°		3 Rapport INRETS n° LEN 9808	
4 Titre Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules					
5 Sous-titre				6 Langue F	
7 Auteur(s) ANDRÉ Michel				8 Rattachement ext.	
9 Nom adresse financeur, co-éditeur				10 N° contrat, conv.	
				11 Date de publication Février 1998	
12 Remarques					
13 Résumé <p>La mesure des émissions de polluants des véhicules nécessite la définition de conditions de test et de cycles de conduite représentatifs. Celle-ci nécessite la constitution d'une base d'information sur les conditions réelles d'usage et de fonctionnement des véhicules, par l'instrumentation de véhicules privés utilisés normalement. Selon ces principes, 80 voitures européennes ont été sélectionnées puis instrumentées par quatre laboratoires européens. Globalement, 10000 trajets et 90 000 kilomètres ont été enregistrés.</p> <p>On analyse les conditions de circulation au travers de la courbe de vitesse enregistrée à bord des véhicules, au cours de déplacements élémentaires ou segments cinématiques de taille homogène. Les segments sont décrits par la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées. Une Analyse des Correspondances Binaires suivie d'une classification permet de construire une typologie des conditions de circulation. Avec les mêmes outils, on analyse et établit une typologie des trajets, en fonction des conditions de circulation rencontrées. On construit ensuite deux ensembles de 3 et 8 cycles représentatifs des trajets urbains, routiers et autoroutiers.</p> <p>30 véhicules à essence, diesel, avec et sans catalyseur sont testés sur banc d'essai en utilisant ces cycles. La mesure des émissions de polluants CO, HC, NOx et CO₂ sur les 3 cycles principaux conduit à une sous-estimation par rapport aux résultats obtenus à partir des 8 cycles. Ceci démontre la nécessité d'une description détaillée des conditions de circulation, des conditions non moyennes de fonctionnement pouvant conduire à de fortes surémissions. Des relations entre conditions cinématiques et thermiques et l'incidence du démarrage à froid sur les émissions urbaines montrent la nécessité d'approfondir ce point. Le lien entre conditions de circulation et caractéristiques des véhicules tend à remettre en cause le principe de cycles communs à l'ensemble des véhicules.</p>					
14 Mots clés méthode mesure ; émission polluant ; véhicule routier ; vitesse ; analyse données ; classification automatique.			15 Diffusion libre		
16 Nombre de pages 278 pages		17 Prix	18 Confidentiel jusqu'au		19 Bibliographie oui

Publication data form

1 UR (1st author) Laboratoire Energie Nuisances		2 Project n°		3 INRETS report n° LEN 9808	
4 Title Building-up of representative driving cycles for the measurement of pollutant emissions from road vehicles					
5 Subtitle				6 Language F	
7 Author(s) ANDRÉ Michel				8 Affiliation	
9 Sponsor, co-editor, name and address				10 Contract, conv. n°	
				11 Publication date February 1998	
12 Notes					
13 Summary <p>The measurement of pollutant emissions from vehicles requires the defining of representative test conditions and driving cycles. This last one requires a knowledge of vehicle usage and of their operating conditions. For that, private vehicles are fitted with on-board data acquisition systems, and used normally by their owner. According to these principles, 80 European cars have been selected and monitored by 4 European laboratories. Globally, 10,000 trips and 90,000 km have been recorded.</p> <p>Driving conditions are analysed through the speed recorded on-board the vehicles, during elementary periods, or kinematic segments with homogeneous size. These ones are described by the crossed-distribution of the instant speeds and accelerations.</p> <p>Correspondence Analysis and Clustering allow the defining of a driving conditions typology in 12 classes. The same tools are used to characterise trips as regards the driving conditions encountered. According to these typologies, two sets of 3 and 8 driving cycles are built-up that represent urban, road and motorway trips.</p> <p>30 gasoline and diesel vehicles, with and without catalysator are tested on a chassis dynamometer using these driving cycles. Emissions values (CO, HC, NO_x and CO₂) measured on the 3 main driving cycles underestimate the results obtained while using the 8 cycles. That highlights the necessity of a detailed description of the driving conditions, as non-average operating conditions can led to high overemissions. Link between thermal and kinematic conditions and the impact of cold start show the necessity to proof this point. Links between driving conditions and vehicles characteristics question the principle of the usage of a unique driving cycle for all the vehicles.</p>					
14 Key Words measurement method ; pollutant emission ; road vehicle ; speed ; data analysis ; automatic clustering.			15 Distribution statement free		
16 Nb of pages 278 pages		17 Price	18 Declassification date		19 Bibliography yes

DÉCEMBRE 1996

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

Directeur : J. ROCHAT

Professeurs :

S.	AUDISIO	PHYSICO-CHIMIE INDUSTRIELLE
J.C.	BABOUX	G.E.M.P.P.M.
J.	BAHUAUD	MÉCANIQUE DES SOLIDES
B.	BALLAND	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE
G.	BARBIER	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE
G.	BAYADA	MOD. MAT. CAL. SCIEN./L.M.C.
C.	BERGER (Mlle)	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE
M.	BETEMPS	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
J.M.	BLANCHARD	L.A.E.P.S.I.
C.	BOISSON	VIBRATIONS ACOUSTIQUES
M.	BOIVIN	MÉCANIQUE DES SOLIDES
H.	BOTTA	ÉQUIPE DÉVELOPPEMENT URBAIN
G.	BOULAYE	I.F.
J.	BRAU	CETHIL/THERMIQUE DU BÂTIMENT
M.	BRISSAUD	GÉNIE ÉLECTRIQUE ET FERROÉLECTRICITÉ
M.	BRUNET	MÉCANIQUE DES SOLIDES
J.C.	BUREAU	THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE
J.P.	CHANTE	COMPOSANTS DE PUISSANCE ET APPLICATIONS
B.	CHOCAT	U.R.G.C. HYDROLOGIE URBAINE
B.	CLAUDEL	L.A.E.P.S.I.
M.	COUSIN	U.R.G.C. STRUCTURE
M.	DIOT	THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE
A.	DOUTHEAU	CHIMIE ORGANIQUE
J.C.	DUPUY	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE
H.	EMPTOZ	R.F.V.
C.	ESNOUF	G.E.M.P.P.M.*
G.	FANTOZZI	G.E.M.P.P.M.*
J.	FAVREL	P.R.I.S.Ma.
G.	FERRARIS-BESSON	MÉCANIQUE DES STRUCTURES
Y.	FETIVEAU	GÉNIE ÉLECTRIQUE ET FERROÉLECTRICITÉ
L.	FLAMAND	MÉCANIQUE DES CONTACTS
P.	FLEISCHMANN	G.E.M.P.P.M..
A.	FLORY	L.I.S.I.
R.	FOUGERES	G.E.M.P.P.M.*
F.	FOUQUET	G.E.M.P.P.M.*
L.	FRECON	I.F.
R.	GAUTHIER	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE
M.	GERY	CETHIL/EQ. THERMIQUE DU BÂTIMENT
G.	GIMENEZ	C.R.E.A.T.I.S.
P.	GONNARD	GÉNIE ÉLECTRIQUE ET FERROÉLECTRICITÉ
M.	GONTRAND	L.C.P.A.
G.	GRANGE	GÉNIE ÉLECTRIQUE ET FERROÉLECTRICITÉ
G.	GUENIN	G.E.M.P.P.M.*
M.	GUICHARDANT	BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE
G.	GUILLOT	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE
A.	GUINET	PRISMa
J.L.	GUYADER	VIBRATIONS - ACOUSTIQUE
D.	GUYOMAR	GÉNIE ÉLECTRIQUE ET FERROÉLECTRICITÉ
J.M.	JOLION	R.F.V.
A.	JUTARD	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
R.	KASTNER	U.R.G.C. GÉOTECHNIQUE
H.	KLEIMANN	GÉNIE ÉLECTRIQUE ET FERROÉLECTRICITÉ
J.	KOULOUMDJIAN	L.I.S.I.
M.	LAGARDE	BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE
M.	LALANNE	MÉCANIQUE DES STRUCTURES
A.	LALLEMAND	CETHIL/EQ. ÉNERGÉTIQUE ET THERMIQUE
M.	LALLEMAND (Mme)	CETHIL/EQ. ÉNERGÉTIQUE ET THERMIQUE
P.	LAREAL	U.R.G.C. GÉOTECHNIQUE
A.	LAUGIER	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE
CH.	LAUGIER	BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE
P.	LEJEUNE	G.M.M.I.C.
A.	LUBRECHT	MÉCANIQUE DES CONTACTS

Y.	MARTINEZ	L.3I.
H.	MAZILLE	PHYSICO-CHIMIE INDUSTRIELLE
J.	MERLE	G.E.M.P.P.M.*
J.	MERLIN	G.E.M.P.P.M.*
J.P.	MILLET	PHYSICO-CHIMIE INDUSTRIELLE
M.	MIRAMOND	U.R.G.C. HYDROLOGIE URBAINE
M.	MONGEREAU	U.R.G.C. GÉOTECHNIQUE
R.	MOREL	MÉCANIQUE DES FLUIDES
P.	NARDON	BIOLOGIE APPLIQUÉE
A.	NAVARRO	L.A.E.P.S.I.
M.	OTTERBEIN	L.A.E.P.S.I.
J.P.	PASCAULT	MATÉRIAUX MACROMOLÉCULAIRES
J.	PERA	U.R.G.C. MATÉRIAUX
G.	PERACHON	THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE
J.	PEREZ	G.E.M.P.P.M.*
P.	PINARD	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE
J.M.	PINON	L.I.S.I.
D.	PLAY	C.A.S.M.
J.	POUSIN	MODEL. MATH. ET CALCUL SCIEN.
P.	PREVOT	G.R.A.C.I.M.P.
R.	PROST	C.R.E.A.T.I.S.
M.	RAYNAUD	CETHIL/EQ. TRANSFERT INTERFACES MATÉRIAUX
J.M.	REYNOUARD	U.R.G.C. STRUCTURES
J.	ROBERT-BAUDOUY (Mme)	G.M.M.I.C.
D.	ROUBY	G.E.M.P.P.M.*
P.	RUBEL	L.I.S.I.
C.	RUMELHART	MÉCANIQUE DES SOLIDES
J.F.	SACADURA	CETHIL/EQ. TRANSFERTS INTERFACES MATÉRIAUX
H.	SAUTEREAU	MATÉRIAUX MACROMOLÉCULAIRES
S.	SCAVARDA	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
D.	THOMASSET	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
M.	TROCCAZ	GÉNIE ÉLECTRIQUE ET FERROÉLECTRICITÉ
R.	UNTERREINER	C.R.E.A.T.I.S.
J.	VERON	L.A.E.P.S.I.
G.	VIGIER	G.E.M.P.P.M.*
A.	VINCENT	G.E.M.P.P.M.*
P.	VUILLERMOZ	PHYSIQUE DE LA MATIÈRE

Directeurs de recherche C.N.R.S. :

A.	ANKER	CHIMIE ORGANIQUE
Y.	BERTHIER	MÉCANIQUE DES CONTACTS
N.	COTTE-PATTAT (Mme)	G.M.M.I.C.
P.	FRANCIOSI	G.E.M.P.P.M.*
M.A.	MANDRAND-BERTHELOT (Mme)	G.M.M.I.C.
M.	MURAT	G.E.M.P.P.M.*
J.F.	QUINSON	G.E.M.P.P.M.*
A.	ROCHE	MATÉRIAUX MACROMOLÉCULAIRES

Directeurs de recherche I.N.R.A. :

G.	BONNOT	BIOLOGIE APPLIQUÉE
G.	FEBVAY	BIOLOGIE APPLIQUÉE
S.	GRENIER	BIOLOGIE APPLIQUÉE

Directeurs de recherche I.N.S.E.R.M. :

A-F.	PRIGENT (Mme)	BIOLOGIE ET PHARMACOLOGIE
L.	MAGNIN (Mme)	C.R.E.A.T.I.S.

* GROUPE D'ÉTUDE MÉTALLURGIQUE PHYSIQUE ET PHYSIQUE DES MATÉRIAUX

ÉCOLES DOCTORALES
DÉCEMBRE 1996

- École Doctorale Matériaux de Lyon =
INSA - ECL - UCBL - U. Chambéry - ENS

Responsable : Pr. A. HOAREAU

Formations doctorales :

- Génie des matériaux (Pr. GUENIN)
- Sciences des matériaux (Pr. BARRAT)
- Matériaux macromoléculaires et composites (Pr. SAUTEREAU)

- École Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur de Lyon :
Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA) =

Responsable : Pr. J. BATAILLE

Formations doctorales :

- Acoustique (Pr. GUYADER)
- Génie civil : Sols, Matériaux, Structures
physique du bâtiment (Pr. LAREAL)
- Mécanique (Pr. BATAILLE)
- Thermique et Énergétique (Pr. LANCE)

- École Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur de Lyon :
Électronique, Électrotechnique, Automatique (EEA) =
INSA - ECL - UCBL - U. Chambéry - U. St Étienne

Responsable : Pr. G. GIMENEZ

Formations doctorales :

- Acoustique (Pr. GUYADER)
- Automatique industrielle (Pr. BOLON)
- Dispositifs de l'électronique intégrée (Pr. PINARD)
- Génie biologique et médical (Pr. COLLOMBEL)
- Génie Électrique (Pr. AURIOL)
- Signal, Image, Parole (Pr. LACOUME)

LISTE DES DEA ou FORMATIONS DOCTORALES

<i>FORMATIONS DOCTORALES</i>	<i>RESPONSABLES INSA</i>	<i>ADRESSES INSA</i>
Acoustique	GUYADER Jean Louis	Bât 303 Tél. 80 80
Analyse et modélisation de systèmes biologiques	NARDON Paul	Bât 406 Tél. 80 86
Automatique industrielle	SCAVARDA Serge	Bat 303 Tél. 83 41
Biochimie	LAGARDE Michel	Bât 406 Tél. 82 40
Chimie Inorganique	GONNARD Paul	Bat 504 Tél. 81 58
Conception en bâtiment et techniques urbaines	MIRAMOND Marcel	Bât 304 Tél. 85 56
DEA informatique de Lyon	KOULOUMDJIAN Jacques	Bat 501 Tél. 80 99
Dispositifs de l'électronique intégrée	PINARD Pierre	Bat 502 Tél. 82 47
Génie biologique et médical	MAGNIN Isabelle	Bât 502 Tél. 85 63
Génie civil : sols, matériaux, structures, physique du bâtiment	LAREAL Pierre	Bât 304 Tél. 82 16
Génie Électrique	CHANTE Jean-Pierre	Bât 401 Tél. 87 26
Matériaux polymères et Composites	SAUTEREAU Henri	Bât 403 Tél. 81 78
Mécanique	DALMAZ Gérard	Bât 113 Tél. 83 03
Microstructure et comportement mécanique et macroscopique des matériaux - génie des matériaux	GUENIN Gérard	Bât 502 Tél. 82 45
Productique : organisation et conduite des systèmes de production	FAVREL Joël	Bat 502 Tél. 83 63
Sciences des matériaux et des surfaces	LAUGIER André	Bat 502 Tél. 82 33
Sciences et techniques du déchet	NAVARRO Alain	Bat 404 Tél. 84 30
Signal, Image, Parole	GIMENEZ Gérard	Bât 502 Tél. 83 32
Thermique et énergétique	LALLEMAND Monique	Bât 504 Tél. 8154

Les responsables soulignés sont également responsables généraux

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement MM. Abdelkébir Abdali et Patrick Prévot pour leur aide dans la conduite de ce projet, M. Jean Delsey directeur du Laboratoire Énergie Nuisances pour m'avoir permis de mener ces travaux, MM. Robert Vidon, Christophe Pruvost et Patrick Tassel qui ont effectué les expérimentations à l'INRETS, MM. Dieter Hassel, John Hickman, Nikolas Kyriakis et les équipes techniques du TÜV-Rheinland (RFA), du Transport Research Laboratory (UK) et du Lab. de Thermodynamique Appliquée de l'Université de Thessalonique (GR) qui ont assuré le recueil d'informations à bord de véhicules dans leur pays, avec le support financier de la Commission Européenne - Directions Générales XII et XIII dans le cadre des programmes de recherche européens BRITE - EURAM et DRIVE.

Je remercie également l'ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie qui a supporté de nombreuses actions de recherche concomitantes à ces travaux.

Table des matières

SYNTHÈSE	15
INTRODUCTION	21
CHAPITRE 1 - MESURE DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS DES VÉHICULES	23
1.1 - Introduction	23
1.1.1 - Diversité des objectifs	24
1.1.2 - Diversité des procédures réglementaires	24
1.1.3 - Diversité des produits	24
1.2 - Procédures réglementaires de mesure des émissions de polluants	25
1.2.1 - Principes	26
1.2.2 - Méthode de prélèvement des gaz d'échappement	27
1.2.3 - Autres réglementations et procédures relatives aux émissions de polluants des véhicules	28
1.2.4 - Valeurs limites réglementaires	30
1.2.5 - Méthodes d'analyse des polluants	31
1.2.6 - Remarques diverses concernant les différentes procédures	31
1.3 - Méthodes de mesure à des fins non réglementaires	32
1.3.1 - Mesures sur banc d'essai	33
1.3.2 - Mesures au moyen de systèmes de mesures ou de prélèvement embarqués	33
1.3.3 - Mesures extérieures au véhicule (dans l'environnement)	34
1.3.4 - Mesure des émissions au passage d'un véhicule	35
1.3.5 - Autres sources d'information	36
1.4 - Cycles de conduite dans les différents pays	36
1.4.1 - Cycles réglementaires	37
1.4.2 - Autres cycles	41
1.4.3 - Conclusion	43
1.5 - Émissions et conditions de test	43
1.5.1 - Incidence de la vitesse moyenne	43
1.5.2 - Incidence des conditions de circulation	44
1.5.3 - Incidence des conditions thermiques	45
1.5.4 - Incidence de la chronologie	46
1.5.5 - Précision des mesures d'émission	47
1.5.6 - Utilisation des résultats	48
1.6 - Conclusions	49
CHAPITRE 2 - USAGE DES VÉHICULES : OUTILS D'INVESTIGATION	51
2.1 - Introduction	51
2.2 - Les enquêtes sur la mobilité	52
2.3 - Les enquêtes lors du "contrôle technique"	53
2.4 - L'analyse du trafic	53
2.5 - Instrumentation de véhicules	54
2.5.1 - Le champ d'investigation	54
2.5.2 - Les méthodes de recueil	56

2.6 - Paramètres mesurés	59
2.7 - Considérations sur la représentativité et la nécessité des mesures embarquées	60
2.7.1 - Comparaison avec une enquête par carnets de bord	60
2.7.2 - Discussion	61
2.8 - Conclusions	62
CHAPITRE 3 - MÉTHODES D'ÉLABORATION DE CYCLES DE CONDUITE	63
3.1 - Introduction	63
3.2 - Construction de cycles pour véhicules particuliers	63
3.2.1 - Cycles synthétiques	63
3.2.2 - Caractérisation des cycles de conduite au travers de distributions statistiques	64
3.2.3 - Construction du cycle urbain américain	65
3.2.4 - Cycle Européen proposé par Volkswagen	67
3.2.5 - Cycles anglais pour la mesure de la consommation	69
3.2.6 - Cycle - "empreinte" de la ville	70
3.2.7 - Cycle autoroutier	74
3.2.8 - Méthodologie statistique pour l'analyse des cinématiques	76
3.2.9 - Cycles urbains européens	77
3.2.10 - Méthode de construction et validation de cycles	78
3.2.11 - Cycles correspondant à une conduite contemporaine	79
3.3 - Cas particulier de cycles pour véhicules utilitaires	81
3.4 - Autres cas	83
3.5 - Caractérisation des méthodes	84
3.5.1 - Les données de base	84
3.5.2 - Les analyses et outils de simulation	84
3.5.3 - Le "produit" des analyses	86
3.6 - Conclusions	86
CHAPITRE 4 - ACQUISITION DE DONNÉES À BORD DE VÉHICULES - MÉTHODE ET OUTILS LOGICIELS	89
4.1 - Introduction	89
4.2 - Principes de base	89
4.2.1 - Observation en usages réels	90
4.2.2 - Sélection des véhicules	91
4.2.3 - Paramètres à mesurer et capteurs	93
4.2.4 - Système d'acquisition de données embarquable	97
4.3 - Outils logiciels	98
4.3.1 - Introduction	98
4.3.2 - Fichiers de données	99
4.3.3 - Lecture et interprétation des données	102
4.3.4 - Calculs et intégration	105
4.3.5 - Analyses spécifiques en vue de la construction de cycles de conduite	107
4.3.6 - Outils de terrain	113
4.4 - Conclusions	113
CHAPITRE 5 - MÉTHODE D'ANALYSE ET DE CONSTRUCTION DE CYCLES DE CONDUITE	115
5.1 - Introduction	115

5.2 - Principes et hypothèses	118
5.2.1 - Observation et modélisation	118
5.2.2 - Principes de la modélisation des conditions de circulation	120
5.2.3 - Principes de la modélisation des usages / trajets	121
5.2.4 - Principes de la construction de cycles	123
5.2.5 - Autres aspects	123
5.2.6 - Conclusions	126
5.3 - Modélisation des conditions de circulation - développements	128
5.3.1 - Introduction	128
5.3.2 - Définition d'un schéma d'analyse: variables - niveau - outils	129
5.3.3 - Analyse des conditions de circulation fondée sur les séquences cinématiques entre arrêts	146
5.3.4 - Analyse des conditions de circulation fondée sur les segments cinématiques	160
5.3.5 - Amélioration de la caractérisation des conditions cinématiques	165
5.3.6 - Conclusions	166
5.4 - Modélisation des trajets - développements méthodologiques	168
5.4.1 - Approches antérieures	168
5.4.2 - Propositions pour nos travaux	170
5.4.3 - Analyse des successions des types de segments	171
5.4.4 - Analyse du profil de vitesse	173
5.4.5 - Analyse des fréquences des types de segments	174
5.4.6 - Incidence du schéma retenu sur la typologie des trajets	178
5.4.7 - Conclusion	178
5.5 - Construction de cycles	180
5.5.1 - Approche microscopique	180
5.5.2 - Approche macroscopique	182
5.6 - Conclusions et autres aspects	184
CHAPITRE 6 - CONSTRUCTION DE CYCLES D'ESSAI REPRÉSENTATIFS	185
6.1 - Introduction	185
6.2 - Description des expérimentations	185
6.2.1 - Bilan des Expérimentations	186
6.2.2 - Préalables	187
6.2.3 - Usages des véhicules	187
6.3 - Typologie des conditions de circulation	190
6.3.1 - Analyse des correspondances et classification	190
6.3.2 - Typologie des conditions de circulation	190
6.4 - Typologie des trajets	193
6.4.1 - Analyse et classification	193
6.4.2 - Typologie des trajets en 3 classes	193
6.4.3 - Typologie des trajets en 8 classes	194
6.5 - Cycles de conduite	196
6.5.1 - Méthode et critères de construction	196
6.5.2 - Cycles	196
6.5.3 - Utilisation des cycles et pondération	199
6.6 - Autres aspects	202
6.6.1 - Conditions de démarrage à froid	202
6.6.2 - Prise en compte des caractéristiques des véhicules	202
6.6.3 - Utilisation de la boîte de vitesse	203
6.6.4 - Comparaison avec les cycles réglementaires	204
6.7 - Conclusions	205
CHAPITRE 7 - CYCLES DE CONDUITE ET ÉMISSIONS DE POLLUANTS	207

7.1 - Méthode de mesure	207
7.2 - Résultats	208
7.2.1 - Généralités	208
7.2.2 - Cycles de conduite représentatifs et émissions à chaud	208
7.2.3 - Démarrage à froid et émissions urbaines	211
7.2.4 - Émissions urbaines, cycles représentatifs et réglementaires	211
7.3 - Conclusions	212
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	213
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	215
ANNEXES	221
Annexe 1 : Bancs d'essai de véhicules et de moteurs	223
Annexe 2 : Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules légers	227
Annexe 3 : Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules lourds	232
Annexe 4 : Variables descriptives des séquences entre arrêts, segments cinématiques et trajets	233
Annexe 5 : Comparaison des méthodes de caractérisation des conditions de circulation	239
Annexe 6 : Bilan des expérimentations	241
Annexe 7 : Typologie des conditions de circulation	243
Annexe 8 : Analyse des trajets	253
Annexe 9 : Construction de cycles de conduite	263
Annexe 10 : Synthèse des caractéristiques cinématiques des cycles de conduite et règles d'utilisation	271
Annexe 11 : Mesure des émissions de polluants sur les cycles représentatifs	273

Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules

Synthèse

La responsabilité croissante des transports en terme de production de polluants atmosphériques a conduit à développer des outils et des méthodes de mesure des émissions de polluants avec deux objectifs principaux : d'une part contrôler les émissions des véhicules par rapport à des limites réglementaires, d'autre part quantifier les émissions réelles du parc automobile en circulation. Cette quantification, à l'échelle d'une région, d'une nation ou de la planète est nécessaire afin d'évaluer les risques et les enjeux réels, et l'impact potentiel de nouvelles technologies ou réglementations. Les deux objectifs - contrôle des véhicules et quantification des émissions réelles - sont souvent confondus par simplification

Les émissions des véhicules sont mesurées sur banc d'essai de véhicules ou de moteur. On constate une grande diversité des procédures réglementaires, des méthodes de mesures et des cycles d'essais. Les résultats de mesure sont souvent utilisés afin d'inventorier les quantités de polluants émis. L'influence très forte des conditions de fonctionnement des véhicules sur leurs émissions démontre l'importance capitale des conditions de test (cycle de conduite, conditions de démarrage, etc.). Celles-ci doivent refléter correctement les conditions normales d'utilisation et de fonctionnement des véhicules.

Alors qu'on dispose d'une connaissance assez large des émissions spécifiques des véhicules au travers de nombreuses campagnes de mesure sur banc d'essai, on ne dispose que de peu d'éléments sur les conditions d'usage des véhicules, pourtant indispensables tant pour la définition de conditions de test représentatives que pour utiliser les résultats de mesures. Diverses sources d'information permettent d'avoir des éclairages différents sur l'utilisation des véhicules. Ces sources sont rarement rapprochées.

Seuls des systèmes d'acquisition embarqués à bord de véhicules permettent d'enregistrer les paramètres de leur fonctionnement et en particulier les vitesses pratiquées, nécessaires à la construction de cycles de conduite. On étudie les méthodes mises en oeuvre : véhicule suiveur ou flottant, instrumentation de voitures privées, etc. et les précautions nécessaires. En raison de la complexité et du coût des expérimentations, les nombres de véhicules instrumentés sont limités. Ces faibles effectifs imposent des précautions méthodologiques.

Le recueil - quelquefois extensif - de données sur les conditions de fonctionnement de véhicules permet d'accéder à une connaissance détaillée et de prétendre à une certaine représentativité par rapport aux conditions diversifiées de leur utilisation. La nécessité de traduire cette connaissance en quelques dizaines de minutes d'un cycle d'essai impose la mise en oeuvre de méthodes de réduction ou de modélisation des données. A travers une abondante bibliographie, on

caractérise les principales méthodes d'analyse des conditions de conduite et de construction de cycles d'essais : nature des données utilisées, méthodes d'analyse et de réduction des données, paramètres considérés, moyens de validation et finalement le type de cycle développé (cycle réglementaire ou de recherche).

On définit ensuite les principes méthodologiques de constitution d'une base de données sur les conditions d'utilisation et de fonctionnement des véhicules : observation en usages réels, véhicules instrumentés utilisés normalement par leur propriétaire, constitution d'un échantillon représentatif. Les systèmes d'acquisition et capteurs doivent satisfaire des contraintes d'environnement sévères.

Selon ces principes, 80 voitures européennes privées ont été sélectionnées puis instrumentées par quatre laboratoires, dans le cadre de deux projets de recherche européens. Les véhicules ont été utilisés normalement par leur conducteur pendant une période d'un mois. Les données représentent de l'ordre de 10000 trajets et 90 000 kilomètres parcourus, au cours desquels les paramètres de fonctionnement sont connus à chaque seconde.

Ces expérimentations et les analyses ultérieures ont nécessité le développement d'outils informatiques : outils de terrain pour vérifier in situ le bon fonctionnement des systèmes, utilitaires de validation, outils de calcul et de gestion des analyses statistiques. L'instrumentation à bord de véhicules et en l'absence de contrôle du fonctionnement des matériels, contribue largement à augmenter la probabilité de dysfonctionnement des systèmes d'acquisition et des capteurs. Les outils doivent permettre de valider rapidement et de corriger des quantités de données considérables.

La méthode d'analyse et de construction de cycles à partir de ces données est fondée sur la modélisation ou typologie en classes des conditions de circulation d'une part et des trajets effectués d'autre part (figure 1). La grande continuité et diversité des conditions d'utilisation ou de fonctionnement des véhicules rend particulièrement difficile une description des observations en quelques classes nécessairement simplificatrices. Les conditions de démarrage et les capacités des véhicules (puissance, rapports de boîte de vitesse, etc.) doivent être prises en compte.

La modélisation des conditions de circulation passe par l'identification de descripteurs pertinents associés à un niveau d'analyse de la courbe de vitesse en fonction du temps. Les trajets enregistrés sont analysés par morceaux : une tranche de déplacement, décrite par la vitesse enregistrée à bord d'un véhicule, est une mesure des conditions de circulation d'un lieu. A partir des travaux antérieurs, on envisage différentes variables décrivant la courbe de vitesse, plusieurs niveaux d'analyse et les outils qui doivent permettre d'aboutir à une typologie des conditions de circulation. Des schémas d'analyse : variables - niveau - outils sont évalués sur un échantillon de trajets.

Dans la continuité des travaux antérieurs, on analyse les conditions de circulation au travers des séquences cinématiques entre arrêts successifs du véhicule. Les séquences sont décrites par des paramètres (vitesse, longueur de la séquence, etc.) et soumises à une Analyse en Composantes Principales (A.C.P.) puis une classification. Les résultats reposent d'abord sur la forte corrélation

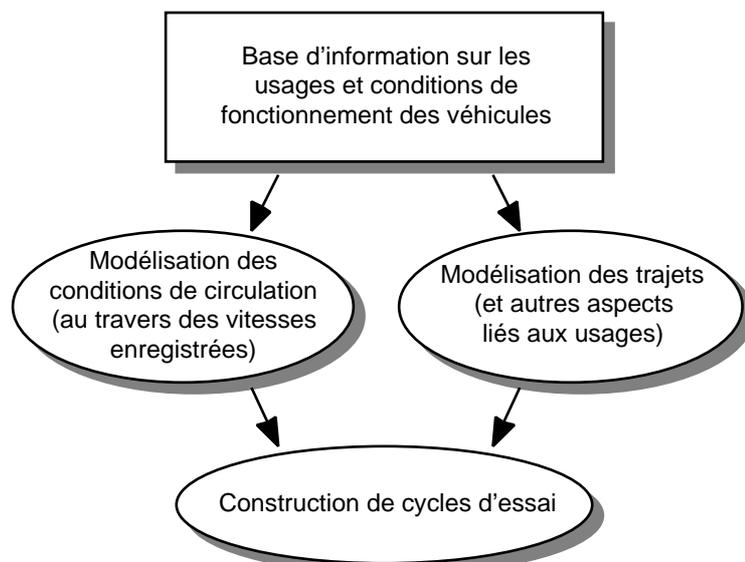


Figure 1 : Schéma de principe de la construction de cycles d'essai

entre la taille des séquences et leur niveau de vitesse et sur les distributions très dissymétriques des variables. Par la classification, on réalise une typologie fondée sur la distance. Ce schéma conduit à affecter des séquences longues à vitesse faibles à des conditions autoroutières et réciproquement. La caractérisation des conditions cinématiques n'est donc pas totalement satisfaisante.

Par ailleurs, la séquence entre arrêts, qui peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres, n'est pas une bonne mesure des conditions locales de circulation (sauf pour les séquences courtes). Enfin, la méthode repose sur une forte inégalité de représentation des différentes conditions de circulation : les conditions urbaines sont largement sur-représentées au travers d'un très grand nombre de séquences courtes (plus de 70% du nombre des séquences pour seulement 13% du kilométrage). Ceci conduit à une distorsion de la description.

Afin de pallier aux problèmes précédents liés principalement à l'hétérogénéité des séquences entre arrêts, on définit des segments cinématiques de tailles plus homogènes et dont la longueur est ajustée selon le niveau de vitesse. On obtient ainsi une description détaillée des conditions urbaines (quelques centaines de mètres) sans augmenter considérablement le nombre des segments (dont la taille atteint quelques kilomètres à haute vitesse). Une meilleure description des conditions cinématiques est envisagée par la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées. Les segments cinématiques de taille homogène décrits par cette distribution améliorent la représentation des conditions locales de circulation.

L'Analyse des Correspondances Binaires (A.C.B.) suivie d'une classification des segments cinématiques décrits par la distribution croisée des vitesses et accélérations permet une représentation correcte des différents types de circulation au niveau des analyses.

La modélisation des trajets s'appuie sur la typologie des conditions cinématiques. Une A.C.B. suivie d'une classification est appliquée aux trajets, décrits par les fréquences des différentes

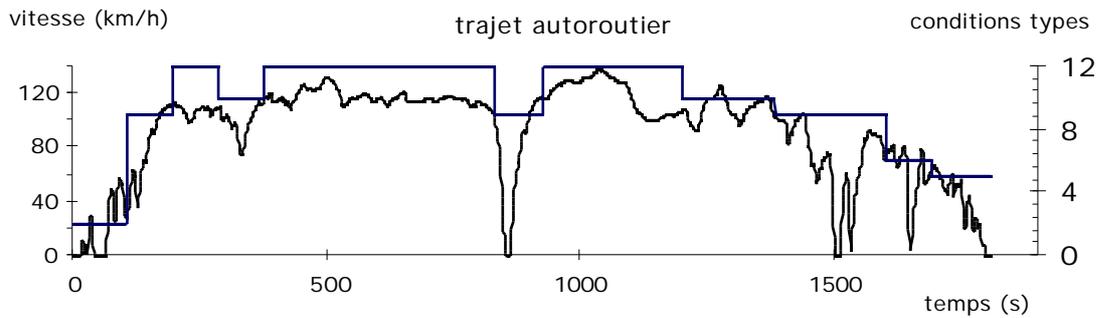


Figure 2 : Description d'un trajet selon les conditions de circulation types (graduées de 1 à 12)

conditions de circulations rencontrées décrites par les segments cinématiques (figure 2). La construction de cycles d'essai résulte de la combinaison des deux analyses précédentes : on minimise la somme des critères de représentativité des segments et des trajets (distances aux centres des classes issues des typologies) et de la chronologie de succession des différents types de conditions cinématiques au sein du trajet. La méthode permet d'envisager l'étude d'autres aspects des tests : les conditions de démarrage et la prise en compte des capacités des véhicules dans la construction des cycles.

Les méthodes ainsi définies sont appliquées aux données européennes. On établit une typologie des conditions de circulation en 12 classes par l'analyse des segments cinématiques. Cette typologie fournit une description détaillée des conditions de circulation au travers de nombreux paramètres - notamment en terme de vitesses et accélérations des véhicules -, et une connaissance de la répartition de ces conditions.

On propose 2 partitions des trajets : en 3 classes (trajets urbains, routiers et autoroutiers) puis en 8 classes qui permettent de décrire plus finement les 3 principaux types de trajets. Ces typologies apportent également une description précise des types de trajets et de leur répartition.

Pour chacune des classes de trajets, on construit un cycle de conduite représentatif. On obtient ainsi deux ensembles imbriqués de 3 et 8 cycles décrivant les conditions d'utilisation et de fonctionnement des véhicules : 3 cycles urbains, 3 cycles routiers et 2 cycles autoroutiers. Chacune des 3 classes de trajets (urbains, routiers, autoroutiers) peut donc être représentée par un cycle principal ou par un ensemble de 2 ou 3 cycles. Chacun des cycles est affecté d'un coefficient de pondération proportionnel à la fréquence de la classe correspondante de trajets.

Les cycles obtenus permettent de décliner une certaine diversité des conditions de circulation rencontrées (figure 3). Ils présentent des accélérations plus élevées que les cycles réglementaires.

Des analyses complémentaires montrent l'existence de relations entre les conditions cinématiques et les conditions thermiques d'une part, entre les conditions cinématiques et d'utilisation et les caractéristiques des véhicules d'autre part. L'incidence importante du démarrage à froid sur les émissions de polluants, mesurées sur le cycle représentatif des conditions urbaines, montre la nécessité d'approfondir le premier point. Le second point tend à remettre en cause le principe de l'utilisation de cycles communs à l'ensemble des véhicules.

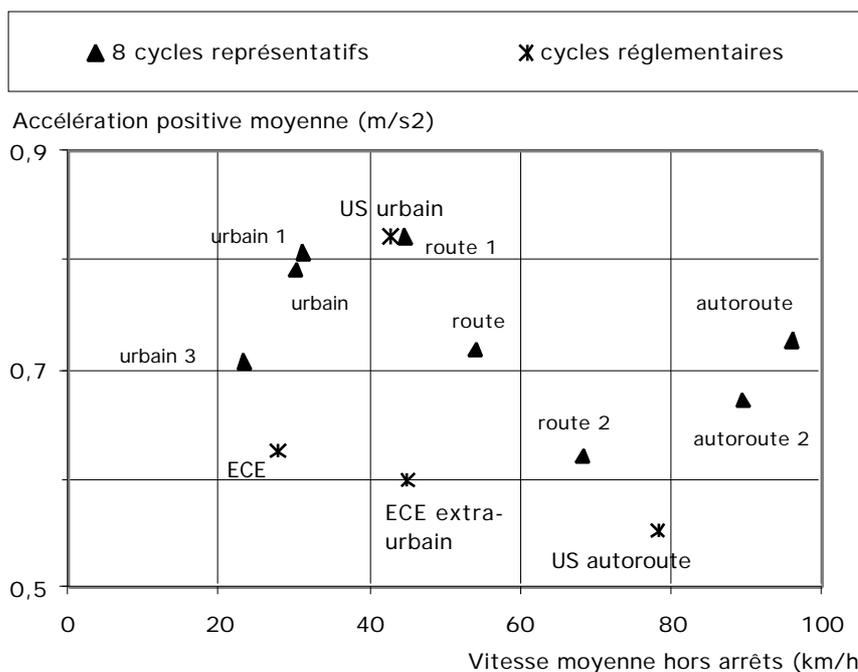


Figure 3 : Description des cycles représentatifs en vitesse et accélération positive moyennes, et position des cycles réglementaires européens et américains

Un échantillon de 30 véhicules est testé sur banc à rouleau en utilisant les nouveaux cycles représentatifs. Les premiers résultats montrent la nécessité d'une description détaillée des conditions de circulation par un nombre important de cycles, afin établir des facteurs d'émissions représentatifs. On observe en effet qu'une description limitée à trois cycles représentatifs conduit à une sous-estimation des émissions par rapport à celles mesurées sur un ensemble de huit cycles apportant une description plus fine (figure 4). Des conditions plus "sévères" ou moins "moyennes", décrites par ces cycles conduisent à des sur-émissions liées à un dysfonctionnement des catalyseurs des véhicules. Le cycle réglementaire européen (urbain et périurbain) sous-estime

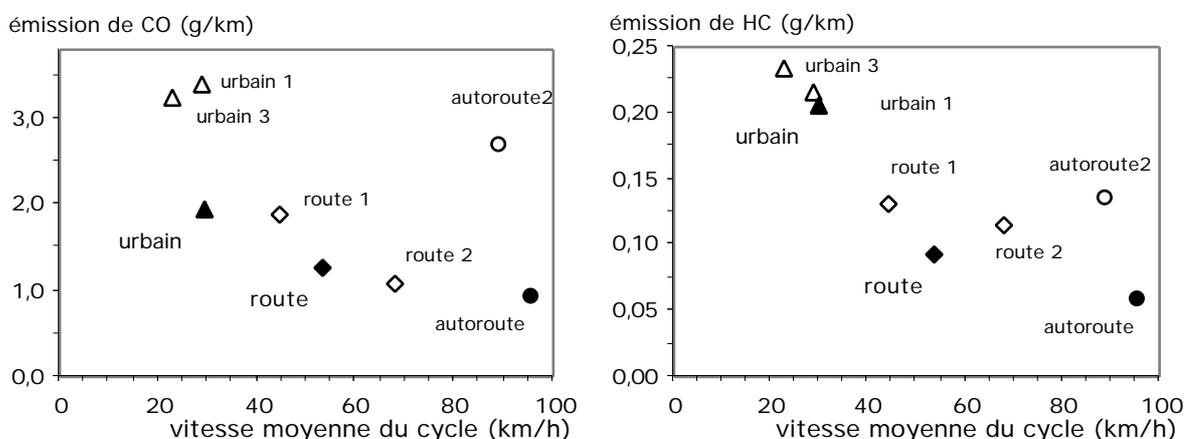


Figure 4 : Sous-estimations par les cycles principaux (*en italique*) des émissions de 15 véhicules à essence catalysés

15 véhicules à essence catalysés				
	CO g/km	HC g/km	NOx g/km	CO ₂ g/km
cycle représentatif démarré à froid	4,6	0,66	0,36	213
cycle représentatif démarré chaud	2,0	0,21	0,25	199
trois cycles urbains représentatifs	2,6	0,21	0,25	203
cycle réglementaire européen urbain et périurbain (démarré à froid)	2,0	0,30	0,26	162

Tableau 1 : Facteurs d'émissions de polluants en zone urbaine selon les cycles de conduite utilisés

15 véhicules à essence catalysés				
	CO g/km	HC g/km	NOx g/km	CO ₂ g/km
urbain (estimation sur 3 cycles)	2,6	0,21	0,25	203
route (estimation sur 3 cycles)	1,4	0,11	0,30	147
autoroute (estimation sur 2 cycles)	1,6	0,09	0,45	154
globalement (estimation sur 8 cycles)	1,8	0,13	0,33	164

Tableau 2 : Facteurs d'émissions de polluants selon les types de trajets

largement les émissions urbaines mesurées à chaud ou à froid sur le nouveau cycle urbain représentatif (tableau 1). Compte tenu de leur caractère nécessairement simplifié et au delà de leur rôle indéniable de contrôle des émissions des véhicules, les cycles réglementaires ne devraient pas être utilisés pour établir des facteurs représentatifs d'émissions.

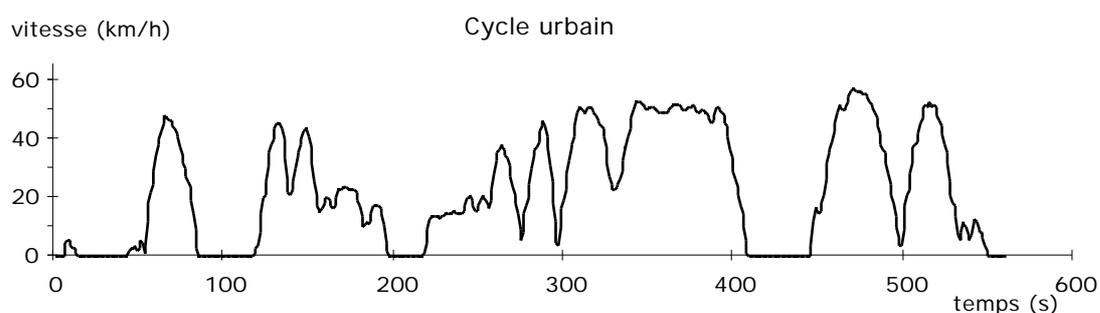


Figure 5 : Cycle urbain représentatif

Introduction

Dès 1915, on commence à se préoccuper de la pollution de l'air liée aux émanations des gaz d'échappement automobile en tant que potentiel de risque. En 1945, aux États-Unis, on reconnaît officiellement la responsabilité des véhicules dans les problèmes de *smog* rencontrés à Los Angeles. Du fait de la croissance considérable du nombre de véhicules et de leur utilisation, quand dans le même temps des mesures efficaces de dépollution étaient appliquées à l'industrie et au tertiaire, la responsabilité des transports dans la part des quantités de polluants atmosphériques n'a fait que s'alourdir au fil des années.

On admet que le transport contribue actuellement pour plus de 60% des quantités d'émissions de monoxyde de carbone produites en France, pour 50% des émissions d'hydrocarbures (composés organiques volatils et pertes par évaporation de carburant, y compris à la distribution), et est responsable de 70% des émissions d'oxydes d'azote (monoxyde et dioxyde d'azote). Les transports représentent 33% des émissions de gaz carbonique CO₂. La consommation énergétique finale des transports représente plus de 25% de la consommation énergétique totale et provient à 95% d'origine pétrolière.

Cette évolution, que l'on observe également dans la plupart des pays, a conduit à développer des outils et des méthodes permettant de mesurer les émissions de polluants, avec essentiellement comme objectif de contrôler les émissions des véhicules nouvellement fabriqués par rapport à des limites réglementaires "acceptables"; ces dernières limites tendent à s'abaisser, au fil des années et au fur et à mesure que des technologies moins polluantes sont disponibles.

Parallèlement à l'objectif de contrôle et de réglementation des émissions de polluants des véhicules, l'un des principaux soucis des pouvoirs publics est de quantifier les émissions réelles du parc des véhicules en circulation. Cette quantification des émissions de polluants à l'échelle d'une zone (urbaine), d'une région, d'une nation, ou de la planète est nécessaire afin d'évaluer de manière réaliste les enjeux, les risques liés à certains polluants, l'impact potentiel de technologies nouvelles ou de la mise en place d'une nouvelle réglementation. Dans ce but, il est nécessaire de mesurer les émissions des véhicules, ou émissions "unitaires", ou "facteurs d'émissions", qui s'expriment en fonction de la distance parcourue, dans des conditions les plus proches ou représentatives des conditions réelles de circulation.

Ces deux objectifs - contrôle des véhicules et quantification des émissions réelles - sont souvent confondus et on utilise les valeurs d'émissions "réglementaires" (les plus disponibles) ou mesurées selon les procédures réglementaires à des fins d'inventorier des émissions de polluants, même si le rapport à la réalité n'est pas toujours établi.

Il s'est avéré très tôt nécessaire de mesurer les émissions (procédures réglementaires ou non) dans des conditions "réalistes", c'est à dire qui reflètent les conditions d'utilisation et de

fonctionnement des véhicules, et de trouver éventuellement les relations qui permettraient de lier les émissions réglementaires (largement mesurées et disponibles) aux émissions réelles.

La mesure des émissions "réelles" est complexe. Les matériels de transports et les systèmes à moteurs sont extrêmement variés (de la voiture particulière au transport routier de marchandises, en passant par le transport aérien, maritime, ou les petits moteurs de service), et même si on s'intéresse à une seule famille de véhicules, - les voitures par exemple -, la diversité des types d'usages (usage personnel ou professionnel, trajet domicile - travail, loisirs, vacances), des comportements d'usages et de conduite, des situations de conduite (zone urbaine, route, autoroute, zone montagneuse, conditions climatiques, etc.) est telle qu'il est vain de prétendre définir des conditions de test, qui en quelques dizaines de minutes devront représenter ou tenir compte de l'ensemble de ces situations.

Les émissions des véhicules sont mesurées sur banc d'essai de véhicules ou de moteur. Un système de prélèvement des gaz polluants et d'analyse des concentrations de certains composants est utilisé. Les conditions de tests se définissent essentiellement par une courbe ou des points correspondants aux conditions de fonctionnement du véhicule (vitesse en fonction du temps, ou cycle de conduite), ou du moteur (vitesse de rotation du moteur et couple résistant). Les autres conditions de test concernent principalement les conditions thermiques du véhicule ou du moteur.

On décrit d'abord les procédures (réglementaires ou non) et les moyens de mesure des émissions de polluants. On s'intéresse ensuite aux conditions d'usage et de fonctionnement des véhicules qui sont la base de la définition de méthodes de mesure représentatives. On examine notamment les méthodes utilisées pour recueillir ces informations.

Le troisième chapitre est consacré aux méthodes utilisées pour le développement de cycles de conduite au travers d'une abondante bibliographie. On tente de caractériser ces méthodes et d'en dégager les spécificités.

Les principes méthodologiques d'expérimentations au moyen de systèmes d'acquisition de données installés à bord de véhicules privés sont définis au chapitre 4. On souhaite obtenir une photographie locale mais précise des conditions de fonctionnement des véhicules en Europe. On décrit ensuite les outils informatiques nécessairement développés pour la gestion et l'analyse des données enregistrées à bord des véhicules.

Le cinquième chapitre est consacré aux principes et développements méthodologiques en vue de la caractérisation des conditions de circulation au travers de la courbe de vitesse du véhicule en fonction du temps, et des usages au travers des trajets. La mise en oeuvre des méthodes et outils précédents est illustrée au sixième chapitre par la construction de 8 cycles d'essais représentatifs.

Ces cycles sont ensuite utilisés pour la mesure des émissions sur banc à rouleau d'un échantillon de 30 voitures. On analyse les résultats de ces mesures.

Chapitre 1 - Mesure des émissions de polluants des véhicules

1.1 - Introduction

Les mesures d'émissions de polluants et de consommation de carburant des véhicules s'effectuent généralement sur banc d'essai de moteur ou de véhicule, plus rarement sur route. On note également des mesures d'émissions d'un trafic sur un site donné ou dans l'environnement. L'objectif des mesures peut être très variable de même que les polluants analysés, selon qu'il s'agit de procédures réglementaires (contrôle des émissions des véhicules) ou de travaux de recherche (détermination des "facteurs d'émissions" ou émissions unitaires par unité de déplacement des véhicules ou des trafic de véhicules). La diversité des matériels de transports et de leurs technologies, mais aussi la difficulté d'harmonisation des réglementations entre les pays ont conduit à une multiplication des procédures de mesure en particulier des procédures réglementaires.

Après avoir évoqué cette diversité des contextes de mesure des émissions de polluants, on décrit les procédures réglementaires en vigueur dans différents pays : méthodes de prélèvement des polluants, cycles de conduite, conditions d'essai, valeurs limites, etc. Les méthodes de mesure à des fins non "réglementaires" s'appuient sur les matériels et principes utilisés lors des procédures réglementaires.

La mesure des émissions des véhicules implique des moyens d'essais lourds, complexes et coûteux. Un banc d'essai consiste en un local, une structure et des systèmes (de freinage) capables d'absorber les puissances développées par le véhicule testé et un système de ventilation pour évacuer la chaleur produite. Le système de prélèvement des gaz d'échappement est basé sur une dilution importante de ces gaz. Le banc à rouleau, afin de présenter des similitudes avec les conditions de contact roue - chaussée, est de grande dimension : 2 rouleaux de 500 mm de diamètre par exemple ou 1 rouleau unique de diamètre 1,25m pour les voitures, 2,50m pour les véhicules utilitaires avec des puissances de l'ordre de 500 kW.

La lourdeur et la complexité des essais en limite le nombre : limitation du nombre de véhicules testés, simplification des conditions de test (un ou quelques cycles pour représenter la diversité des conditions d'utilisation). Les cycles réglementaires sont souvent utilisés, par simplicité et parce qu'ils constituent une base de référence et de comparaison.

Les émissions de polluants des véhicules sont fortement influencées par leurs conditions de fonctionnement (vitesses, conditions de circulation, conditions thermiques). Le cycle d'essai ou cycle de conduite ou profil de vitesse et les autres conditions de test constituent un élément clé des procédures de mesure en ce qu'ils régissent ces conditions de fonctionnement et doivent - pour une expression et une exploitation pertinentes des résultats de mesure - être en cohérence avec l'utilisation réelle des véhicules.

1.1.1 - Diversité des objectifs

L'objectif de la mesure des émissions de polluants et de la consommation varie selon qu'il s'agit de procédures réglementaires de contrôle pour lesquelles on détermine si les émissions du véhicule se situent en dessous de seuils légaux, ou lorsqu'il s'agit de quantifier les polluants émis en vue d'une connaissance satisfaisante des émissions et des facteurs favorisant ces émissions.

Les champs d'investigations peuvent concerner l'étude des mécanismes de formation des polluants dans la chambre de combustion, l'évaluation des teneurs ou quantités émises à l'échappement, les émissions par évaporation de carburant ou lors d'un démarrage à froid, ou encore l'évaluation de la durabilité des dispositifs antipollution. Au delà, on étudie les teneurs ou quantités retrouvées aux abords des voies de circulation ou dans l'environnement, où elles sont susceptibles d'avoir des effets sur les populations, les teneurs ou quantités dans l'atmosphère et en particulier les mécanismes de diffusion et de transformation des polluants.

1.1.2 - Diversité des procédures réglementaires

Les émissions de polluants et la consommation de carburant font l'objet dans la plupart des pays de procédures réglementaires de contrôle ou de mesure. Ces procédures sont établies spécifiquement :

- selon les matériels de transports (voitures particulières, véhicules utilitaires légers et lourds, autobus, cyclomoteurs, voiturettes, engins de chantiers, véhicules à vocation spécifique, etc.). Elles concernent également les autres modes de transport (transports ferroviaire, aérien et maritime) et les matériels à moteur à vocation autre que de transport (moteurs de service, matériel de jardinage, etc.).
- selon les technologies de motorisation : les réglementations (ou les limites réglementaires) mais aussi les moyens de mesures peuvent être spécifiques selon que le moteur est à essence ou Diesel et selon la cylindrée du moteur. Les motorisations nouvelles (électriques, hybrides : thermique + électrique, etc.) seront certainement l'objet de réglementations particulières.
- selon les polluants.

Elles concernent les émissions produites à l'échappement mais aussi d'autres types d'émissions (évaporation de carburant, gaz de carter, émissions des matériaux, etc.). Elles s'appliquent à différents niveaux de contrôles tels que l'homologation de nouveaux modèles, le contrôle ou la réception des véhicules neufs, le contrôle des véhicules au cours de leur vie.

1.1.3 - Diversité des produits

Les polluants émis constituent une très large palette de "produits", dont seul un petit nombre est actuellement réglementé, c'est à dire contrôlé et soumis à des valeurs limites. Degobert [Degobert, 1992], propose la classification suivante des polluants primaires (émis directement par

les sources, par opposition aux polluants secondaires, produits par interaction entre polluants et autres composants) :

- les composés carbonés: gaz carbonique CO₂ et monoxyde de carbone CO ;
- les composés azotés: monoxyde et dioxyde d'azote (NO, NO₂ souvent groupés sous NO_x), acide nitrique, N₂O (protoxyde d'azote), ammoniac, acide cyanhydrique et cyanogène, nitrosamines ;
- les composés organiques: les composés organiques volatils (COV) ou hydrocarbures (groupés sous le terme générique HC), les pertes par évaporation de carburant, le benzène, les hydrocarbures aromatiques polynucléaires (HAP), les composés carboxylés, les acides organiques, les composés organiques halogénés ;
- les composés soufrés, dioxyde de soufre (SO₂), trioxyde de soufre (SO₃), acide sulfurique, sulfures ;
- les composés halogénés (acides chlorhydrique, bromhydrique, fluorhydrique),
- les composés métalliques : Plomb, métaux précieux, Cadmium, Zinc, Manganèse, etc.
- les particules, elles mêmes classées en particules fines et particules grossières,
- les odeurs.

La consommation de carburant, bien que n'étant pas un "produit" comme les émissions de polluants, est cependant mesurée de manière réglementaire car d'une part elle constitue l'un des arguments comparatifs des véhicules et de leur technologie de motorisation (essence, diesel, etc.), d'autre part on se soucie à terme de l'épuisement des ressources naturelles. Enfin, la consommation constitue un intégrateur de certains des polluants (CO, CO₂, HC). Des limites réglementaires de consommation pourraient être imposées dans un futur proche.

L'évolution des technologies, des carburants et lubrifiants et même des réglementations anti-polluantes modifient l'importance relative de ces produits "polluants", et, de fait, peut en faire disparaître certains et apparaître d'autres. Citons par exemple le cas des carburants non plombés (par l'introduction de nouveaux additifs), des carburants alcoolisés, du G.P.L. - gaz de pétrole liquéfié, des véhicules électriques, etc..

Enfin, il faut mentionner d'autres nuisances liées au transports, que sont le bruit, les vibrations, l'occupation d'espace, etc., qui sortent de ce cadre, mais pour certaines sont également l'objet de procédures de contrôle.

1.2 - Procédures réglementaires de mesure des émissions de polluants

Les essais de type réglementaire sont de loin les plus fréquents car ils concernent la vérification des véhicules à leur production ou le contrôle de véhicules anciens. En ce sens, c'est ce type d'essai qui est à l'origine du développement des matériels de mesure. Les essais non réglementaires (conduits par des laboratoires de recherche) utilisent largement les matériels précédents mais concernent des méthodes et champs d'investigation plus diversifiés (conditions de test, produits analysés).

L'objectif des essais réglementaires est de vérifier qu'un moteur, un véhicule neuf ou ancien, ou un nouveau modèle de véhicule satisfait des conditions de "non surpollution" par rapport à des niveaux admissibles. On mesure généralement les émissions de polluants lors de l'utilisation ou du fonctionnement du véhicule ou du moteur, dans des conditions de test qui doivent être proches de conditions normales d'utilisation.

Les limites admissibles varient d'un pays à l'autre, et quelquefois avec la masse du véhicule, sa technologie de motorisation. Ces limites tendent à diminuer avec le développement de technologies moins polluantes, et parce que dans le même temps, l'augmentation considérable du nombre de véhicules et de leur utilisation se traduit par une croissance des quantités de polluants émises par les transports et une dégradation de la qualité de l'air.

L'objectif "réglementaire" impose une définition précise des conditions de test et des matériels spécifiques de mesure (carburant de référence, conditions normalisées, appareils certifiés, etc.).

1.2.1 - Principes

Les mesures de consommation des véhicules et d'émissions de polluants à l'échappement utilisent sensiblement les mêmes matériels et les mêmes principes:

- le véhicule est placé sur un banc d'essai à rouleaux (cf. Annexe 1), et entraîne ces rouleaux; un dispositif de freinage oppose une résistance équivalente à la résistance à l'avancement d'un véhicule en circulation sur route plate, y compris l'inertie liée à la masse du véhicule, (il s'agit de reproduire les conditions de résistance à l'avancement rencontrées sur route);

- le conducteur ajuste la vitesse du véhicule à une courbe (un profil) de vitesse en fonction du temps, appelé cycle de conduite; ce cycle est prédéfini, conformément à la législation du pays; le cycle est relativement court (de l'ordre de 10 minutes) et assorti d'une bande de tolérance;

- les conditions de test sont définies (températures, conditionnement du véhicule, conditions de démarrage, ventilation du véhicule, etc.).

Les gaz d'échappement sont collectés durant l'exécution de cette procédure de test.

Pour les véhicules utilitaires (poids-lourds, autobus, autocars), le véhicule n'est généralement pas testé sur banc d'essai de véhicule ; seul le moteur est testé sur banc d'essai de moteurs. Le cycle d'essai est alors une succession d'états stationnaires de fonctionnement (ou modes), définis en couple et vitesse moteur, et assortis de coefficients de pondération. Ces modes et coefficients sont généralement liés à la connaissance que l'on a de l'utilisation des véhicules. Les mesures sont effectuées en chaque point, puis intégrées dans un résultat global après pondération.

Des cycles transitoires (consignes simultanées de couple et de régime moteur, sous forme de courbes non stationnaires) sont préconisés maintenant. Plus réalistes parce qu'intégrant les modes de fonctionnement transitoire du moteur, ceux-ci nécessitent un banc d'essai dynamique (l'utilisation d'une génératrice à courant continu par exemple permet de fonctionner en mode freinage ou moteur).

1.2.2 - Méthode de prélèvement des gaz d'échappement

La méthode de prélèvement et d'analyse des gaz d'échappement est à peu près commune aux différents pays (méthode CVS Constant Volume Sampling ou prélèvement à volume constant, et principes des analyseurs des polluants réglementés, cf. figure 1.1). Les gaz d'échappement sont collectés, dilués avec de l'air ambiant filtré (rapport de dilution de l'ordre de 1 / 8), de telle manière que le débit air + gaz soit constant (le débit est maintenu constant soit par l'écoulement du mélange au travers d'un venturi, dans des "conditions critiques", soit par une pompe

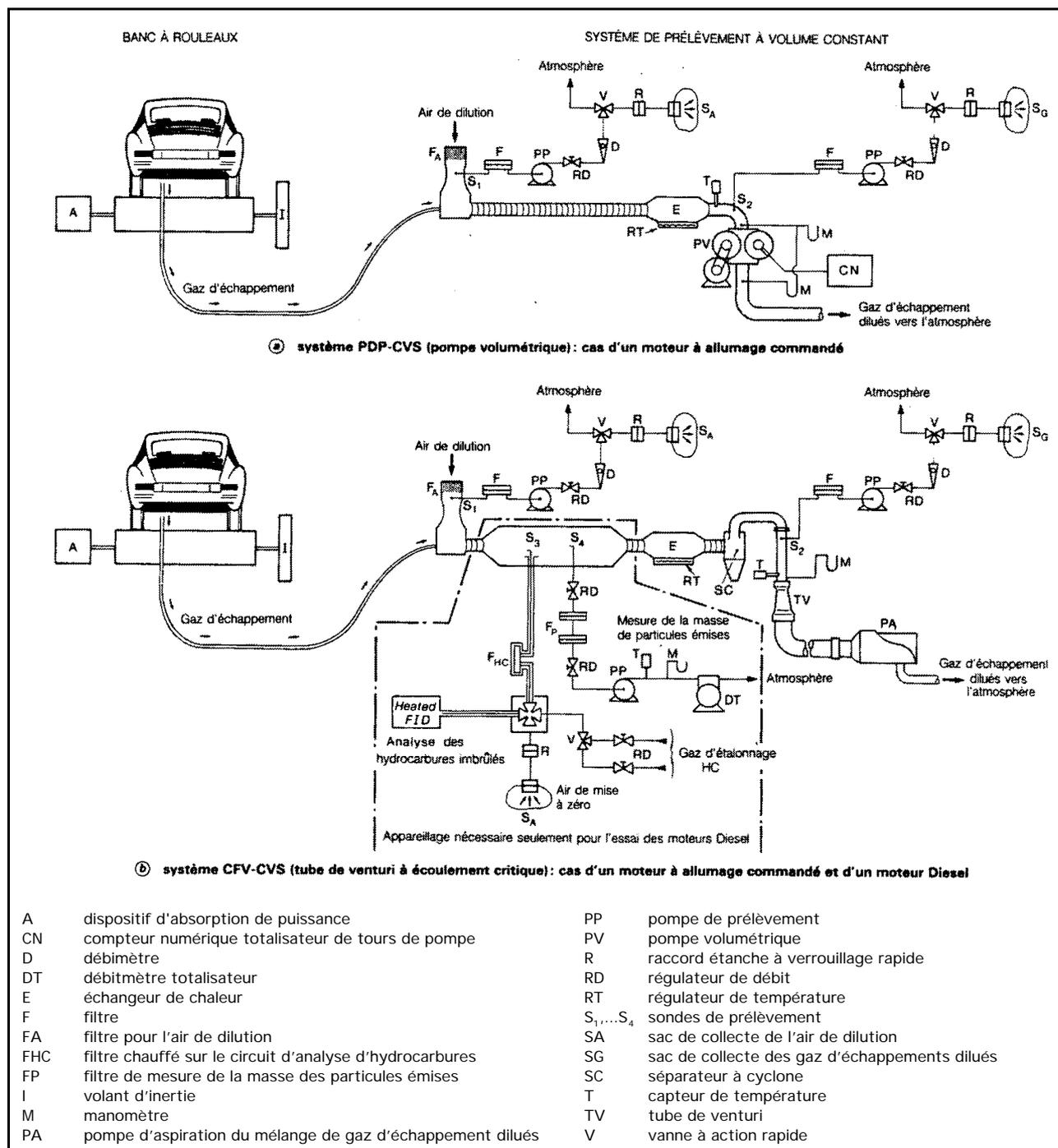


Figure 1.1 : Schéma de principe d'un système de prélèvement des émissions de polluants d'un véhicule léger (d'après [Degobert, 1992])

volumétrique).

Le mélange ainsi réalisé, des prélèvements à débits contrôlés sont dirigés vers des sacs de collecte des gaz, dans lesquels seront mesurées les teneurs des polluants en fin de test, et comparées avec celles mesurées dans des sacs remplis de l'air ayant servi à la dilution du mélange.

Les résultats de mesure (consommation, émissions de polluants) sont analysés et corrigés selon certains facteurs (température, pression, humidité), selon des procédures et des techniques préconisées par la législation. La mesure est globale, c'est à dire intégrée sur l'ensemble de la procédure ou du cycle (quantités totales émises qui peuvent être ensuite ramenées au kilomètre parcouru). On ne s'intéresse en général pas aux phénomènes instantanés.

Seul un petit nombre de polluants "réglementés" sont mesurés: il s'agit selon les pays, du monoxyde de carbone CO, des oxydes d'azote (NO_x, sans distinction NO, NO₂), des hydrocarbures totaux (HC ou COV, c'est à dire sans distinction des différents hydrocarbures), des particules (sans distinction de tailles) et des fumées (opacité des gaz d'échappement) dans le cas des moteurs diesel.

Pour les hydrocarbures HC, un prélèvement est transmis directement à un analyseur - intégrateur, via une ligne chauffée (pour éviter les condensations des HC les plus lourds dans les sacs de prélèvement).

Un "tunnel de dilution" suffisamment long permet une homogénéisation suffisante du mélange avant un prélèvement destiné à la mesure des particules des moteurs diesel. Ces particules sont piégées sur des filtres, pesés avant et après le test (quantités de l'ordre de 1/10 de gramme). Les émissions de particules sont réglementées pour les véhicules diesel.

Des lignes de prélèvements analogues peuvent être ajoutées pour capturer certains autres composants sur différents supports (solvants, supports solides tels que gels de silice, charbons actifs, polymères organiques, pièges cryogéniques, ...).

1.2.3 - Autres réglementations et procédures relatives aux émissions de polluants des véhicules

Pour les véhicules routiers, sont également réglementées:

- les émissions au ralenti (monoxyde de carbone, CO en Europe),
- les émissions par évaporation de carburant (véhicule au repos ou en fonctionnement),
- l'opacité des fumées des moteurs Diesel, (mesure par des appareils à absorption de lumière à flux total, ou par un appareil à filtre mesurant le noircissement d'un papier filtre),
- les émissions de gaz issues du carter d'huile : ces émissions doivent être nulles,
- la durabilité des dispositifs antipollution.

1.2.3.1 - Réglementations concernant la durabilité des dispositifs antipollution

La procédure et les matériels sont des mêmes types que ceux décrits précédemment. Des cycles simplifiés sont répétés jusqu'à des kilométrages totaux de 30 000 km ou 80 000 km. Des automates de conduite remplacent le conducteur pour ces tests.

1.2.3.2 - Réglementations concernant les évaporations de carburant (procédure SHED)

Les émissions ou pertes par évaporation de carburant (circuit d'alimentation des véhicules à essence) en fonctionnement et à l'arrêt, sont contrôlées par la mesure de la teneur en hydrocarbures dans une enceinte étanche et imperméable aux hydrocarbures dans laquelle se trouve le véhicule. Cette enceinte est souple pour autoriser une augmentation du volume liée à la volatilisation de carburant et aux variations de température.

La séquence d'essais de laboratoire a été définie en vue de simuler le fonctionnement d'un véhicule en zone urbaine (et les émissions par évaporation lors de l'arrêt du véhicule) au cours des mois d'été.

L'essai consiste essentiellement en 2 mesures des concentrations en hydrocarbures (analyse FID) dans l'enceinte dont la température doit être comprise entre 20 et 30°C :

- lors d'un réchauffage du réservoir (fermé) de 16 à 30°C en une heure, véhicule froid : on mesure alors l'évaporation due à la "respiration" du réservoir ou pertes "journalières",
- pendant une heure, le véhicule étant conditionné par l'exécution d'un cycle urbain et extra-urbain normalisé (procédure en projet pour l'Europe) : on mesure l'évaporation après imprégnation à chaud, ou pertes à l'arrêt à chaud.

Des réglementations concernant les émissions par évaporation de carburant sont appliquées dans de nombreux pays (États-Unis, Canada, Australie, Japon, Corée, Suisse, Autriche, pays nordiques) et en projet pour l'Europe. Les procédures diffèrent principalement par le cycle de préconditionnement (américain, européen ou japonais) et par les conditions de test : températures initiales et finales, durée du cycle de réchauffement du véhicule, etc. La définition de ces conditions de test repose sur l'observation des températures et la caractérisation des périodes d'ensoleillement des régions concernées, et sur une sévèrisation relative de ces conditions.

Le même type de procédure SHED est proposé aux États-Unis pour évaluer les pertes par évaporation de carburant lors du remplissage du réservoir.

1.2.3.3 - Réglementations concernant d'autres matériels de transport

Selon les pays, des réglementations spécifiques existent pour le contrôle des émissions de polluants des avions, des locomotives Diesel, des engins de chantier employés dans les mines (cycle LHD, chargement, camionnage, déversement, à 6 modes de fonctionnement, et coefficients de pondération), des cyclomoteurs et également des petits moteurs de service (tondeuses à gazon, matériels agricoles, de loisirs, etc.) qui sortent du cadre des matériels de transport, mais dont les technologies en sont issues le plus souvent.

La réglementation pour les moteurs "marins" est similaire à celle des moteurs diesel de véhicules lourds (cycle "Iso-Duty-Cycle" comprenant 5 modes).

Ces réglementations consistent le plus souvent en l'identification de modes spécifiques de fonctionnement du moteur et des coefficients d'utilisation associés (occurrence de ces modes). On teste ensuite les moteurs selon ces modes stationnaires et compile les résultats des mesures et coefficients correspondants.

1.2.4 - Valeurs limites réglementaires

Compte tenu de l'augmentation constante des trafics et des nombres de véhicules - et donc de l'augmentation des quantités de gaz d'échappement émises -, et de la prise de conscience croissante des problèmes environnementaux, les états revoient régulièrement à la baisse les valeurs limites réglementaires des émissions. Parallèlement, ces diminutions anticipent ou suivent les progrès technologiques réalisés au niveau des véhicules.

1.2.4.1 - États-Unis

Aux USA, par exemple, pour la procédure de contrôle des émissions de polluants des véhicules légers (cycle FTP75), les valeurs limites ont évolué comme indiqué tableau 1.1.

en g/km, en:	1960	1980	1992	actuelles
CO	52,2	9,3	2,1	2,1
HC totaux sans CH4	6,6	0,25	0,25	0,25 0,15
NOx ville	2,54	1,24	0,62	
Essence				0,25
Diesel				0,62
NOx route	-	0,76	0,76	
Essence		(1983)		0,31
Diesel				0,76

Tableau 1.1 : Évolution des valeurs limites aux États-Unis (véhicules légers à 80 000 km ou 5 ans)

L'état de Californie se différencie par des exigences plus fortes de durabilité et d'entretien des véhicules, et propose des étapes de mise en service de véhicules "propres" (à émissions très basses ou nulles, c'est à dire principalement les véhicules électriques).

Simultanément, la mesure des hydrocarbures devra différencier les hydrocarbures non méthaniques (NMHC). Parallèlement à l'introduction de carburants de substitution (essence et gazole reformulés, gaz naturel comprimé CNG, gaz de pétrole liquéfié LPG, carburants alcoolisés à 85%), des limites sur de nouveaux composants s'établissent (formaldéhyde et autres aldéhydes, différenciation des hydrocarbures organiques, benzène, etc.).

1.2.4.2 - Europe

En Europe, les limites ont également diminué depuis 1970 ; elles sont actuellement à des niveaux de l'ordre 10 à 15% des niveaux moyens mesurés avant réglementation en 1970, et de l'ordre de 20% des premiers niveaux réglementés en 1972. Pour les véhicules légers sur le cycle urbain européen, ces limites sont données en tableau 1.2.

en g/km, en:		1992	1996 (EURO96)
CO	Essence	2,72	2,2
	Diesel		1,0
HC + NOx	Essence	0,97	0,5
	Diesel		0,7
	Diesel injection directe		0,9
Particules Diesel		0,14	0,08
	Diesel injection directe		0,10

Tableau 1.2 : Évolution des valeurs limites en Europe (véhicules de moins de 2,5 tonnes et 6 places)

On notera que les valeurs limites européennes sont plus élevées que les valeurs américaines, et qu'elles sont différenciées selon les technologies. Il est cependant impossible de comparer ces valeurs, les conditions de test étant très différentes (le cycle urbain européen se caractérise par des vitesses et accélérations plus faibles que celles du cycle américain). Les véhicules sont eux-mêmes assez différents (plus petits en Europe).

1.2.5 - Méthodes d'analyse des polluants

Pour une information sur les principes d'analyse des différents polluants, on se reportera à [Degobert, 1992] et [Raynal, 1991].

1.2.6 - Remarques diverses concernant les différentes procédures

On assiste à une évolution des conditions de test (et des cycles de conduite) vers des conditions plus "réalistes" et représentatives des conditions de circulation, urbaines en particulier. De la même manière, les réglementations tendent à concerner non seulement le véhicule neuf mais aussi au cours de son utilisation.

Ainsi, les procédures américaines de contrôle des émissions à l'échappement doivent être satisfaites à 80 000 km par les véhicules particuliers et à 120 000 km par les véhicules utilitaires légers. Des "coefficients de détérioration" (de 1,0 à 1,3 fois les valeurs réglementaires selon les motorisations et les polluants par exemple) s'appliquent aux valeurs limites légales, qui peuvent même être modulées selon l'altitude.

Des contrôles des émissions des véhicules en usage sont maintenant imposés lors des "contrôles périodiques techniques". Actuellement, seules les émissions de monoxyde de carbone CO et l'opacité des fumées des véhicules diesel sont contrôlées en France.

Les poids-lourds ne sont l'objet que de réglementation avec tests sur banc moteur et non sur banc véhicule. On peut cependant penser que les réglementations évolueront vers le test du véhicule complet, plus réaliste.

Seule la réglementation japonaise prévoit la réglementation des véhicules à Gaz de Pétrole Liquéfié (G.P.L.).

Le Canada, l'Australie, la Nouvelle-Zélande mais aussi la Suisse, la Norvège, la Suède, l'Autriche ont adopté des réglementations basées sur les cycles américains.

Des mesures spéciales sont souhaitées aux Canada, États-Unis et dans les pays du nord de l'Europe pour réglementer plus sévèrement les émissions à froid. Celles-ci semblent sous-estimées par les procédures actuelles, pour lesquelles le conditionnement des véhicules se fait autour de 20°C.

1.3 - Méthodes de mesure à des fins non réglementaires

A l'opposé des procédures "réglementaires", l'objectif n'est pas de contrôler les émissions de polluants d'un véhicule par rapport à des limites légales, mais de quantifier les émissions de polluants et la consommation de carburant des véhicules en conditions normales ou représentatives d'utilisation et de fonctionnement, afin :

- d'évaluer les masses totales de polluants émises à l'échelle de la nation ou d'une ville par exemple,

- de déterminer quels sont les facteurs les plus importants de ces productions globales (composition du parc de véhicules, types d'utilisations, kilométrage, conditions climatiques, conditions de fonctionnement: vitesses, accélérations, régimes, etc.),

- de mettre au point et évaluer l'impact de solutions technologiques (nouvelles motorisations, etc.) ou réglementaires en vue de la diminution des émissions ou de la consommation.

Étant donné le coût des matériels de test et la complexité des procédures de mesure (illustrés précédemment), étant donné le nombre de paramètres exerçant une influence directe ou indirecte sur les émissions (conditions géographiques et climatiques, conditions de circulation, types de trajets, vitesses, état thermique des moteurs, âge, état et réglages du véhicule, comportement du conducteur, etc.), on cherche à mesurer les émissions dans des conditions de test suffisamment représentatives des conditions réellement rencontrées, sans prétendre à une compréhension complète de l'influence de tous ces paramètres. Peu de travaux sont effectués dans ce sens. Le plus souvent, on utilise les procédures et cycles réglementaires sans se soucier de leur représentativité, parce qu'ils existent et constituent une base de référence.

Pour la mesure des émissions des véhicules (c'est à dire à la source), deux solutions sont envisagées :

- la reproduction sur banc d'essai de "conditions représentatives" des usages et de conduite des véhicules ; ces conditions devront être proches de celles rencontrées dans la réalité, et nécessitent donc au préalable une approche des paramètres d'utilisation et de fonctionnement des véhicules;

- la mesure embarquée et l'enregistrement de la consommation ou des émissions de polluants, et de paramètres de fonctionnement (vitesse, distance parcourue, durée, régimes moteurs,...) à bord de véhicules "privés" suivis dans leurs usages normaux, ou d'un véhicule "de laboratoire" s'insérant dans le flot de la circulation, ou confiés à des conducteurs "sujets d'expérimentation".

Parallèlement, on peut évaluer directement les teneurs dans l'environnement ou dans l'atmosphère pour une approche plus globale.

1.3.1 - Mesures sur banc d'essai

L'objectif de représentativité implique de définir des conditions "représentatives" de test, c'est à dire essentiellement : la courbe de vitesse en fonction du temps à reproduire et les conditions de fonctionnement du moteur (régimes de rotation du moteur, utilisation de boîte de vitesses, conditions de démarrage, etc.). Idéalement, on devrait prendre en compte les conditions de charge du moteur (ou le couple moteur), dépendant de la charge transportée (assez peu variable pour les voitures), du profil routier (pentes), du vent. Ceci n'est possible qu'avec un banc d'essai permettant de simuler indépendamment résistance à l'avancement et vitesse du véhicule (équipé d'une génératrice à courant continu). Ceci nécessite surtout de disposer d'une connaissance suffisante de ces paramètres (leur répartition statistique) afin d'en définir les consignes.

La définition des conditions de test passe par le recueil d'information sur les conditions d'usages et de fonctionnement des véhicules (en particulier les courbes vitesse - temps, les charges et régimes de rotation du moteur, l'usage de la boîte de vitesses, les températures extérieure et du moteur) et par l'analyse de ces informations pour définir des conditions représentatives de test.

La sélection d'un échantillon de véhicules représentatifs du parc automobile permet d'obtenir une connaissance satisfaisante des émissions de ce parc, sans passer par l'étude spécifique des catégories de véhicules. On obtient une connaissance plus précise des émissions des véhicules les plus nombreux ou qui circulent le plus, sans négliger les émissions des véhicules plus rares.

On mesure sur banc à rouleaux les émissions de polluants de cet échantillon de véhicules en reproduisant les cycles préalablement définis.

Les matériels utilisés (banc d'essai, matériel de prélèvement, analyseurs de gaz) sont en général similaires à ceux préconisés pour les méthodes réglementaires (ce sont en principe les plus répandus). Les procédures de mesure sont souvent adaptées : on n'accordera pas la même importance aux conditions de référence (conditions climatiques, carburant de référence, réglages des véhicules) que lors des essais réglementaires, mais au contraire on optera souvent pour des conditions plus réalistes : utilisation des carburants du commerce, voitures testées en l'état, conditions climatiques diversifiées, etc.

On s'intéresse à d'autres polluants que ceux réglementés et la mesure en continu (au lieu d'un résultat global) permet d'accéder à une meilleure compréhension des phénomènes instantanés.

1.3.2 - Mesures au moyen de systèmes de mesures ou de prélèvement embarqués

Plusieurs systèmes ont été mis au point qui permettent de mesurer les émissions de polluants à bord des véhicules. Le "mini CVS" développé par un laboratoire anglais (Warren Spring Laboratory) est relativement similaire au système CVS de "laboratoire", mais simplifié. S'il ne permet pas d'obtenir une précision équivalente à celle obtenue sur un banc d'essai, ce système, d'utilisation facile et de coût limité, permet de mesurer directement les émissions d'un véhicule en

circulation, en s'affranchissant des étapes de construction de cycles représentatifs. Le système est embarqué à bord du véhicule et relié au tuyau d'échappement. Les gaz dilués sont collectés dans des sacs pour une analyse ultérieure des concentrations de polluants. Les travaux de [Van Ruymbeke, 1991 et 1993] montrent, qu'avec quelques précautions d'utilisation et de calibration, on obtient une bonne corrélation entre les résultats de mesure sur mini-CVS et ceux obtenus sur banc d'essai.

Parmi les avantages des systèmes embarqués, il faut mentionner la possibilité de faire conduire le véhicule par un échantillon de conducteurs, ce qui permet d'intégrer au mieux la composante "comportement de conduite" (ce qui n'est pas possible sur un banc d'essai, tant les conditions de conduite diffèrent de celles rencontrées sur route). On peut aussi utiliser le système en tout site géographique ou climatique. Moyennant certaines précautions méthodologiques, on peut ainsi étudier l'influence de facteurs particuliers tels que l'altitude, la pente de la route, la sinuosité, etc. Enfin, son utilisation est particulièrement adaptée pour des pays ne possédant pas d'équipement lourd (banc à rouleaux + système de prélèvement CVS).

L'objectif de représentativité des mesures nécessite la sélection et l'équipement de véhicule(s), la sélection d'un échantillon de conducteurs et la définition d'itinéraires représentatifs sur lesquels sont effectuées les mesures.

D'autres systèmes permettent l'analyse en continu des gaz d'échappement bruts (sans dilution). Ces systèmes nécessitent la mesure en parallèle du débit des gaz d'échappement [Lenaers, 1994 et 1997].

1.3.3 - Mesures extérieures au véhicule (dans l'environnement)

Il est possible d'évaluer les émissions des véhicules et plus largement d'un trafic par des mesures des concentrations des polluants dans l'atmosphère, à proximité d'une voie par exemple. Les analyseurs utilisent les mêmes principes que ceux des mesures à l'échappement, mais avec des gammes de mesure plus faibles (les concentrations étant plus faibles). Cette méthode doit s'accompagner de précautions sur le choix des sites et des points de mesures quant à leur représentativité concernant les conditions de circulation.

En Allemagne, Leisen [Leisen, 1993] mesure les concentrations de NO_x de chaque côté d'une autoroute à grand débit et pour laquelle le vent est essentiellement transversal. Le flux des polluants est donc quasiment perpendiculaire à la voie (figure 1.2). La connaissance du profil du vent et des concentrations de chaque côté, et à différentes hauteurs (1, 3, 5.5, 10, 17, et 26.5 mètres) permet - moyennant certaines hypothèses - d'établir un "bilan" des émissions produites en fonction du trafic, et, plus finement en fonction de sa composition. Des expériences similaires ont été conduites aux USA.

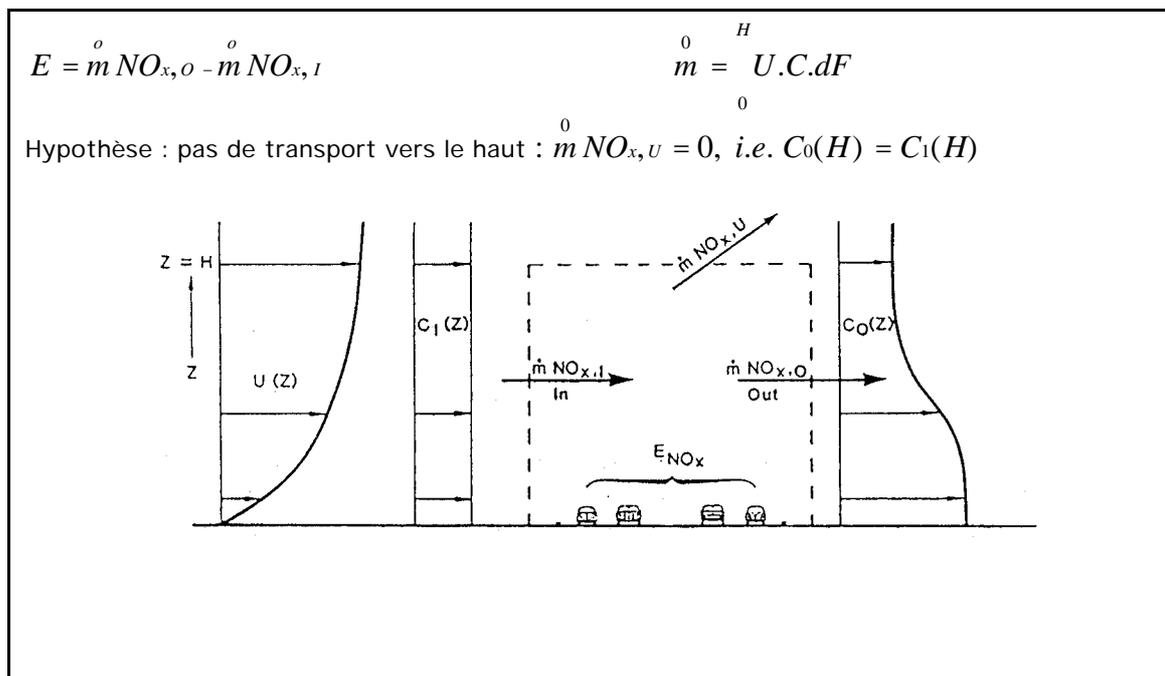


Figure 1.2 : Diagramme du bilan des émissions d'oxydes d'azote NO_x de part et d'autre d'une autoroute

D'autres travaux se sont appuyés sur la mesure des quantités de polluants émises par un trafic au passage d'un tunnel routier. Pierson établit un bilan de production des émissions des véhicules à partir des concentrations de polluants mesurées à l'entrée et à la sortie d'un tunnel routier. Le volume de gaz produits dans le tunnel est déterminé par la mesure de l'évolution de la concentration d'un gaz traceur injecté en concentration connue à l'entrée [Pierson, 1990]. La connaissance du trafic (suivi par caméra vidéo) en composition et débit - vitesse permet d'établir le lien entre émission du trafic et émissions des véhicules. Des travaux similaires sont menés sous un tunnel urbain en Allemagne par [Wacker, 1997], ou encore en Suède [Sjödin, 1997].

1.3.4 - Mesure des émissions au passage d'un véhicule

Des techniques de "bord de route" sont actuellement en cours de développement dont l'objectif principal est de mesurer les concentrations de polluants (CO , CO_2) dans le panache de gaz d'échappement du véhicule lors de son passage. Ce système s'appuie sur la mesure de l'absorption par les gaz polluants d'un rayonnement infrarouge. Un émetteur est situé d'un côté de la chaussée, le récepteur de l'autre, à hauteur des pots d'échappement.

Ce système n'est pas envisageable pour la quantification des émissions : on ne mesure que des concentrations, sans connaissance de débit des gaz d'échappement, et d'autre part, la mesure est fortement liée aux conditions du lieu de mesure (pente, voirie), et aux conditions de fonctionnement du véhicule au moment du passage (en accélération, décélération, débrayé ou en reprise, etc.).

Par contre ce système pourrait permettre avec une certaine fiabilité de repérer les véhicules sur-polluants, de les identifier (numéro d'immatriculation) afin ensuite de leur imposer une vérification en centre technique et éventuellement une remise en état. Ce principe d'identification

préalable des gros pollueurs aurait l'avantage de limiter le contrôle technique à ces véhicules plutôt qu'imposer une vérification systématique périodique coûteuse.

1.3.5 - Autres sources d'information

D'autres sources d'informations peuvent être également utilisées lors d'estimations des émissions de polluants ou à des fins de validation de mesures expérimentales :

- les consommations globales de carburant : "à la pompe", à l'échelle régionale, nationale ou internationale peuvent permettre de valider des modèles d'inventaire (i.e. quantification) des émissions de polluants,
- les enquêtes auprès des conducteurs sur leurs déplacements et la consommation de leur véhicule, les enquêtes par carnet de bord avec relevés de plein à plein des consommations de carburant, etc. constituent certainement un moyen de confronter usages et consommations,
- les consommations et émissions des polluants conventionnelles à l'homologation des véhicules (sources ADEME, etc.) constituent une base de suivi de l'évolution des consommation de référence des véhicules (malgré la représentativité faible de ces références),
- les teneurs des polluants mesurées dans l'atmosphère (réseaux de surveillance des agglomérations) doivent permettre d'apprécier les situations locales et de déclencher des procédures d'urgences de restriction de la circulation, etc. Ces réseaux de surveillance doivent également permettre d'évaluer l'impact des mesures prises.

1.4 - Cycles de conduite dans les différents pays

Le cycle de conduite est une courbe "consigne" de vitesse en fonction du temps, qui doit être reproduite par le conducteur du véhicule lors de l'essai. Pratiquement, la courbe vitesse - temps s'affiche sur un écran situé devant le conducteur, un spot indique la vitesse réelle du véhicule, le conducteur ajuste le spot sur la courbe. C'est le cycle qui détermine les conditions de fonctionnement du véhicule (accélération, freinages, changements des rapports de boîte, etc.). Son rôle est donc capital par rapport aux résultats des mesures d'émissions de polluants effectuées en sortie du pot d'échappement du véhicule.

Il existe un très grand nombre de cycles associés aux réglementations des différents pays, et hélas pas de consensus pour homogénéiser les procédures, ni de corrélation satisfaisante qui permettrait de comparer les résultats. La plupart du temps, l'élaboration de ces cycles repose sur des données de fonctionnement des véhicules en circulation réelle et prétend à une certaine représentativité par rapport aux conditions de circulation rencontrées dans le pays. Différentes phases d'un cycle peuvent être assorties de coefficients de pondération (démarrage à froid, etc.).

1.4.1 - Cycles réglementaires

Les principaux cycles réglementaires américains, européens et japonais sont décrits en [Raynal, 1991]. On en donne ci-après les principales caractéristiques et quelques évolutions récentes.

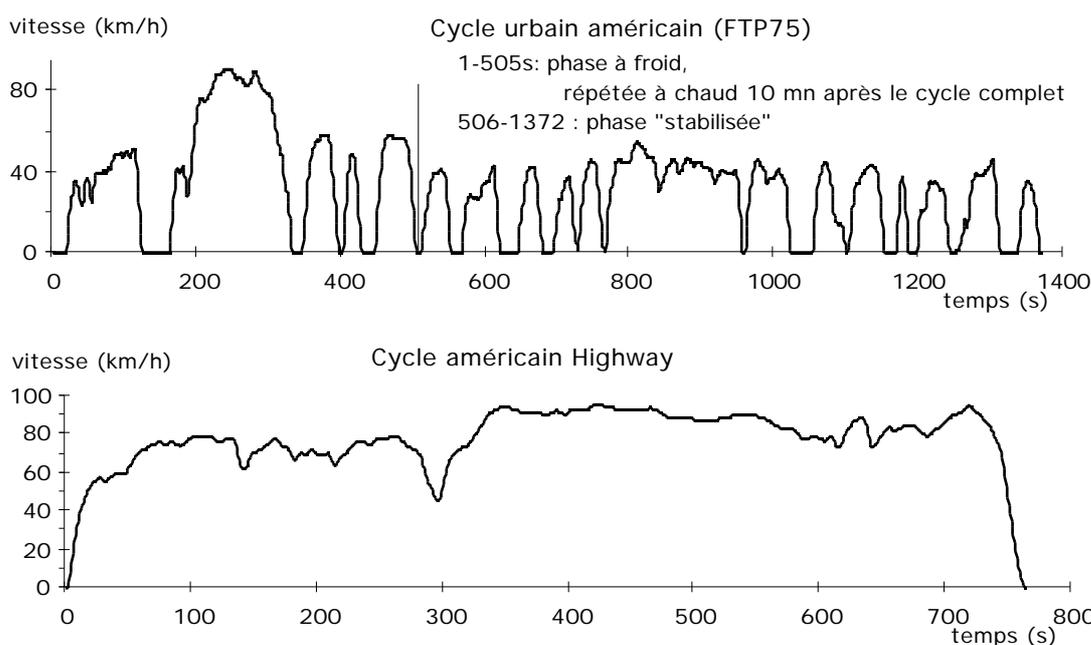
1.4.1.1 - Véhicules légers

Réglementation américaine

Cycle FTP75 (Federal Test Procédure, ou UDDS Urban Dynamometer Driving Schedule): c'est le cycle actuellement utilisé pour contrôler les émissions des véhicules légers. Il simule un parcours urbain de 17,9 km et 31 minutes de route. La vitesse atteint 91 km/h, la vitesse moyenne est de 34 km/h. Les périodes à l'arrêt (au ralenti) représentent de l'ordre de 20% de la durée totale. Ce cycle, construit sur la base d'un itinéraire étudié à Los Angeles (en 1972) se compose de 3 phases :

- phase 1: elle s'effectue avec démarrage moteur froid, après repos du véhicule une nuit entière à 20°C (cette phase complète la procédure antérieure intitulée FTP72) ;
- phase 2 : elle s'enchaîne à la première après 10 mn. de repos;
- phase 3 : c'est la répétition de la phase 1, et elle s'effectue 10 mn après la phase 2, donc moteur chaud (cf. figure 1.3).

Trois prélèvements des gaz d'échappement et 3 mesures globales sont effectués (par phase). Chacune des mesures est assortie de coefficients de pondération (respectivement : 0,43, 1, 0,57), déterminés pour rendre compte d'une moyenne de 4,7 démarrages par jour pour un véhicule aux États-Unis [Raynal]. Les conditions de passage des rapports de boîte de vitesse ne sont pas déterminées par la procédure et sont laissées pour chaque modèle à l'initiative de son constructeur.



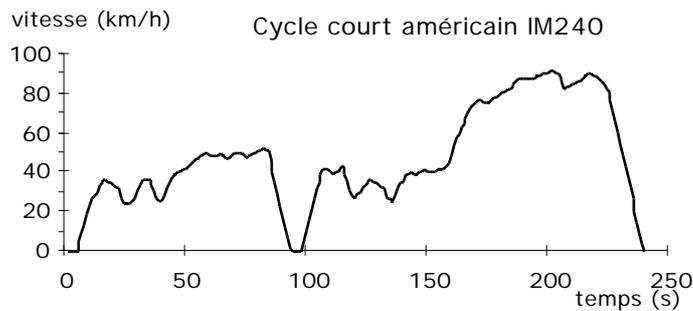


Figure 1.4 : Cycle américain court IM240 (véhicules légers, sur banc à rouleaux, lors du contrôle technique)

Cette procédure est actuellement l'objet de révisions, en vue d'intégrer des conditions de fonctionnement des véhicules mal décrites par le cycle FTP75 : accélérations fortes, vitesses élevées ainsi que pour mieux cadrer avec les conditions d'utilisation des véhicules : conditions de conduite lors du démarrage, longueurs des trajets et périodes de repos entre trajets [Enns, 1993], [EPA, 1993].

La réglementation australienne est basée sur une adaptation du cycle américain, assorti de coefficients de pondération spécifiques au pays.

Cycle "Highway" (Highway Fuel Economy Test, ou HFET) : il s'agit d'un parcours interurbain de 16,4 km (vitesse moyenne : 77 km/h, maximale: 96,4 km/h, cf. figure 1.3), parcouru 2 fois, la mesure étant effectuée sur la deuxième fois. Il a été construit initialement pour la mesure de la consommation.

Cycle court IM240 : c'est un cycle transitoire, de durée limitée (240 secondes) qui doit être utilisé lors des programmes de vérification des véhicules en service (programmes Inspection / Maintenance, figure 1.4).

Réglementations européenne et japonaise

Les cycles d'essai se caractérisent par leur profil "simplifié", c'est à dire en segments de droite, limitant de ce fait la description des transitoires.

Cycles Europe ECE15 et EUDC: le cycle ECE15 (figure 1.5) avec son extension périurbaine est actuellement en vigueur en Europe. Il s'est également imposé dans certains pays en voie de développement. Le cycle se compose de 4 km en conditions de circulation urbaine (18,7 km/h) et de 7 km en périurbain (62,6 km/h). Le cycle urbain a été construit à partir de mesures de cinématiques de véhicules circulant à Paris (en 1962). Les rapports de boîte de vitesse sont imposés aux paliers de vitesse. Les émissions ne sont prises en compte qu'après 40 secondes de fonctionnement du moteur au ralenti, mais cette phase initiale devrait prochainement être intégrée à la mesure.

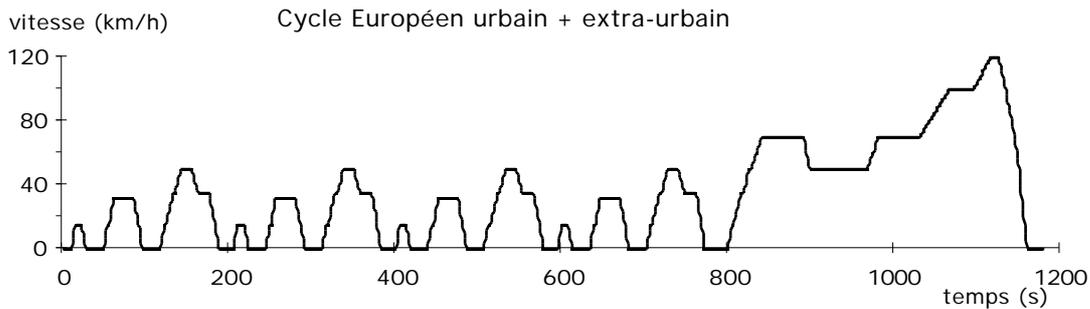


Figure 1.5 : Cycle Européen ECE urbain et périurbain (véhicules légers, sur banc à rouleaux)

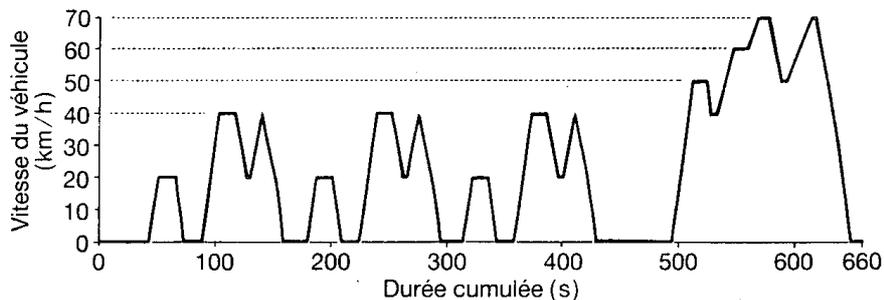


Figure 1.6 : Cycle japonais 10-15 modes (véhicules légers, sur banc à rouleaux)

Cycles japonais

Le cycle urbain 10-15 modes (figure 1.6) consiste en 3 phases de 0,664 km à 17,7 km/h suivies d'une phase périurbaine atteignant 70 km/h (soit au total 4,16 km, 22,7 km/h, 31% au ralenti). Le cycle autoroute urbaine 11 modes consiste en un parcours de 1 kilomètre à 30,6 km/h.

- Véhicules lourds:

Réglementation américaine

Pour les véhicules utilitaires lourds (camions, autobus et autocars) ainsi que pour de nombreux engins non routiers, des cycles d'essai de moteur ont été développés.

Cycles 9 et 13 modes: il s'agit de cycles d'essai de moteur respectivement à essence et diesel (et non de véhicule), constitués de 9 et 13 modes de fonctionnement stabilisé, définis en régime (% du régime de couple maximal) et charge (% de la charge maximale) et assortis de coefficients de pondération. Les résultats globaux sont rapportés à la puissance développée par le moteur. Ces cycles ont été abandonnés au profit d'un cycle en fonctionnement transitoire.

Cycle "transient": Ce cycle d'essai de moteur, dit "transitoire" par opposition aux modes de fonctionnement stabilisé précédents décrit 4 phases de conditions de circulation (figure 1.7) :

- trafic urbain peu chargé avec nombreux arrêts - démarrages,
- trafic urbain dense avec peu d'arrêts,
- trafic autoroutier chargé,
- répétition de la phase 1.

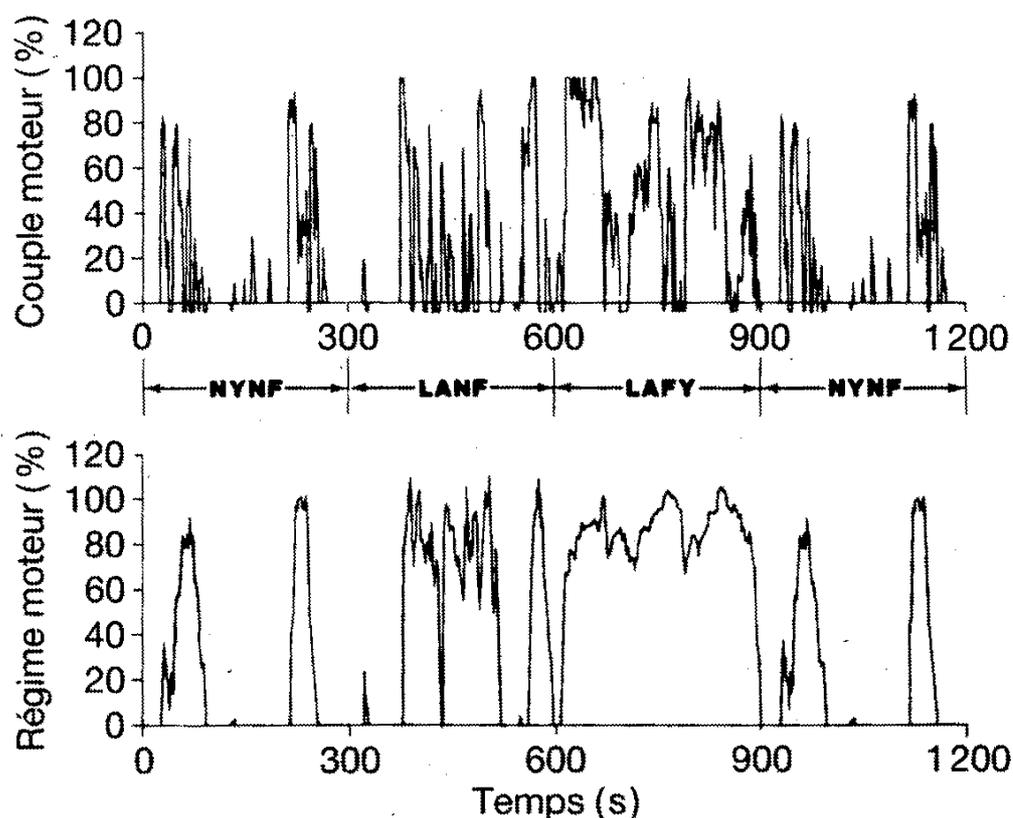


Figure 1.7 : Cycle américain "transient" (véhicules utilitaires, sur banc moteur)

Ces phases ont été toutes établies sur des conditions de circulation enregistrées à Los Angeles. Le cycle est effectué 2 fois, à froid et à chaud. Il est défini par 2 courbes simultanées de régime moteur (en % du régime nominal), et de couple (en % du couple maximal). La vitesse moyenne équivalente est de 30 km/h, distance 10,3 km/h, durée 20 min.

Réglémentations européenne et japonaise

Un cycle 13 modes (comparable au 13 modes américain) est utilisé en Europe, avec des taux de régime, de charge et des coefficients de pondération spécifiques (tableau 1.3).

Modes	Régime	Taux de charge (%)	Facteur de pondération
1	Ralenti	-	0,083
2	Régime de puissance maximale	10	0,08
3		25	0,08
4	"	50	0,08
5	"	75	0,08
6	"	100	0,25
7	Ralenti	-	0,083
8	Régime de puissance maximale	100	0,10
9		75	0,02
10	"	50	0,02
11	"	25	0,02
12	"	10	0,02
13	Ralenti	-	0,083

Tableau 1.3 : Définition des 13 modes du cycle européen de contrôle des moteurs diesel de véhicules utilitaires (règlement européen ECE N° 49)

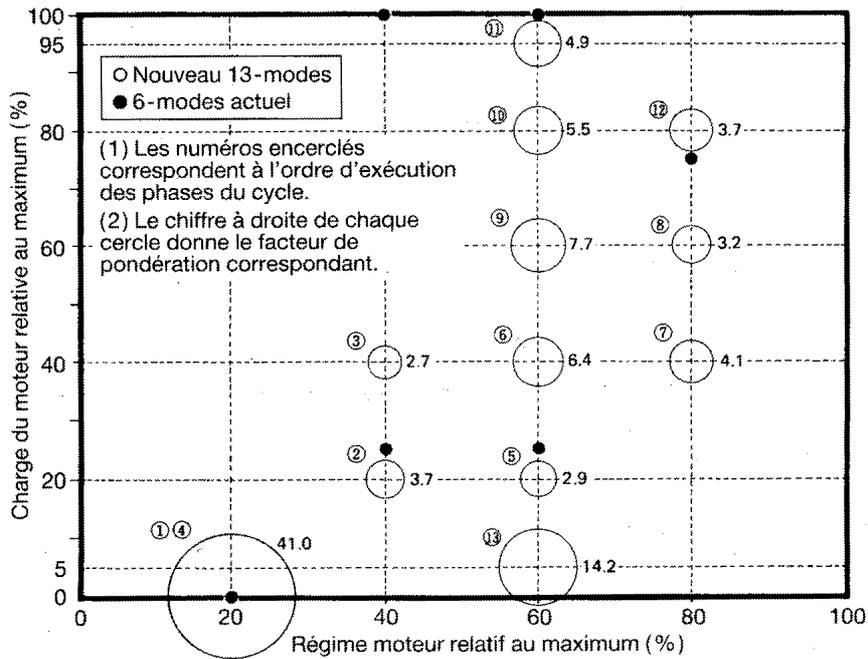


Figure 1.8 : Cycle japonais Diesel 13 modes (véhicule utilitaire, sur banc moteur)

1.4.2 - Autres cycles

De nombreux autres cycles ont été développés, quelquefois dans un but réglementaire, mais le plus souvent dans le but de décrire précisément les conditions de fonctionnement afin de constituer des facteurs d'émissions réalistes.

Dans le cas des véhicules utilitaires, des cycles d'essai de véhicules ont également été proposés.

On trouvera en annexes 2 et 3 une synthèse des cycles de conduite pour véhicules légers et lourds recensés, leurs principales caractéristiques lorsque celles-ci ont pu être renseignées et les sources bibliographiques correspondantes.

1.4.2.1 - Véhicules légers

Parmi les cycles développés aux États-Unis, on trouve :

- les cycles CUE (autoroute urbaine congestionnée), LSC (basses vitesses) et NYCC (New-York City, 1,8 km, 11,4 km/h, figure 1.9), développés pour évaluer des situations particulières et leur incidence sur certains polluants,
- une série de cycles congestionnés et routiers proposés par [Chou, 1996],
- une série de 7 cycles "freeway" (autoroutiers) et 3 cycles "Artères urbaines" proposés par [Effa, 1993],
- un cycle SCC12 (pour correction des émissions à vitesse environ 20 km/h - 12 miles/h),
- un cycle UC ou LA92 (unified cycle, tentative de prise en compte des modifications proposées par l'E.P.A. et les laboratoires californiens),

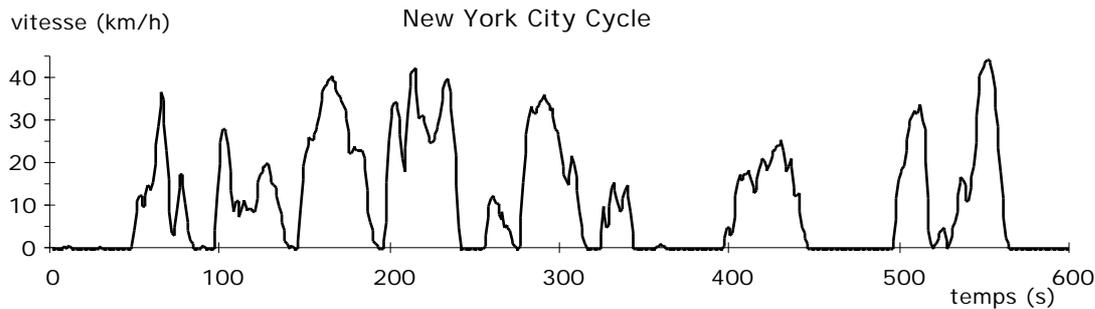


Figure 1.9 : Cycle congestionné américain (New York City Cycle, NYCC)

- 3 cycles proposés pour compenser les insuffisances du cycle FTP75 : "Start cycle" représente les conditions durant les 4 premières minutes après un démarrage, "non-FTP cycle" ou cycle à vitesses / accélérations élevées (vitesses et accélérations non incluses dans le cycle FTP) et "Remnant cycle" qui représente le complément des conditions précédentes [Enns, 1993] et [German, 1995].

De nombreux travaux ont été menés également en Australie :

- Melbourne Peak Cycle: cycle "heures de pointe" à Melbourne [Watson, 1985] et Melbourne Cold Cycle : pour prise en compte du démarrage à froid [Lansell, 1983]
- Sydney Cycle : cycle représentatif de la circulation à Sydney [Kent, 1978]
- un ensemble de cycles pour la ville de Perth [Newman, 1992].

Des cycles ont été proposés pour la ville de Tokyo [Yoshizumi, 1980], et pour l'Inde [Gandhi, 1983].

En Europe, de nombreux travaux sont à noter : 14 cycles français [Joumard, 1990], 14 cycles urbains européens [André, 1991b et 1995a], des cycles représentatifs de la circulation congestionnée à Naples, Italie [Ragione, 1994], 4 cycles représentant la ville de Thessalonique en Grèce, [Kyriakis, 1992], 4 cycles urbains, routier et autoroutier représentatifs de la circulation en Europe et un cycle court (contrôle technique) [Samaras, 1997], un cycle court dérivé du cycle urbain européen [Samaras, 1997], etc.

On trouve également référence d'autres cycles tels que les cycles UBA (autoroutier, allemand) ou "urbain berlinois" (8,8 km, 26 km/h).

1.4.2.2 - Véhicules lourds

Un cycle 8 modes a été développé pour simuler le cycle "transient", c'est à dire pour prédire, à partir de tests basés sur 8 modes stabilisés, les résultats du cycle transitoire [Degobert, 1992].

A part les cycles d'essai de moteurs (les plus utilisés), on trouve également des cycles d'essai de véhicules :

- cycle HDTC (Heavy Duty Chassis Transient Cycle) : cycle basé sur des données de circulation de camion en centre urbain (ces mêmes données ont servi à la construction du cycle

réglementaire d'essai des moteurs). Ce cycle est répété deux fois, la première avec démarrage à froid, et suivie d'une période d'interruption de 20 minutes [Beta, 1994].

- cycle ADB (Advanced Design Bus Transient Cycle): il s'agit d'un cycle de conduite transitoire pour autobus, avec 3 phases: centre ville, grandes artères, "commuter" ou voies rapides, 48 minutes, 22,5 km [Degobert, 1992].

- cycle "autobus allemand" (11 km, 23 km/h),

- et des travaux sur les cycles pour bus urbains [Van de Weijer, 1993 et Mäkelä, 1996].

1.4.3 - Conclusion

La liste précédente n'est sûrement pas exhaustive. De très nombreux cycles ont été construits et proposés pour décrire des conditions diverses de fonctionnement de différents types de véhicules. Il semble qu'il n'y ait pas ou peu de liens entre les différents travaux ni de tentative de rapprochement ou d'harmonisation. Il est probable que la plupart des cycles précédents n'ont eu d'autre suite que leur utilisation dans le cadre d'un programme de mesures d'émissions de polluants.

On s'intéressera au chapitre 3 à la construction de ces cycles tant au niveau de la base de données utilisée qu'au niveau des méthodes mises en oeuvre.

1.5 - Émissions et conditions de test

L'incidence des conditions de fonctionnement sur les émissions de polluants à l'échappement est considérable. C'est sans doute ce qui justifie les nombreux travaux sur les cycles d'essai, qui tentent de décrire au mieux ces conditions.

Pour les véhicules légers, [Eggleston, 1991] montre le rôle que peuvent jouer les paramètres vitesses et accélérations pratiquées, régimes moteur utilisés, et l'état thermique du moteur. Pour les véhicules utilitaires, les émissions sont fortement sensibles à la charge transportée, à la pente de la route, etc.

L'impact de la vitesse, des conditions de circulation et des conditions thermiques est illustré à partir de différents travaux. Au delà de ces résultats, c'est l'importance de la définition correcte des conditions de test pour les essais sur banc à rouleau ou moteur qui est soulignée.

1.5.1 - Incidence de la vitesse moyenne

Pour les véhicules légers et selon [Eggleston, 1991], dont les travaux sont la synthèse de nombreuses campagnes européennes de mesures des émissions de polluants, le rôle de la vitesse moyenne de circulation est considérable : les émissions de polluants sont des fonctions généralement décroissantes de la vitesse moyenne du test (pour les polluants CO, CO₂ et HC),

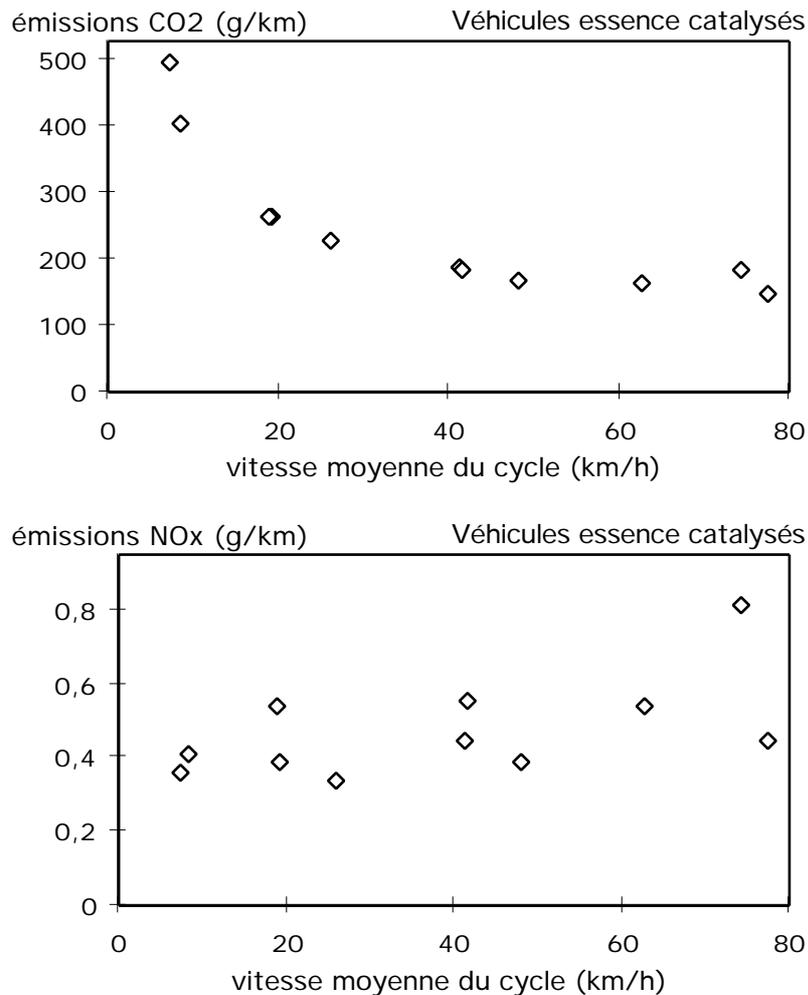


Figure 1.10 : Incidence de la vitesse moyenne du cycle sur les émissions de polluants (les points correspondent à la moyenne des valeurs mesurées sur 10 véhicules à essence catalysés, moteur chaud et sur un ensemble de cycles de vitesses moyennes différentes en [Joumard, 1995])

mais parfois croissantes (NO_x des voitures essence), et sur les plages habituelles de vitesse, les émissions unitaires peuvent varier dans un rapport de 1 à 5.

Des mesures effectuées par [Joumard, 1995], (cf. figure 1.10) sur 10 véhicules à essence équipés de catalyseur, testés moteur chaud sur un ensemble de cycles différents (incluant des cycles réglementaires), confirment ces conclusions. On notera une plus grande dispersion observée pour les émissions d'oxydes d'azote, liée à la nature du cycle.

1.5.2 - Incidence des conditions de circulation

Au delà de l'incidence de la seule vitesse moyenne - paramètre très synthétique -, les conditions de circulation ont un impact certain sur les émissions de polluants. Toujours selon [Eggleston, 1991], le taux d'accélération pourrait causer un doublement des émissions, principalement pour les véhicules à essence.

A partir de mesures d'émissions sur une large série de cycles de conduite, [Watson, 1995] propose l'expression de l'énergie cinétique en accélération positive par unité de distance comme

Émissions d'oxydes d'azote NOx - Véhicules à essence catalysés

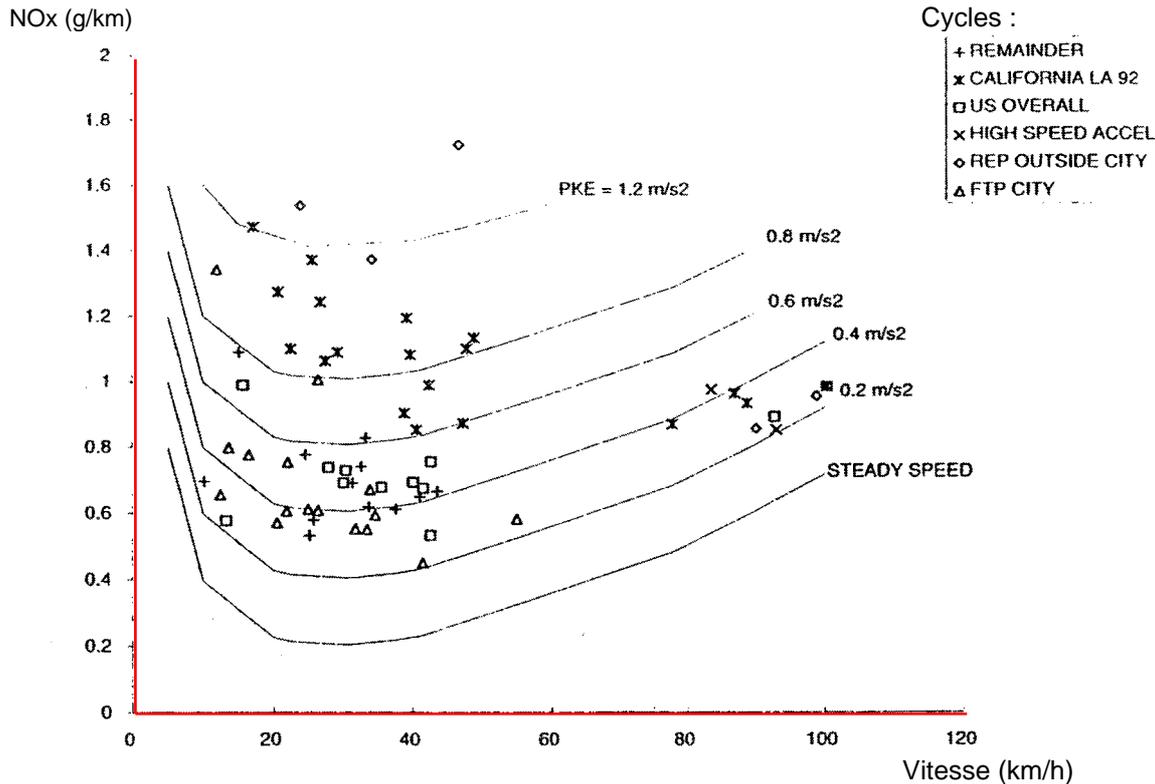


Figure 1.11 : Incidence de la vitesse moyenne et de l'énergie cinétique en accélération positive du cycle sur les émissions de oxydes d'azote (valeurs moyennes d'un échantillon de véhicules à essence catalysés mesurées sur les micro-trajets de 5 cycles de caractéristiques cinématiques différentes en [Watson, 1995])

paramètre explicatif de l'incidence des conditions de circulation. Les valeurs d'émissions moyennées sur un échantillon de véhicules et mesurées sur les "micro-trajets" (les séquences entre arrêts successifs des 5 cycles considérés), présentent une dispersion considérable pour un même niveau de vitesse, et ceci quelque soit le polluant considéré (figure 1.11).

[Hansen, 1995] propose l'écart-type des vitesses instantanées au cours d'un mouvement du véhicule (partie d'un trajet), comme paramètre descriptif des fluctuations de vitesse et explicatif des émissions de polluants.

1.5.3 - Incidence des conditions thermiques

Les conditions thermiques de fonctionnement ont également un rôle considérable sur les émissions. Là encore leur incidence dépend des polluants et des technologies. Ainsi, après un démarrage moteur froid, on a surémission pour la plupart des polluants et des technologies, mais on peut avoir sous-émission dans le cas des oxydes d'azote des véhicules à essence non catalysés. Des tests répétitifs sur un cycle court ont permis d'illustrer l'évolution des émissions après un démarrage moteur froid, indépendamment des conditions cinématiques de ce cycle (figure 1.12 d'après [Joumard, 1995]). On évalue la distance de stabilisation des émissions sur ces tests à environ 6 km (cette valeur variant selon les types de motorisation et les polluants), ce qui est

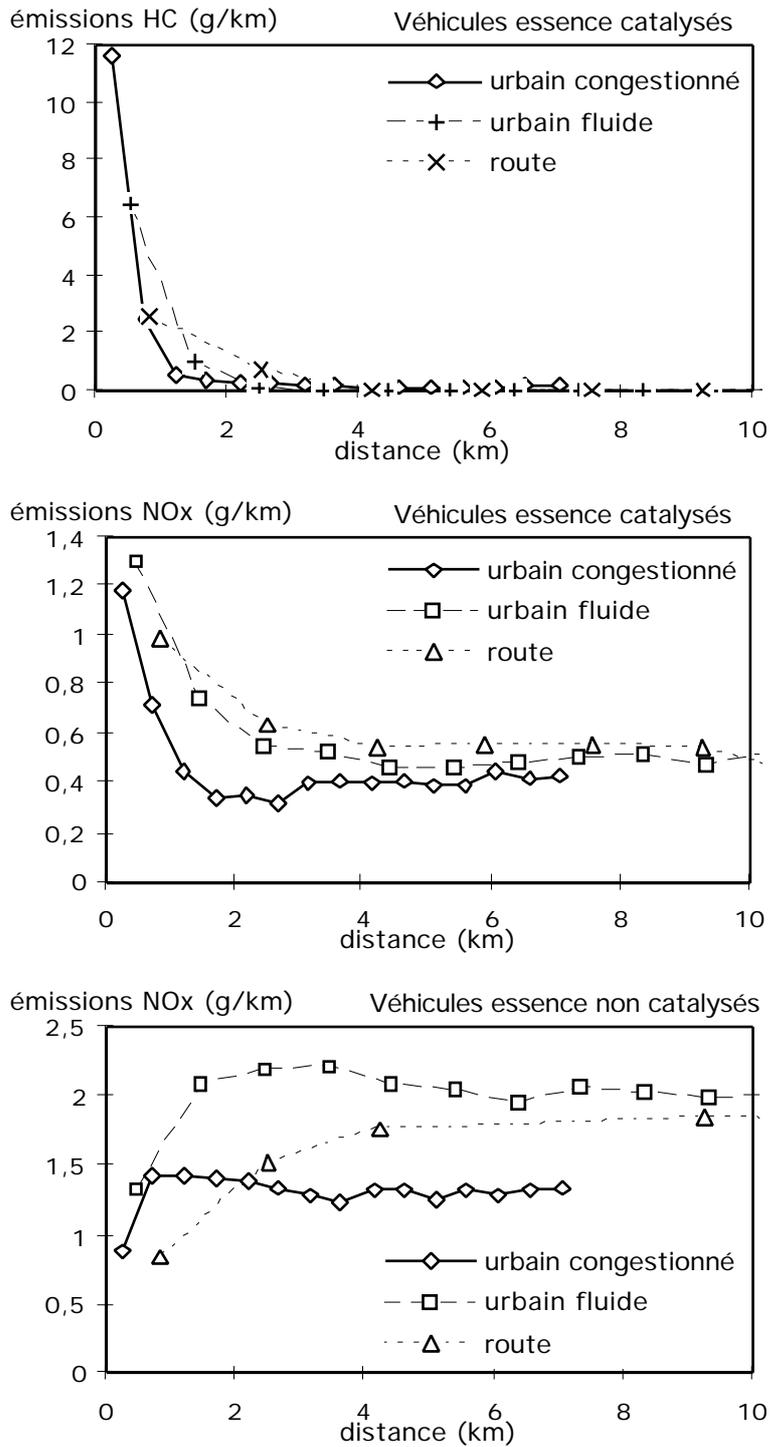


Figure 1.12 : Évolution des émissions de polluants après un démarrage moteur froid - valeurs moyennes sur 10 véhicules, mesurées sur des cycles courts répétés et correspondant à différentes conditions de circulation [Joumard, 1995]

considérable et indique qu'un cycle devrait couvrir au moins cette distance si on veut mesurer l'incidence du démarrage à froid.

1.5.4 - Incidence de la chronologie

On remarque que l'évolution des émissions après un démarrage à froid dépend des conditions cinématiques de circulation (cf. figure 1.12). La combinaison des effets de la vitesse moyenne, des conditions de circulation et des conditions thermiques démontre que la chronologie des "événements" a une importance : après un trajet démarré moteur froid, les conditions de circulation rencontrées conditionnent le réchauffage plus ou moins rapide du moteur, et donc les surémissions correspondantes.

Dans ce sens, les travaux en [E.P.A., 1993] montrent que les premières minutes de circulation d'un trajet présentent des vitesses moyennes moins élevées que le trajet total (au moins par l'incidence du démarrage qui implique des vitesses faibles).

1.5.5 - Précision des mesures d'émission

On a vu précédemment l'incidence forte de nombreux paramètres de fonctionnement sur les émissions. On doit également s'interroger sur la précision des mesures sur banc d'essai en vue d'une utilisation appropriée des résultats de mesure.

Les mesures de consommation sur véhicule sont relativement précises dès lors qu'elles sont intégrées sur une période assez longue. Pour un même cycle de conduite et un véhicule "normal", c'est à dire ne présentant pas de dysfonctionnement ou de fluctuations importantes, on peut espérer des mesures répétitives à 2-3%. Cependant, un véhicule peut évoluer dans le temps (réglages, usure, etc.) et on a pu observer des variations supérieures à 25% pour un même véhicule réglé, à un an d'intervalle [André, 1996b].

Les mesures des émissions de polluants dépendent largement d'un plus grand nombre de facteurs. Selon les spécialistes, pour une voiture très "stable" (dont les émissions ne varient pas ou peu d'un essai à l'autre), on peut espérer des variations inférieures à 5% en répétant un même essai avec des conditions de test relativement stables. La conjugaison des variations des conditions des essais et de l'instabilité de comportement propre au véhicule pourraient par contre entraîner des variations de 20 à 50% sur un cycle d'essai. Le conducteur lui-même semble pouvoir exercer une influence importante sur le résultat, dans sa manière de reproduire le cycle, même si celui-ci est assorti d'une bande de tolérance. Néanmoins, peu de travaux permettent de confirmer ces hypothèses.

Les tests menés par [Van Ruymbecke, 1991] montrent une forte influence du conditionnement thermique avant l'exécution du cycle : pour un même véhicule moteur chaud, mais dont la température d'huile au début du cycle fluctue entre 80 et 100°C, les résultats des mesures d'émissions de polluants varient de 20 à 30%. Lorsque l'on contrôle les conditions initiales du cycle (on ajuste la température d'huile par un conditionnement du véhicule), on obtient, sur une douzaine de tests, un écart-type des résultats de l'ordre de 10% de la valeur moyenne (cf. tableau 1.4). Ces écarts peuvent être expliqués partiellement par les conditions climatiques de l'essai (températures ambiantes entre 20 et 30°C).

	Monoxyde de carbone CO (g/km)		Oxydes d'azote NOx (équiv. NO ₂ g/km)		Hydrocarbures HC (équiv. CH _{1.85} g/km)	
	moy.	écart-type	moy.	écart-type	moy.	écart-type
cycle urbain	32,7	2,8	1,7	0,1	2,0	0,2
cycle autoroutier	2,0	0,1	1,4	0,05	3,0	0,1
cycle urbain européen (ECE15)	9,1	2,0	1,7	0,2	1,4	0,1

Tableau 1.4 : Précision des mesures d'émission de polluants - résultats obtenus pour un véhicule sur une série de 12 tests consécutifs, avec contrôle des conditions thermiques initiales

On observe donc que l'incertitude de la mesure est relativement élevée. On doit également souligner que la dispersion entre les véhicules est encore beaucoup plus importante que la dispersion liée aux conditions de test (cf. résultats décrits au chapitre 7).

1.5.6 - Utilisation des résultats

Mis à part l'expression directe des résultats des mesures d'émissions, leur comparaison à la valeur réglementaire, ou la comparaison de véhicules entre eux, les facteurs d'émissions (quantité de polluant rapportée à la distance parcourue) sont principalement utilisés à des fins de quantification globale des émissions (modèles d'inventaires, cf. figure 1.13) et / ou couplés à des modèles de dispersion de polluants et de transformation chimique afin d'évaluer la qualité de l'air, la dégradation de l'atmosphère, etc.

Grossièrement, on multiplie ces facteurs d'émissions par des parcs de véhicules (nombres de véhicules par catégories) et par des usages spécifiques (kilomètres parcourus). Les modèles intègrent également des corrections liées aux conditions thermiques et climatiques (émissions à froid), à l'altitude, etc. et tiennent compte d'émissions par évaporation (cf. par exemple les modèles d'inventaires français et européen [Joumard, 1994], germano-suisse [OFEFP, 1995], et américain [E.P.A., 1989]).

Ce schéma empile de nombreuses incertitudes (précision des mesures d'émissions, modélisation du parc, connaissance des usages, etc.), mais on remarquera qu'il repose sur le (ou les) cycle(s) d'essai et les conditions de mesures des émissions de polluants, qui sont une modélisation et une simplification sans doute extrême de la diversité des usages et conditions de fonctionnement des véhicules.

Compte tenu de l'incidence importante de nombreux facteurs sur les émissions et de la précision des mesures, on doit considérer le rôle capital du ou des cycles de conduite dans ce processus et s'entourer de beaucoup de précautions pour leur développement, afin qu'ils représentent correctement la réalité, en moyenne mais aussi dans sa diversité.

Les seuls cas de validation des modèles d'inventaires sont des comparaisons ponctuelles des résultats de modélisation avec des mesures dans l'environnement sur des sites particuliers (tunnel, section d'autoroute, etc.) et mentionnés précédemment. La comparaison du bilan des émissions dans un tunnel [Pierson, 1990] et des résultats de modèles d'inventaire américain [E.P.A., 1989]

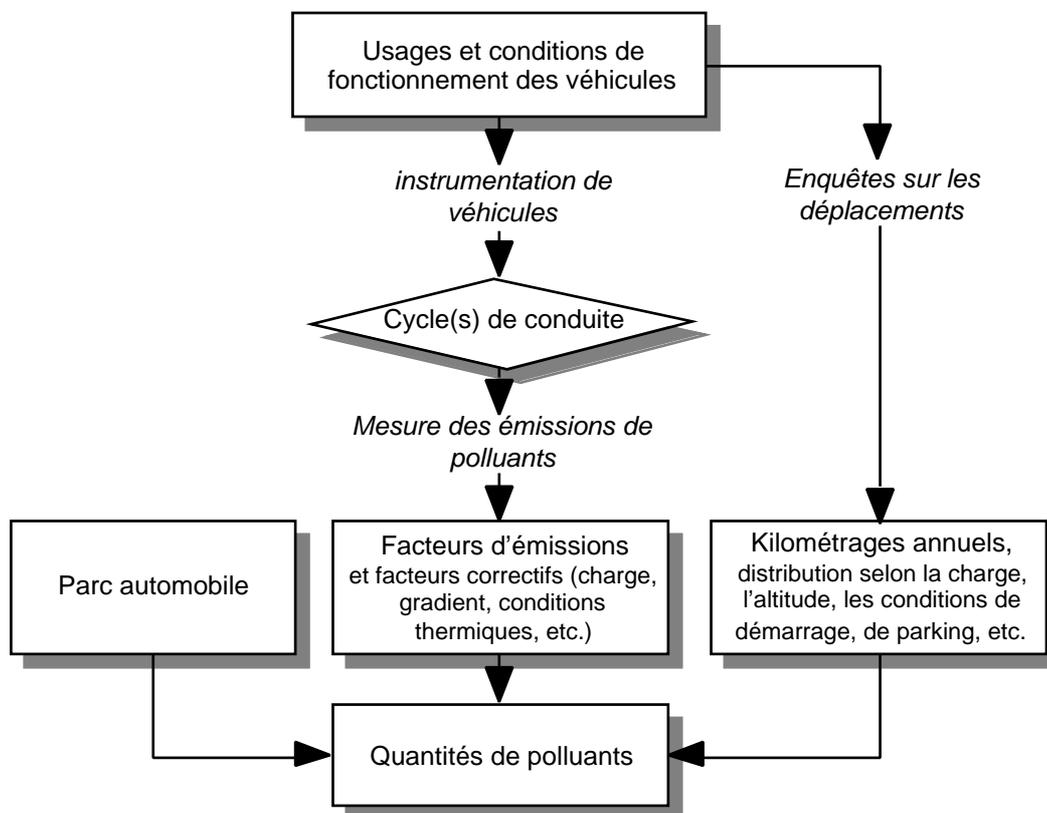


Figure 1.13 : Schéma de principe d'un inventaire des émissions de polluants

(dérivées des mesures sur cycle réglementaire américain, selon la procédure FTP75) semble démontrer l'insuffisante représentativité de cette procédure : les émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbure sont sous-estimées par des facteurs de 3 à 4, tandis que les émissions de NOx semblent cohérentes. Ces travaux démontrent la fragilité des facteurs d'émissions, la nécessité de conditions de mesures représentatives et la nécessité de précautions lors de l'extrapolation des résultats lors d'inventaires.

1.6 - Conclusions

La mesure des émissions de polluants des véhicules ou des moteurs met en oeuvre des matériels lourds et des procédures complexes. La grande diversité des matériels de transports et de leurs conditions d'utilisation rend difficile la définition de conditions de test notamment des cycles de conduite.

Les essais visent deux objectifs assez différents : d'une part le contrôle et la limitation des émissions des véhicules neufs et au cours de leur vie, et d'autre part la mesure réelle des émissions de polluants afin de quantifier les nuisances liées au transport. On tente de concilier ces deux objectifs : des conditions de tests représentatives sont un gage de la pertinence des procédures de contrôle, les résultats de mesure obtenus lors des contrôles constituent une base de données considérable à exploiter à des fins d'inventaires.

Cependant les deux types de mesure divergent sur plusieurs points : le contrôle réglementaire impose des procédures strictes (carburant de référence, conditions contrôlées, etc.), rapides, simples et communes à l'ensemble des véhicules d'une famille. Pour la mesure des émissions réelles, il faut s'affranchir de certaines contraintes pour permettre une meilleure prise en compte des réalités (carburants du commerce, véhicules en l'état, etc.) et on doit envisager une plus grande diversité des conditions de test.

La constitution de facteurs d'émissions, utilisés en particulier lors d'inventaires des émissions de polluants, repose fortement sur les méthodes de mesure mises en oeuvre, notamment les cycles de conduite qui constituent un élément clé et doivent - pour une expression et une exploitation pertinentes des résultats de mesure - être en cohérence avec l'utilisation réelle des véhicules.

La forte influence des conditions de fonctionnement des véhicules (conditions de circulation, conditions thermiques) sur les émissions de polluants justifie d'autant cette représentativité des conditions de test. Ceci impose en particulier une connaissance des usages et la mise en oeuvre de méthodes de construction de cycles représentatifs.

Cette démarche de modélisation s'étend au delà du seul cycle de conduite afin de tenir compte des conditions thermiques et de démarrage, ou lorsque on s'intéresse à d'autres aspects de l'usage que le déplacement (émissions par évaporation lorsque le véhicule n'est pas utilisé, test de longévité des catalyseurs, nécessité de tenir compte d'un profil type d'utilisation journalière pour des motorisations hybrides).

Chapitre 2 - Usage des véhicules : outils d'investigation

2.1 - Introduction

Les quantités de polluants émises et la consommation énergétique des véhicules de transports dépendent en particulier:

- des véhicules : les émissions spécifiques et consommations sont liées aux catégories de véhicules (voiture, camion, etc.), à leur motorisation et technologie (essence, diesel, G.P.L., électrique, cylindrée du moteur), mais également à leur état (réglages, état d'usure lié à l'âge), à la qualité et composition des carburants utilisés, des lubrifiants, etc.

- de l'usage du véhicule : un véhicule qui n'est pas utilisé ne pollue pas ou presque. Il y a une certaine proportionnalité entre les nuisances produites et la quantité d'utilisation. Certains usages pourront être plus ou moins polluants, plus ou moins consommateurs (usages urbains ou autoroutiers, trajets courts ou longs, fréquence d'utilisation, charge transportée), ou encore trop polluants par rapport au "service" rendu (transports à vide par exemple). L'usage est fortement lié à la vocation du véhicule (transport de marchandises, de personnes, engins de chantier, etc.).

- du nombre de véhicules : la responsabilité dominante des voitures privées tient plus à leur nombre qu'à leurs émissions spécifiques,

- et de nombreux paramètres "externes" tels que l'infrastructure routière (type de revêtement, sinuosité, systèmes de régulation du trafic, intersections, type de voirie, etc.), les conditions de circulation (circulation urbaine, routière, autoroutière), les conditions géographiques (zone montagnaise ou en plaine), et climatiques (pluie, vent), et finalement le comportement du conducteur (conduite souple ou nerveuse ou "sportive", respect ou non des consignes de limitation des vitesses, usages des rapports de boîte, des accessoires de conduite, etc.).

Outre les caractéristiques propres des véhicules et leur nombre, l'ensemble des conditions externes et paramètres d'usages se traduisent essentiellement en terme de conditions de fonctionnement des véhicules et des moteurs: vitesses pratiquées, accélérations, régimes moteur, puissance développée par le moteur, conditions thermiques, etc.

Alors qu'on dispose d'une connaissance relativement large des émissions spécifiques des véhicules au travers de nombreuses campagnes de mesure sur banc d'essai, on ne dispose que de très peu d'éléments sur les conditions d'usage et de fonctionnement des véhicules, pourtant indispensables tant pour la définition de conditions de mesure réalistes ou représentatives, que pour utiliser les résultats de ces mesures (inventaire des quantités de polluants émises par les transports, études d'impact de réglementation ou d'innovation technologique, simulation de fonctionnement en vue du dimensionnement de motorisations nouvelles ou de sous-ensembles d'un véhicule par exemple).

Dans le cadre d'une action de recherche européenne (COST 319 - Pollution de l'air par les Transports) dont l'objectif principal est de collecter l'ensemble des informations nécessaires à une compréhension exhaustive des émissions de polluants liées au transport, une enquête a été menée auprès de laboratoires et instituts de recherche afin de recenser les informations disponibles concernant les déplacements et conditions de fonctionnement des véhicules.

Différentes méthodes sont mises en oeuvre qui permettent d'accéder à différents types d'informations : de l'analyse microscopique des conditions de fonctionnement sur quelques véhicules instrumentés aux statistiques nationales de kilométrage annuel établies à partir de plusieurs milliers de questionnaires.

On s'intéressera particulièrement aux différentes méthodes d'instrumentation et de suivi des véhicules en vue de l'enregistrement des conditions détaillées de fonctionnement, nécessaires à l'élaboration de cycles de conduite. Les autres sources d'information constituent un moyen de validation de ces expérimentations.

2.2 - Les enquêtes sur la mobilité

Les enquêtes par questionnaire ou par interview sont parfois accompagnées d'un carnet de bord à remplir à chaque déplacement. Elles sont réactualisées périodiquement et sont menées dans la plupart des pays. Ces enquêtes concernent des nombres très importants de véhicules ou de foyers familiaux:

- 20 000 ménages, 43 000 personnes et 120 000 déplacements en 1989 en Suisse par exemple [GVF 1991], par questionnaire envoyé, avec questions sur les déplacements du jour,
- 7 600 personnes en Suède [Herrickson, 1993],
pour ces deux cas, il s'agit d'enquêtes sur la mobilité des personnes (tous modes de transports inclus),
- 55 000 voitures privées en Espagne en 1989 ¹, par interview en différents sites en bordures de route, en zone extra-urbaine.

Les informations issues de ces enquêtes sont multiples et variées: nombre de véhicules disponibles par ménage, kilométrages annuels, taux d'occupation des véhicules, longueurs des déplacements, moyens de transport habituellement utilisés, motifs de déplacements (domicile travail, etc.), et répartition spatiale (comparaison des régions, des villes et des campagnes, des types de voiries, etc.), temporelle (heure de la journée, jours de semaine, week-end, et évolution au fil des saisons ou années), selon les catégories de personnes (homme, femme, âge, catégories socioprofessionnelles), selon les motifs de déplacements (domicile travail, loisirs, etc..), et selon les véhicules (type, âge, carburant, etc.) des déplacements.

¹ Galan, P. Résultats d'enquête sur les déplacements par interview de bord de route. Communication personnelle. d'après rapport statistique édité par : DG CARRETERAS, MOPTIMA, Madrid, Espagne. 1994

Les informations de type nombre d'utilisations du véhicule, longueur des trajets, voire consommation estimée de carburant peuvent se révéler relativement approximatives, si elles ne reposent que sur l'appréciation de la personne sondée. Elles sont sans doute plus fiables dans le cas de remplissage de carnets de bord, et si la consommation est mesurée de "plein à plein", sur une semaine. La représentativité et la très large couverture (spatiale, types de véhicules, catégories de personnes, etc.) sont les atouts majeurs de ce type d'enquête.

2.3 - Les enquêtes lors du "contrôle technique"

Avec la mise en place de procédures dites de "contrôle technique obligatoire", un suivi périodique des conditions d'utilisation des véhicules est devenu possible :

- en Suisse, les services cantonaux ainsi que les centres de contrôle ont relevés les données de 93000 véhicules, tous types confondus (2500 poids-lourds, 3500 utilitaires légers, 6000 deux-roues), entre 1991 et 92, [GVF, 1993]. Les kilométrages annuels sont ainsi évalués de manière très précise (depuis la première mise en circulation pour les véhicules utilitaires et depuis le dernier contrôle technique pour les voitures).
- en Suède [VTI, 1994], l'analyse est systématique entre 2 années successives de contrôle des véhicules (entre 1987 et 1991).

Pour ces 2 cas, on obtient une ventilation précise des kilométrages effectués, selon les régions, l'âge des véhicules (qui semble être un facteur très important de diminution des kilométrages annuels), les caractéristiques techniques du véhicule (cylindrée, masse, etc.), et selon les catégories de véhicules (voitures, minibus, bus, cyclomoteurs, véhicules de livraisons, camions, semi-remorques). Les informations issues de ces enquêtes sont limitées (kilométrage annuel, état du véhicule).

Ce type d'enquête constitue une méthode fiable et précise de recueil d'information sur l'évolution des kilométrages des véhicules, en fonction de leurs caractéristiques techniques, âge et répartition selon les régions.

2.4 - L'analyse du trafic

L'utilisation de systèmes de comptage des véhicules et de calcul de leur vitesse permet d'apprécier localement la vitesse d'un grand nombre de véhicules.

En Suède, des campagnes de mesures sont menées annuellement et comparativement (63 points de mesures sur routes de campagne en 1991, en 5 ou 6 périodes de l'année, soit 46000 voitures, 1800 camions et 430 bus). Les systèmes permettent de différencier les principales classes de véhicules, et bien sûr les différents types de voies. L'analyse des données de 1990 et 1991 montre une augmentation significative des vitesses sur tous les types de voies [Nilsson, 1989 et 1991].

En Suisse, l'utilisation de matériel vidéo et le lien avec le fichier des immatriculations permet d'identifier de manière plus précise les caractéristiques des véhicules [BUWAL, 1993]. Cette étude concernait les véhicules utilitaires seulement, sur 20 sections de route en zone extra-urbaine.

L'objectif principal de cette dernière étude était la connaissance de la composition du trafic (par catégories de véhicules) selon les types de voies.

En raison du caractère très ponctuel des points de mesures et du fait que ceux-ci concernent des portions de voiries extra-urbaines hors intersections, on n'obtient pas une vraie mesure de la vitesse, mais cette approche peut permettre d'apprécier l'évolution des conditions de circulation extra-urbaines.

2.5 - Instrumentation de véhicules

De nombreuses expérimentations sont menées avec du matériel embarqué à bord de véhicules, avec souvent comme objectif de construire des cycles de conduite ou d'essai pour la mesure des émissions ou de la consommation. Ces expérimentations permettent également de disposer de données types (profils de mission, trajets types, etc.) utilisées ensuite comme données d'entrée de modèles de simulation de fonctionnement de véhicules à motorisations nouvelles, et de données statistiques nécessaires à l'utilisation de modèles d'inventaire des émissions de polluants.

Ces expérimentations se caractérisent d'une part par le champ couvert (véhicules concernés, zones géographiques, périodes) et d'autre part par la méthode de recueil.

2.5.1 - Le champ d'investigation

Généralement, ces expérimentations visent à décrire les conditions de circulation d'une famille de véhicules (véhicules légers, utilitaires, etc.) et sont souvent limitées à quelques modèles et véhicules plus ou moins représentatifs du parc automobile. Elles concernent souvent des utilisations types : la conduite en zone urbaine, en heure de pointe, etc.

Des sélections sont réalisées a priori, s'appuyant sur une caractérisation des conditions d'utilisation, les statistiques de déplacements, la description des types de voies, la connaissance du parc de véhicules (kilométrages selon les types, modèles, technologies, etc.).

On distingue des expérimentations sur des itinéraires pré-définis de celles en utilisation libre du véhicule.

1 - Expérimentations sur sites prédéfinis

Une série de sites a été préalablement définie (sélection de routes ou d'itinéraires), sur lesquels des véhicules équipés vont ensuite circuler. De la qualité de cette présélection dépend la qualité des données enregistrées. Le plus souvent, des véhicules sont instrumentés et confiés à des techniciens, selon les méthodes du véhicule "suiveur" ou "flottant" décrites ci-après.

Parmi ces cas, citons:

- les expérimentations germano-suissees [GVF, 1994], sur voitures et véhicules utilitaires et notamment l'étude à grande échelle des conditions de fonctionnement et émissions des voitures sur 20 tronçons d'autoroutes d'environ 40 km de long, représentatifs du réseau national allemand (Abgas-Grossversuchs, [Meier, 1986]). Trente voitures ont été instrumentées, dont les enregistrements ont permis le développement de cycles types et la mesure des émissions de polluants en fonction notamment des types de véhicules et des conditions de pente de la route. Dans ce cadre, des capteurs de trafic et du matériel vidéo ont été également mis en oeuvre en complément des mesures à bord des véhicules.

- des expérimentations plus modestes en Grèce, à Thessalonique (1 véhicule équipé, 1500 km enregistrés, [Pattas, 1993], [Kyriakis, 1992]), ou en Autriche (à Graz, 1 voiture équipée, 3000 km de suivi [Sturm, 1994]) et en Finlande où 4 voitures équipées et suivies sur différents types de voies urbaines ont permis de générer 56 cycles types utilisés pour la simulation des émissions sur la ville ².

D'autres études se sont appuyées sur des analyses complémentaires :

- les expérimentations menées en Australie, pour lesquelles des mesures embarquées à bord de véhicules ont été effectuées après caractérisation et sélection de zones urbaines homogènes ([Kenworthy, 1992] et chapitre 3.2.6).

- des expérimentations qui ont associé des mesures embarquées à bord de véhicules et la mise en place de nouvelles stratégies de régulation des feux (expérimentations en France, [André, 1996b] et en Suède.

2 - Expérimentations en usages libres

Il n'y a pas de sélection préalable de site. Les véhicules peuvent être des voitures privées, leur utilisation étant laissée à l'appréciation libre de leur propriétaire, et les conditions de circulation ne sont pas connues autrement que par l'analyse des informations enregistrées propres au véhicule (vitesses, accélérations, arrêts, etc.), sauf à utiliser des systèmes de positionnement (G.P.S. par exemple). Le principal avantage de cette méthode est que l'on se place en situation d'utilisation normale des véhicules. On obtient ainsi des informations sur les conditions d'utilisation des véhicules (longueur des déplacements, horaires, etc.). La sélection des types de véhicules, et des propriétaires conditionne largement la représentativité des données enregistrées. Parmi ces études, on trouve :

- les expérimentations menées en France, sur 55 voitures privées (70000 km enregistrés, [André, 1991]), et sur voitures commerciales et véhicules utilitaires [André, 1994],
- les expérimentations menées en France, Grande-Bretagne et Allemagne sur 60 voitures privées représentatives des parcs respectifs des 3 pays (73000 km, 8000 trajets enregistrés, 1600 journées de suivi des véhicules, [André, 1989 et 1995] et chapitre 6),

² Holma M. Personal communication. Matrex Oy, Helsinki, Finland

- les expérimentations germano-suisse sur 30 véhicules utilitaires (dont 5 en Suisse, [Steven, 1994]), avec 4 à 24 heures d'enregistrement par véhicule. Ces enregistrements sont utilisés en vue de la définition d'un cycle d'essai des moteurs de véhicules utilitaires.

Enfin, on note une expérimentation à grande échelle sur la flotte de 150 bus et bus articulés à Budapest, suivis en continu pendant 2 mois, en utilisant une instrumentation de suivi "commercial" des véhicules (mesure de la vitesse et comptage des passagers, [Borbely, 1989]).

2.5.2 - Les méthodes de recueil

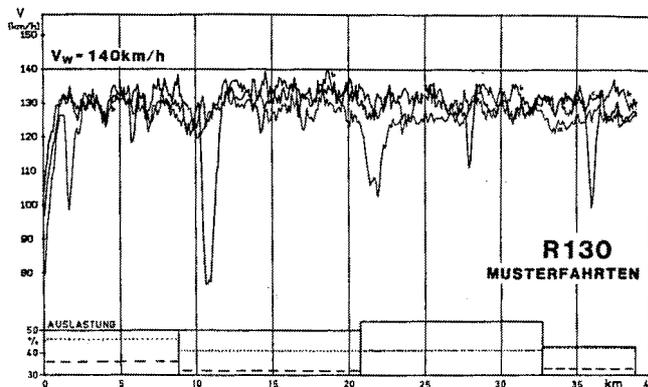
1 - Véhicule laboratoire

Un véhicule est instrumenté puis confié à un ou des conducteurs sur des itinéraires prédéfinis, ou pour une utilisation libre.

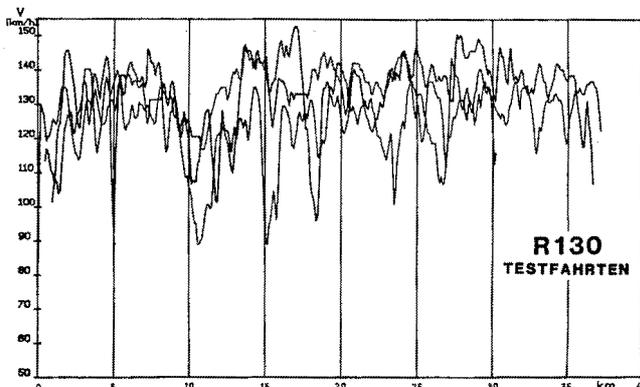
Lorsque le véhicule est confié à un conducteur professionnel (technicien du laboratoire, ou personnel de l'entreprise, etc.), celui-ci est souvent "averti" des objectifs de l'expérimentation, et a priori son comportement de conduite peut n'être pas représentatif. Lorsqu'on fait appel à échantillon représentatif de conducteurs non avertis, la méthode permet de mieux prendre en compte les différents comportements individuels de conduite.

Notons cependant que lorsqu'on confie un véhicule à un conducteur pour une utilisation libre

Vitesse (km/h)



véhicule instrumenté, avec consigne de respect d'une vitesse donnée au conducteur



mesure de la vitesse des autres véhicules du trafic

distance (km)

Figure 2.1 : Comparaison des vitesses selon les méthodes de mesure (en haut une consigne de vitesse est donnée au conducteur, en bas un véhicule mesure la vitesse d'autres véhicules du trafic)

(mais théoriquement habituelle) la méthode risque d'induire au moins une sur-utilisation du véhicule et souvent une utilisation dans des conditions non "normales" : en particulier si le conducteur ne conduit pas d'habitude un véhicule du même modèle, ou parce qu'il aura tendance à "tester" les performances du véhicule, ou simplement parce que le véhicule n'est pas le sien.

Sur des itinéraires prédéfinis, cette méthode est souvent assortie de "consignes de conduite" de type : "conduire normalement" ou "rester dans le trafic" ou "respecter la signalisation" , dont on peut penser qu'elles ne correspondent pas à un comportement de conduite normal. Ainsi les expérimentations menées par [Meier, 1986] permettent de comparer les vitesses mesurées à bord de véhicules dont les conducteurs respectent une consigne, et celles des autres véhicules du trafic, mesurées par la technique du véhicule suiveur (sur le même itinéraire). Ces dernières présentent des variations beaucoup plus importantes (fluctuations de l'ordre de 20 à 30 km/h) que celles mesurées lors des tests avec une consigne de vitesse (écarts de l'ordre de 10 km/h), beaucoup plus stables, et qui indiquent un changement de comportement de conduite (cf. figure 2.1).

2 - Technique du véhicule suiveur

Un véhicule "suiveur", équipé de matériel d'acquisition est conduit (souvent sur des itinéraires prédéterminés) par un technicien, qui s'attache à suivre un véhicule "cible", sélectionné aléatoirement dans le trafic pour assurer une certaine représentativité des véhicules suivis. On enregistre les paramètres de fonctionnement (principalement la vitesse) du véhicule suiveur.

Alors que de nombreux auteurs se sont appuyés sur [Johnson, 1975] pour justifier l'utilisation de cette technique, des travaux récents menés par [Ericsson, 1996] démontrent que les accélérations et vitesses du véhicule suiveur sont systématiquement sous-estimées (et particulièrement lorsque le véhicule suivi a des accélérations supérieures à $0,5 \text{ m/s}^2$ ou inférieures à $-0,5 \text{ m/s}^2$). Parallèlement, il y a risque de sur-représentation des véhicules isolés (non dans un trafic) et de sous-représentation des véhicules en file en particulier du véhicule de tête, par la méthode de sélection aléatoire des véhicules à suivre.

Avec des systèmes de visée laser ou radar, on peut mesurer précisément le différentiel de vitesse entre le véhicule suiveur et le véhicule suivi et ainsi connaître la vitesse vraie du véhicule

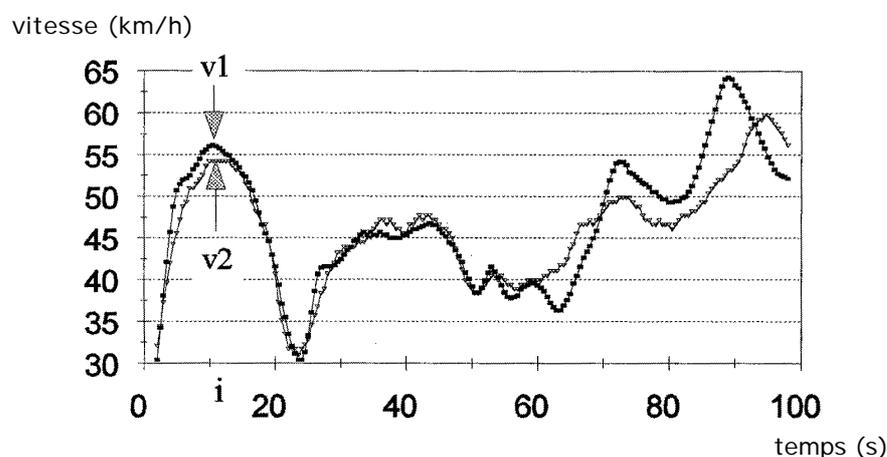


Figure 2.2 : Comparaison des vitesses du véhicule suiveur et du véhicule suivi [Ericsson, 1996]

suivi [Effa, 1993].

Dans les deux cas, cette méthode ne permet pas de décrire les conditions de début et fin de trajet, ni d'enregistrer d'autres paramètres de fonctionnement du véhicule suivi (rapports de boîte, conditions thermiques, etc.).

Un avantage de cette méthode est la possibilité d'associer aux données de fonctionnement des véhicules des informations sur les types de voies considérées, les conditions de circulation (conditions de trafic, mais aussi état de la chaussée, conditions climatiques, etc.). Dans ce but, certains travaux ont utilisé une caméra vidéo embarquée permettant d'enregistrer en continu les conditions de trafic [Rapone, 1995].

3 - Technique du véhicule flottant

La technique du véhicule "flottant" est une variante de la méthode précédente : au lieu de suivre un véhicule "cible", le conducteur cherche à se maintenir dans le trafic, par exemple en dépassant autant de fois que le véhicule laboratoire aura été dépassé, etc. [Hughes, 1988]. On enregistre dans ce cas plutôt des conditions moyennes de circulation (sur un trafic) reflétées par un seul véhicule. Cette technique est plus difficile de mise en oeuvre en cas de trafic faible.

Comme précédemment, des informations sur les "conditions" (au sens large) de circulation peuvent compléter les données de fonctionnement du véhicule.

3 - Instrumentation de véhicules privés

Des véhicules privés sont instrumentés, puis utilisés normalement par leur propriétaires. Cette méthode permet de se rapprocher au mieux des conditions réelles d'utilisation, en intégrant le comportement individuel de conduite et d'usage du véhicule. Le conducteur conduit donc son véhicule habituel pour une utilisation qui lui est propre. Le risque d'induire un changements de comportement est probablement minimisé si les périodes de suivi sont suffisamment longues. Toujours selon les travaux de [Ericsson, 1996], la tendance du conducteur à diminuer la vitesse lorsque son véhicule est instrumenté ne serait pas significative.

Cette méthode permet de couvrir tous les types d'utilisation, quelqu'en soient les itinéraires, et de mesurer d'autres paramètres du véhicule (températures, utilisation d'auxiliaires de conduite, etc.). A l'inverse, cela signifie qu'on n'a plus aucune maîtrise (et aucune connaissance) de l'itinéraire emprunté par le conducteur, et une information très pauvre sur les conditions "externes" (infrastructure, densité de circulation, conditions climatiques, etc.) qui sont des facteurs explicatifs importants des conditions de circulation.

Le suivi du véhicule doit se faire sur des périodes de temps assez longues, des zones géographiques et des situations suffisamment diversifiées et représentatives pour refléter la diversité des conditions d'utilisation. La diversité des comportements individuels est prise en compte par l'instrumentation d'un échantillon de véhicules.

Dans le cas des véhicules utilitaires mentionné précédemment [Steven, 1994], la complexité de l'instrumentation nécessitait la présence d'un technicien à bord du véhicule. Il est alors possible de recueillir en parallèle des informations explicatives complémentaires (masse embarquée, conditions de circulation, type de voies, etc.), avec cependant le risque de perturber le comportement du conducteur et une certaine complexité pour le suivi des déplacements. Ceci a été possible pour le cas des véhicules utilitaires dont l'utilisation est souvent planifiée dans le temps, mais serait plus complexe pour des voitures privées, dont l'utilisation est diverse et imprévisible.

Récemment, on a assisté à une forte évolution des systèmes d'acquisition de données (miniaturisation, augmentation des capacités, diminution des coûts) qui doit permettre d'envisager des expérimentations à plus grande échelle. Ainsi, au Canada, un système très simplifié et de très faible coût a été développé, qui pourrait également être envisagé comme moyen alternatif au traditionnel "carnet de bord" pour le suivi des usages réels de grands échantillons de véhicules. Ce système ("Autologger" [Taylor, 1991]) est constitué d'une "boîte noire" et de capteurs rudimentaires (vitesse, régime moteur, etc.), il est rapide à installer (moins d'une heure) sur tous types de véhicule et permet d'enregistrer les informations sur une carte magnétique de type "carte de crédit", sur des périodes semi-annuelles, sans intervention. Aux États-Unis, une enquête à grande échelle est actuellement menée utilisant ce système, pour vérifier l'adéquation du cycle urbain américain aux conditions de circulation contemporaines [Barth, 1995].

2.6 - Paramètres mesurés

Les types de paramètres mesurés ainsi que les types d'études concernées sont listés de manière synthétique dans le tableau 2.1. Concernant les paramètres mesurés sur véhicules, on note parmi les études citées des paramètres exceptionnellement mesurés: la température des gaz d'échappement, en vue de connaître l'efficacité du catalyseur, et le couple moteur, paramètre essentiel de fonctionnement qui n'est mesuré que pour les véhicules utilitaires [Steven, 1994]. Par ailleurs, les méthodes (capteurs, fréquence d'acquisition, etc.) utilisées pour mesurer un même paramètre peuvent être très diverses, rendant difficile la comparaison des informations recueillies lors de deux expérimentations différentes.

On note également les plages de recoupement entre les différents types d'études:

- entre les enquêtes et les mesures embarquées, en ce qui concerne la connaissance des déplacements, bien que les niveaux de représentativité ne soient pas les mêmes (quelques milliers de véhicules pour les enquêtes, quelques dizaines lors des mesures embarquées);
- entre les mesures de trafic et les mesures embarquées, lorsque ces dernières servent à l'analyse des conditions de circulation par l'analyse de la vitesse et d'autres indicateurs.

Pour ces raisons, l'avènement de matériels embarqués légers pourrait permettre d'étendre encore le champ d'application de cette méthode.

<ul style="list-style-type: none"> • Comportement de déplacement • Kilométrage annuel 	<ul style="list-style-type: none"> • enquêtes sur les comportements de déplacements 	<ul style="list-style-type: none"> • véhicules instrumentés
<ul style="list-style-type: none"> • Kilométrage hebdomadaire ou journalier (durée et nombre des déplacements) • Description des trajets (longueur, durée) 	<ul style="list-style-type: none"> • enquêtes lors du contrôle technique • enquêtes lors du contrôle technique 	
<ul style="list-style-type: none"> • Conditions de fonctionnement du moteur • Régime moteur • Conditions de charge • Conditions thermiques • Température échappement (catalyseur) • Couple moteur • Vitesses des véhicules • Conditions extérieures diverses • Conditions de circulation 	<ul style="list-style-type: none"> • analyse du trafic 	

Tableau 2.1 : Types de paramètres mesurés selon les méthodes

Enfin on remarquera que le nombre de véhicules concernés est grossièrement inversement proportionnel à la complexité (et au coût) des expérimentations, le coût étant lié d'une part à la mesure de certains paramètres (couple par exemple), d'autre part à la taille des véhicules (véhicules utilitaires lourds).

2.7 - Considérations sur la représentativité et la nécessité des mesures embarquées

Les expérimentations par instrumentation de véhicules apparaissent comme la seule possibilité d'accéder à une connaissance des conditions de fonctionnement des véhicules nécessaires à la construction de cycles de conduite. Cependant, leur complexité limite la taille des échantillons. En conséquence, il importe de se préoccuper de la représentativité de ce type d'expérimentation et de la complémentarité des méthodes

2.7.1 - Comparaison avec une enquête par carnets de bord

On propose de comparer les principaux résultats obtenus lors d'expérimentations menées en France [André, 1987] avec ceux obtenus lors d'une enquête par questionnaire (carnets de bord journalier), et qui concernaient de 600 à 1000 véhicules sur 3 périodes de l'année, soit près de 43 000 trajets [Vallet, 1982].

Les kilométrages annuels et hebdomadaires sont proches (4% d'écart, cf. tableau 2.2), alors que les nombres moyens d'utilisations et longueurs des trajets sont très différents (2.7 et 5.3 trajets par jour, de longueurs moyennes 12 et 7 km respectivement). Les distributions des longueurs de trajets diffèrent particulièrement pour les très courts et longs trajets (moins de 1 kilomètre et plus de 50 km). Ces cohérences et différences peuvent s'expliquer :

	Enquête par carnets de bord (sur 3 périodes) [Vallet, 1982]	Étude instrumentée [André, 1987]
kilométrage annuel (km)	13,800	14,300
kilométrage hebdomadaire (km)	278 (248/261/350)	274
nombre moyen d'utilisations par jour	2.7 (2.3/ 3/2.9)	5.3
longueur moyenne des trajets (km)	12 (9 /12/15)	7
distribution des longueurs de trajets		
< 1 km	9 à 12	24
1 - 3 km	24 à 27	28
3 - 5 km	14 à 16	16
5 - 10 km	18 à 21	18
10 - 50 km	21 à 26	13
50 km et plus	5 à 7	2

Tableau 2.2 : Comparaison des résultats obtenus lors d'une enquête par carnets de bord, et ceux d'une étude instrumentée (les valeurs entre parenthèses correspondent aux trois périodes couvertes : hiver, printemps, été)

- par la définition même du trajet (qui correspond à la mise sous contact du véhicule pour l'expérimentation, et à l'"objet d'un déplacement" pour l'enquête, ce qui peut entraîner la non prise en compte d'arrêts intermédiaires ou imprévisibles (à la pompe, ou pour effectuer une course en passant),
- par la difficulté (et la non-nécessité) de recenser tous les petits trajets lors d'une enquête (en particulier les courtes manoeuvres des véhicules, les trajets annexes au cours d'un long déplacement),
- et par l'imprécision du relevé sur carnet des distances courtes (hectométriques).

Cette comparaison tend à montrer que 40 à 50% des trajets de moins de 1 km ne seraient pas comptabilisés lors de l'enquête, ce qui explique la forte différence entre les nombres moyens d'usages journaliers. On note par ailleurs une sous-estimation du kilométrage hebdomadaire (relevé au compteur) par le produit du nombre d'usages et de la distance moyenne déclarés. Les deux études concluent à la fréquence importante des trajets courts mais avec des définitions différentes (1 trajet sur 2 inférieur à 3 kilomètres selon l'expérimentation, inférieur à 5 kilomètres selon l'enquête).

Toutefois, cette comparaison montre une relative cohérence des résultats des 2 méthodes (kilométrages hebdomadaires, forme des distributions), ce qui démontre la représentativité des expérimentations, moyennant des précautions de sélection de l'échantillon des véhicules.

2.7.2 - Discussion

L'instrumentation des véhicules est nécessaire lorsque l'on souhaite accéder à la connaissance détaillée des conditions de fonctionnement et d'usage des véhicules : analyse des comportements de conduite (vitesses et accélérations pratiquées, etc.), développement de méthodes de mesure et de cycles d'essai, données détaillées de simulation de fonctionnement des véhicules, analyse de l'incidence des conditions de circulation sur la consommation et les émissions de polluants, etc. Le coût et la complexité font que les échantillons sont restreints et les expérimentations espacées dans le temps. De ce fait, la représentativité des informations relatives aux usages (description des

trajets, usages journaliers) est plus faible que celle obtenue par enquête, qui permet d'accéder à des informations complémentaires (objet du déplacement, routes utilisées, etc.).

Par ailleurs, on observe aujourd'hui une forte demande d'information sur les conditions d'utilisations et de fonctionnement des véhicules : pour optimiser les véhicules à leur usage, pour disposer de statistiques nécessaires à une meilleure connaissance des transports et pour évaluer l'impact des développements technologiques considérables que connaissent les transports (automatisation, aides à la conduite, régulation du trafic, etc.). Cette demande concerne toutes les familles de véhicules (véhicules utilitaires, urbains, électriques, etc.).

L'évolution des systèmes d'acquisition de données peut permettre de satisfaire à cette demande et de dépasser les problèmes d'échantillons restreints. On doit donc s'interroger sur la faisabilité d'enquête à grande échelle sur les conditions d'utilisation et de fonctionnement des véhicules, utilisant des systèmes compacts et à faible coût. De tels outils permettraient de disposer de données "contemporaines", qui, outre leur application directe pour la définition de méthodes de test représentatives (cycle de conduite, conditions thermiques), seraient valorisées comme base statistique, notamment pour une meilleure connaissance des comportements d'usage des véhicules et leur évolution (observatoire des conditions d'utilisation des véhicules). Différentes techniques de mesure complémentaires viendront sûrement compléter les méthodes actuelles comme le GPS qui devrait permettre l'identification du lieu où circule le véhicule instrumenté.

2.8 - Conclusions

De nombreuses sources existent qui permettent d'avoir des éclairages différents sur l'utilisation des véhicules. Les moyens mis en oeuvre sont variés et complémentaires : enquêtes, enquêtes lors du contrôle technique, mesures embarquées, "analyseur de trafic", vidéo. Cependant, il semble bien que dans la plupart des cas, ces différentes sources ne soient pas rapprochées pour une utilisation conjointe qui autoriserait une confrontation des résultats, une critique méthodologique et surtout une articulation des résultats dans un souci de plus grande représentativité.

Les enquêtes sur la mobilité ou lors des contrôles techniques permettent d'établir une ventilation très précise des kilométrages effectués, selon les régions et les caractéristiques des véhicules (âge, catégorie, type, cylindrée, masse, etc.).

Seules les mesures embarquées à bord de véhicules permettent d'accéder aux paramètres de fonctionnement des véhicules et en particulier aux conditions de vitesses, nécessaires à la construction de cycles de conduite. L'instrumentation de véhicules privés, utilisés ensuite normalement par leur propriétaire permet d'appréhender ces paramètres en conditions normales d'utilisation. En raison de la complexité et surtout du coût de ces expérimentations, les nombres de véhicules instrumentés sont très limités. Ces faibles effectifs imposent des précautions méthodologiques afin d'assurer la représentativité des données enregistrées. Celle-ci peut être validée et corrigée en s'appuyant sur les autres sources d'informations macroscopiques (kilométrages annuels, connaissance des trajets, etc.).

Chapitre 3 - Méthodes d'élaboration de cycles de conduite

3.1 - Introduction

Les conditions de test sur banc d'essai sont principalement les forces appliquées au véhicule, la vitesse et les accélérations du véhicule et les conditions thermiques. On s'est beaucoup intéressé aux vitesses, qu'on a cherché à décrire sous forme de cycle de conduite. Ces cycles sont utilisés à de multiples fins : quantifier les émissions de polluants et la consommation, certifier, homologuer des véhicules ou des modèles, évaluer des technologies voire l'incidence de modifications de la régulation du trafic, etc.

Un cycle repose principalement sur des conditions de conduite "types", pour une zone géographique et une période données et inclut les principaux modes de conduite : accélérations, décélérations, arrêts, et périodes de roulage.

Au travers de l'analyse d'une quinzaine de cas de travaux (américains, australiens et européens) on tente de caractériser les principaux types de méthodes mises en oeuvre pour analyser les conditions de conduite et développer des cycles d'essais : nature des données utilisées, méthodes d'analyse et de réduction des données, paramètres considérés, moyens de validation et finalement le type de cycle développé (cycle réglementaire ou de recherche). On tentera en particulier d'identifier les originalités des ces travaux et les enseignements à en tirer.

3.2 - Construction de cycles pour véhicules particuliers

3.2.1 - Cycles synthétiques

Les cycles synthétiques sont conçus sous forme de phases de vitesses et accélérations constantes. Parmi ceux-ci on trouve le cycle Européen ECE15, les cycles japonais et le cycle 7 modes californien dont on décrit l'élaboration ci-après.

Au moyen d'un unique véhicule, circulant sur un itinéraire, on a mesuré manuellement les durées passées dans chacun des 4 modes : ralenti, accélération, décélération, "croisière". On construit ensuite un cycle synthétique, succession de segments de droite correspondants à ces modes. Des travaux complémentaires menés en 1956 (6 véhicules) impliquaient des moyens plus complexes : mesure de la vitesse en continu au moyen d'une cinquième roue, et enregistrement des durées passées selon des classes de vitesse, d'accélération, et de la dépression à l'admission qui permet de classer le fonctionnement selon les modes : forte accélération, accélération modérée, croisière, décélération modérée et forte décélération.

L'un des résultats de ces travaux a été de conclure à la nécessité de l'enregistrement en continu de la vitesse pour décrire les conditions de circulation [Watson, 1978]. L'autre résultat fût la

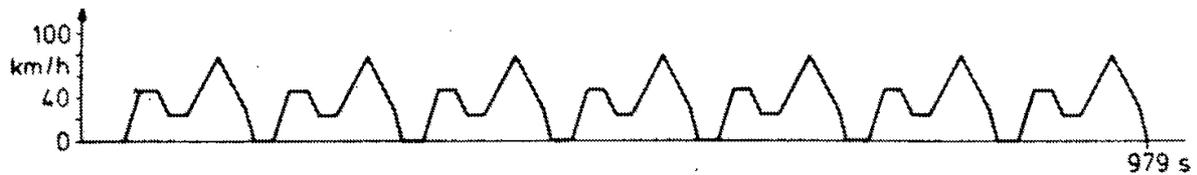


Figure 3.1 : Cycle 7 modes californien

caractérisation de onze modes de fonctionnement (niveaux de vitesse et d'accélération) assortis de coefficients de pondération et le développement du cycle californien 7 modes (figure 3.1, [Kruse, 1973]).

3.2.2 - Caractérisation des cycles de conduite au travers de distributions statistiques

A partir de données enregistrées à bord d'un véhicule sur un itinéraire en ville, banlieue et voies rapides dans la région de Pittsburgh, en Pennsylvanie (75,6 km, vitesse moyenne 35,4 km/h), les auteurs cherchent à valider l'hypothèse que les trois variables: vitesse du véhicule, accélération et pente de la route suivent une loi de distribution multi-normale, et peuvent être assimilées indépendamment à des lois normales. Cette propriété permettrait de décrire les cycles longs et complexes sous forme de distributions et donc d'un nombre limité de paramètres [Beckley, 1969].

La mesure du gradient de la route utilise un système détecteur de position angulaire, pour lequel un élément chauffant génère un flux vertical de convection thermique des molécules d'un gaz situé dans une cellule. Un élément récepteur (résistance thermosensible) est situé en regard de l'élément chauffant. La quantité de chaleur reçue par le récepteur est fonction de l'inclinaison de la cellule (elle est maximale quand le récepteur est à la verticale de l'émetteur) ; le système est solidaire du véhicule.

Les variables enregistrées en analogiques sont échantillonnées à 8 Hertz, puis on calcule les valeurs moyennes par seconde. L'accélération est calculée à partir de la vitesse, plus précisément sur 8 valeurs mesurées centrées autour du point (différence des vitesses moyennes calculées sur 4 points).

La vitesse, variable positive et à forte densité autour de zéro nécessite des transformations. On considère finalement le carré du logarithme de la vitesse (figure 3.2), et on exclut les données à vitesse nulle (phase d'arrêts), ce qui améliore le caractère gaussien des distributions du gradient et d'accélération (diminution du pic à accélération nulle, et élimination de valeurs redondantes du gradient lors de l'arrêt). Sur cette base, on calcule les paramètres de la distribution multinormale (à 3 dimensions), et on vérifie par un test du Khi-deux l'adéquation de la distribution multinormale à la distribution des données enregistrées (après mise en 64 classes équiprobables).

L'expression de la distribution précédente sera ensuite utilisée pour calculer la puissance motrice instantanée en chaque point d'un cycle, pour l'évaluation de l'autonomie du véhicule,

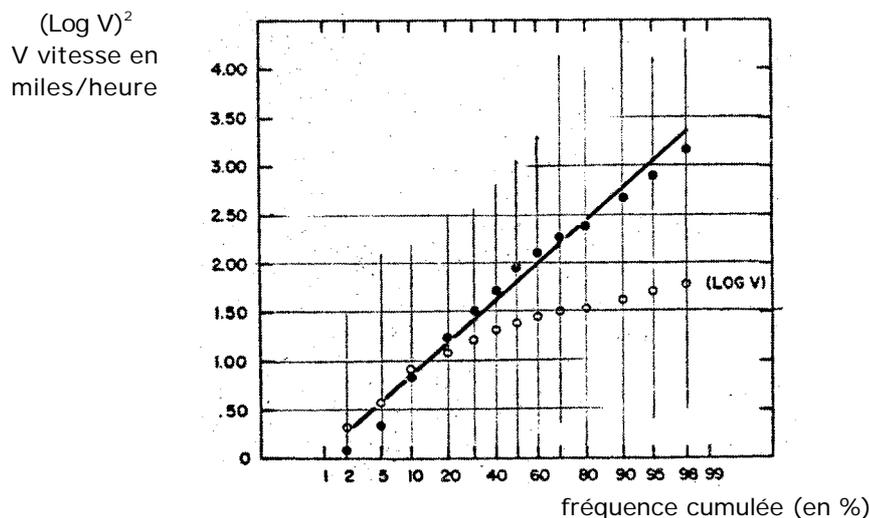


Figure 3.2 : Transformation de la vitesse en vue de normaliser sa distribution statistique - ici : distribution marginale de: $(\log (\text{vitesse}))^2$ et $\log(\text{vitesse})$

voire pour analyser l'incidence du comportement de conduite, des conditions de circulation, et en particulier l'influence du cycle sur les émissions de polluants.

On retiendra de ces travaux la nature et les lois de distributions que suivent les variables (en particulier la non normalité de la vitesse) et la faisabilité de la réduction d'un cycle de conduite en une distribution multinormale (l'intérêt de cette transformation par rapport aux émissions de polluants n'est cependant pas démontré). On notera que c'est une des rares études qui s'intéresse à la pente de la route, paramètre qui conditionne cependant largement la consommation et les émissions de polluants des véhicules.

3.2.3 - Construction du cycle urbain américain

En 1960, les autorités californiennes identifient le trajet domicile - travail du matin, comme responsable de la plus forte contribution au développement de smog sur la ville de Los Angeles. Pour caractériser ce déplacement [Kruse, 1973], on enregistre les conditions de fonctionnement de quelques véhicules, sous forme de distributions croisées en fonction du temps des variables régime moteur - dépression à l'admission. On conclut à l'insuffisance de ces enregistrements car l'aspect chronologique des événements (accélération, décélération, croisière) est perdu.

Parallèlement, les autorités californiennes mènent des investigations en vue de caractériser la circulation de Los Angeles, sélectionnent un ensemble de segments de rues et définissent un itinéraire représentatif du trajet domicile - travail du matin (LA4). On met également en avant qu'un profil réel de vitesse ne se réduit pas seulement à des modes principaux moyens (stabilisé, accélération et décélération de niveaux constants) mais contient aussi des variations transitoires, responsables de surémissions. On mesure en continu à bord d'un véhicule la vitesse, le régime moteur et la dépression à l'admission. Six itinéraires sont enregistrés, dont l'analyse conduira au développement de la réglementation américaine actuelle.

On calcule sur les 6 parcours certains paramètres moyens tels que la durée totale et à l'arrêt, la vitesse moyenne, la vitesse maximale, le nombre d'arrêts, etc., et on sélectionne l'enregistrement le plus "proche" de la moyenne (celui dont les caractéristiques moyennes ci-dessus étaient le plus souvent proches des valeurs moyennes calculées sur l'ensemble).

Par ailleurs on se réfère à une enquête donnant la longueur moyenne des trajets à Los Angeles pour réduire de 20 à 12 km l'enregistrement sélectionné. La réduction est effectuée par découpage du parcours en segments entre arrêts, analyse des caractéristiques de ces segments (vitesses maximale et moyenne, durée, distance), regroupement des segments "semblables" selon leur forme et élimination de profils "semblables" (1 sur 3 environ), réduction de la portion "freeway" (voie rapide), réductions et répartitions des durées et nombres d'arrêts selon les distributions observées. Le cycle est finalement l'objet d'une limitation des accélérations à basse vitesse, selon les prescriptions des constructeurs automobiles et fabricants de banc d'essai (1,5 m/s²).

Le cycle est évalué par comparaison des distributions par mode (accélération, décélération, croisière) du cycle et de l'itinéraire LA4, et par comparaison - entre le cycle final et le cycle avant réduction - des émissions de CO, CO₂, et HC, mesurées sur banc d'essai sur 5 véhicules (figure 3.3). Bien que les corrélations entre les valeurs d'émissions (cycle réduit et avant réduction) soient bonnes, on observe des écarts de plus de 10%.

Ce cycle a été décomposé en deux phases, la première démarrée moteur froid (cycle US FTP72). Cette phase a finalement été répétée en fin du cycle, après 10 mn d'arrêt, moteur chaud. Les trois phases constituant ce nouveau cycle (US FTP75) sont comptabilisées séparément et affectées de coefficients de pondération, pour tenir compte d'une moyenne de 4,7 démarrages par jour aux États-Unis [Degobert, 1992]. Ce cycle actuellement en vigueur aux États-Unis, l'est également dans certains autres pays avec certains ajustements pour tenir compte de particularités locales (climatiques ou autres).

Ces travaux s'appuient sur des études préalables de caractérisation des trajets, de leur

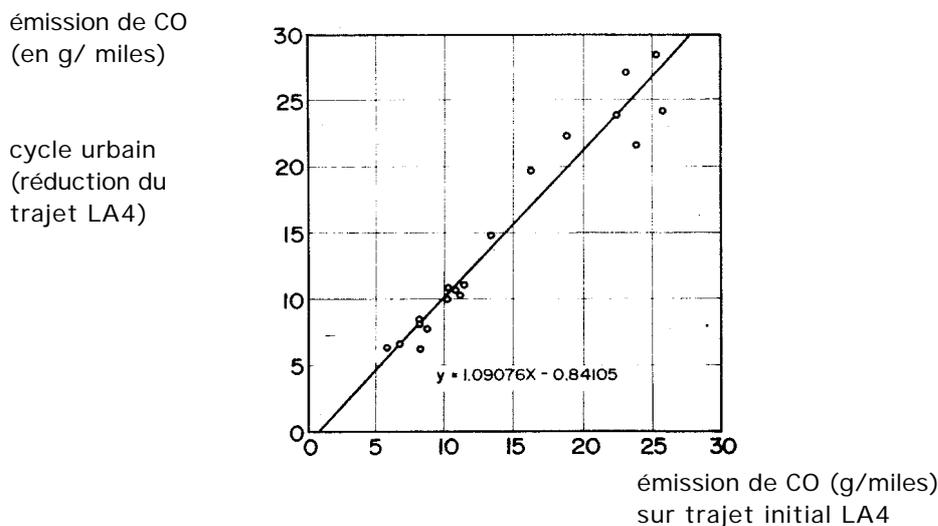


Figure 3.3 : Validation de la méthode de réduction du parcours par la comparaison des émissions de polluants sur le cycle et sur le parcours initial

répartition horaire, et de la structure urbaine de la ville de Los Angeles, qui concluent en particulier à l'importance prépondérante du trajet domicile - travail heure de pointe du matin,

Ils concluent à la nécessité d'enregistrements en continu et de la prise en compte des transitoires, remettant en cause les cycles par modes. Les analyses s'appuient sur une caractérisation des segments entre arrêts, mais un ajustement arbitraire des accélérations affecte sans doute la représentativité des courbes de vitesse. On introduit des coefficients de pondération pour tenir compte du nombre moyen de démarrages d'un véhicule et surpondérer les émissions à froid.

3.2.4 - Cycle Européen proposé par Volkswagen

Des travaux ont été menés en Europe, en vue d'adapter le cycle précédent aux conditions européennes [Kühler, 1978]. Ils s'intègrent dans un vaste projet de recherche comparant systématiquement les différentes procédures (européennes, japonaises et américaines) et techniques (matériels de prélèvement, d'analyse, etc.) de mesure et de contrôle des émissions [Klingenberg, 1977].

On analyse les conditions de circulation en Europe, à partir de données de conduite enregistrées par les différents constructeurs automobile européens sur sept itinéraires (à Turin en Italie, Versailles, Londres et Stuttgart, [C.C.M.C., 1977]), sélectionnés sans consultation préalable, mais suffisamment diversifiés ("centres historiques urbains", "voies encombrées en zone résidentielle", et des voies de "collines"). Les véhicules instrumentés proviennent des gammes respectives des constructeurs. Ils sont conduits par des "conducteurs professionnels et non professionnels", avec des consignes de type "conduite normale", et dans certains cas "souple" ou "sportive". Les données sont analysées globalement.

Les véhicules de gamme moyenne sont sous-représentés, mais les auteurs estiment que ce fait doit faiblement affecter les résultats, car «les conditions de circulation en zone urbaine sont principalement déterminées par la densité du trafic et la topographie de la route, et faiblement influencées par le type de véhicule». Sur des considérations "de bon sens", on sélectionne une base d'enregistrements représentatifs de la conduite urbaine (exclusion d'itinéraires utilisant les "voies rapides" ou effectués de nuit en trafic fluide).

On définit les critères les plus pertinents de description des conditions de conduite : vitesse moyenne globale et hors arrêts, accélération et décélération moyennes, distance moyenne entre arrêts successifs, nombre de changements accélération - décélération entre arrêts, durées relatives (en %) à l'arrêt, en accélération, à vitesse stabilisée ($a > 0,1 \text{ m/s}^2$) et en décélération.

Ces critères sont calculés et comparés pour les différents cycles normatifs existants et les données enregistrées à bord des véhicules. On distingue en particulier *la conduite moyenne* (incluant l'ensemble des expérimentations) et la conduite *en centre-ville* (l'un des itinéraires seulement).

Les vitesses moyennes des cycles FTP72 et japonais 11 modes correspondent à la conduite moyenne, les vitesses des cycles Européens et japonais 10 modes correspondent aux conditions de centre-ville. Ces deux derniers cycles sont satisfaisants quant à la proportion à l'arrêt, mais pas quant à la durée moyenne des arrêts. La proportion à vitesse stabilisée du cycle Europe est trop élevée, les durées des phases de roulage sont trop courtes par rapport à la conduite moyenne, et trop longues par rapport à la conduite en centre-ville.

La fréquence des changements accélération - décélération est le paramètre le moins bien décrit par l'ensemble des cycles. Les valeurs d'accélération moyennes sont sensiblement plus faibles que dans la réalité.

Les auteurs concluent que «Le cycle FTP72 reflète assez bien les conditions moyennes de circulation rencontrées dans les villes européennes, tandis que le cycle Européen est inadéquat», et jugé «largement insatisfaisant pour quasiment tous les paramètres décrits, mais certains de ceux-ci le rapprochent des conditions de centre-ville historique».

On propose ensuite des modifications mineures au cycle américain pour l'adapter aux conditions européennes: diminution de la durée totale par suppression de certains segments, ajustement des durées à l'arrêt, etc. La visualisation graphique des distributions croisées: vitesses - accélérations instantanées en fonction du temps, sous forme de courbes enveloppant les niveaux de durée passée (50%, 75% et 90% de la durée totale, figure 3.4) permet une comparaison de visu des différents cycles, des conditions de circulation sur différents itinéraires et du cycle proposé.

Ces travaux s'appuient sur une large base d'expérimentation mais qui ne répond pas à des critères de représentativité très rigoureux. Les analyses concluent en particulier à l'inadéquation

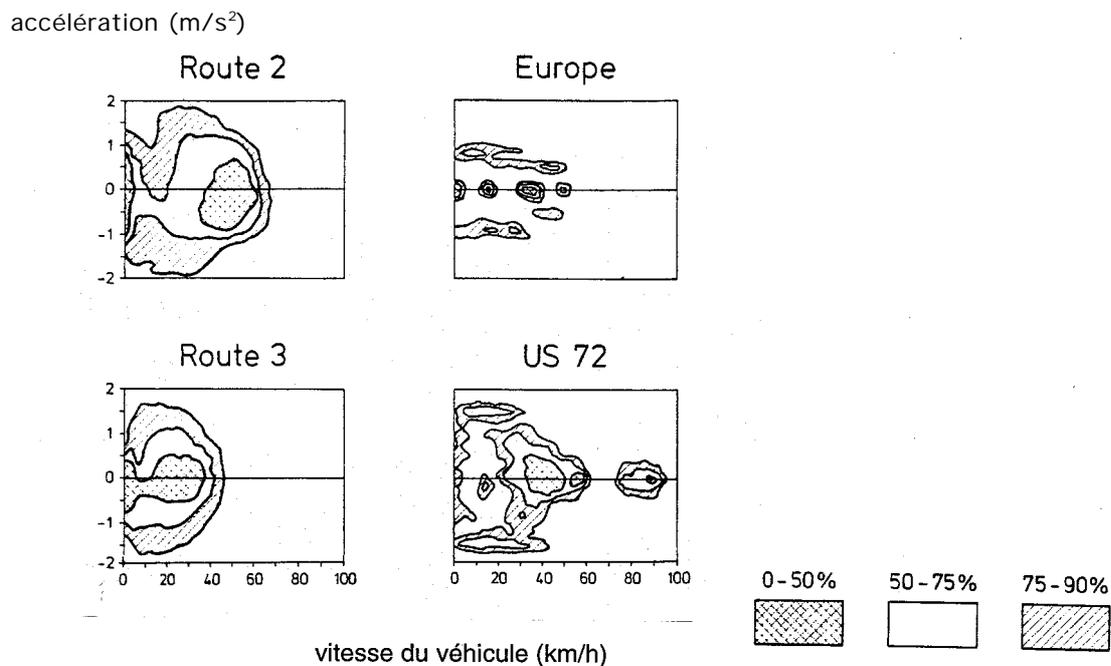


Figure 3.4 : Validation des cycles de conduite par comparaison des distributions croisées des vitesses et accélérations instantanées obtenues lors des expérimentations (route 2 et 3) et celles des cycles réglementaires européen et américain [Kühler, 1978]

du cycle Européen et voient dans l'utilisation d'un cycle américain même adapté, le moyen de favoriser le rapprochement et la comparaison des réglementations. On retiendra la définition des critères de description des cycles et la validation par comparaison des distributions croisées des vitesses et accélérations qui sera retenue lors de nombreux autres travaux.

3.2.5 - Cycles anglais pour la mesure de la consommation

Les auteurs appuient leurs travaux sur la nécessité de cycles représentatifs :

- les mesures sur route sont coûteuses et longues et le trafic introduit une variabilité considérable, impliquant des analyses lourdes a posteriori,
- la réduction de données enregistrées à bord de véhicules permet - par le développement de cycles d'essais représentatifs et relativement simples - d'éliminer une partie de cette variabilité,
- les cycles existants ont été le plus souvent créés pour la mesure des émissions de polluants, puis utilisés pour la mesure de la consommation,
- des écarts importants ont été souvent mentionnés entre les consommations mesurées lors de ces tests et celles mesurées par les "utilisateurs", écarts attribués pour partie à la "représentativité insuffisante des cycles par rapport aux conditions de conduite".

Les auteurs proposent une procédure permettant de reproduire en un ou plusieurs tests courts et reproductibles, les paramètres significatifs ou importants de la consommation de carburant [Hughes, 1988].

Deux véhicules "représentatifs" du parc national sont instrumentés et circulent sur 58 itinéraires sélectionnés sans prétendre à une représentativité nationale. On mesure la vitesse du véhicule, le régime moteur, le couple sur l'arbre de transmission, la consommation, l'action sur les freins et l'embrayage, le point-mort et diverses informations (vitesses limites, etc.). Mille déplacements sont enregistrés représentant 21 000 kilomètres. Les 2 conducteurs respectent des consignes de conduite: "voiture flottante" dans le trafic, équilibre du nombre des véhicules "dépassants" et "doublés", respect de la vitesse limite en l'absence de trafic (cf. figure 3.5).

Après lissage et corrections, les données sont stratifiées en 9 "groupes ou zones de conditions homogènes" (selon les 5 niveaux de limitations de vitesse, la zone - urbaine, rurale -, et le type de voies rapides), puis séparées en phases d'accélération, de croisière et de décélération. On analyse ces modes de fonctionnement et les transitions entre ces modes.

Des cycles sont générés par simulation aléatoire de la courbe vitesse en fonction du temps, selon les distributions (densité de probabilité) des différents modes et des transitions. La validation des cycles se fait par comparaison des distributions des vitesses et des accélérations avec celles des données originales et par comparaison des estimations des quantités d'énergie en phases motrices et de freinage (décélération).

Les auteurs constatent que les stratégies de changement des rapports de boîte de vitesse sont un facteur prépondérant de la consommation d'énergie (et des émissions) et proposent quelques

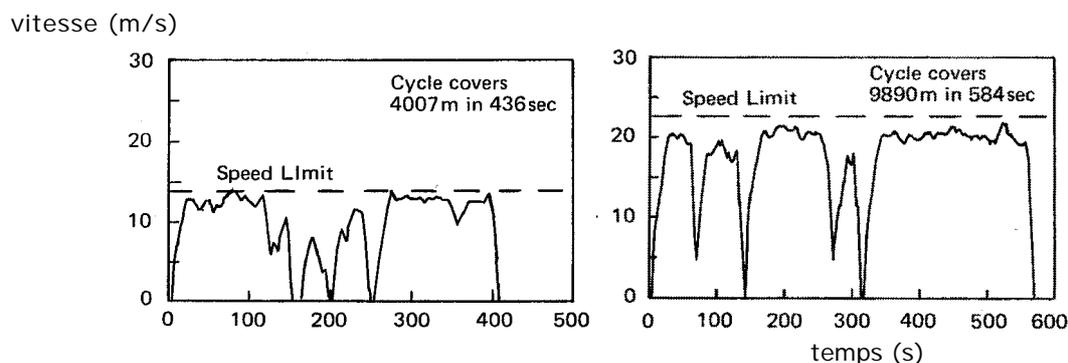


Figure 3.5 : Cycles de conduite développés à partir de données de conduite tenant compte des limitations de vitesse

règles simples basées sur l'observation : la vitesse moyenne pour "monter" un rapport est proche de la moyenne géométrique des vitesses à couple moteur maximal des 2 rapports adjacents (sauf contraintes liées par exemple aux limitations de vitesse) ; les vitesses médianes de rétrogradage sont proches de la limite basse de fonctionnement stable du moteur dans le rapport supérieur. Au delà de ces règles simples, les dispersions sont telles qu'un algorithme complexe devrait être envisagé pour prétendre à une certaine représentativité.

Le nombre limité de véhicules, les conducteurs "professionnels" et les "consignes de conduite" sont les principales faiblesses de ces travaux. Néanmoins, on remarquera le principe d'une génération aléatoire de la courbe de vitesse en fonction du temps, à partir des distributions des différents modes, des transitions entre ces modes et la prise en compte des stratégies de changement des rapports de boîte de vitesse.

3.2.6 - Cycle - "empreinte" de la ville

Les auteurs remarquent que l'élaboration de cycles de conduite se fait généralement sur des considérations de trafic seulement, sans référer à un contexte urbain plus large, et que l'on envisage en conséquence des économies d'énergie ou une réduction des nuisances au travers d'optimisations, d'améliorations (par la régulation, etc.) du réseau routier seulement. Ils concluent à la nécessité d'une approche systémique, s'appuyant sur le concept d'écologie urbaine ("Urban Ecology", [Berry, 1977]), c'est à dire l'étude des différentes caractéristiques (forme et fonction) d'une ville considérée comme un système. On s'intéresse d'abord à décrire et comprendre la structure urbaine (réseau de voiries, congestion, disponibilité des transports publics, mais aussi facteurs socio-économiques, etc.) comme élément principal de caractérisation de la conduite [Kenworthy, 1992].

3.2.6.1 - Caractérisation de la ville

La caractérisation de zones homogènes dans la ville et les cycles représentatifs de ces zones doit permettre d'analyser les modes de conduite en fonction de la structure de la ville, et de déboucher sur des politiques de planification des transports en vue d'économies d'énergie ou de réduction des nuisances. L'approche concerne Perth, sur la côte ouest de l'Australie

On identifie les caractéristiques qui sont sûrement liées aux conditions de trafic: facteurs socio-économiques (population, nombre de véhicules immatriculés, revenus des ménages), facteurs d'utilisation de l'espace (aire totale, aire urbanisée, distance au centre urbain, nombre d'habitations), voirie disponible (longueur totale des routes principales), congestion (en kilomètres x véhicules sur les routes principales), disponibilité des transports publics (longueur des lignes et service en kilomètres), et utilisation modale des transports (répartition des trajets domicile travail et autres selon les modes : transports publics, voiture, marche à pied, vélo).

Ces variables sont réduites (par personne, par unité de surface, etc.). L'ensemble des données permet d'élaborer une typologie des 38 zones postales de la ville en 6 classes significativement différentes. La description typologique des quartiers de la ville permet de tirer quelques conclusions intéressantes:

- à densité urbaine élevée correspondent également congestion et disponibilité des transports en commun élevées,
- les trajets domicile - travail concernent les heures de pointe, les autres trajets concernent les heures creuses,
- le statut socio-économique est bien décrit par le revenu et la propriété de véhicules, le nombre de véhicule(s) par personne est lié à la nature (commerciale, centre d'affaires, etc.) de la zone,
- la "quantité" de réseau routier n'est pas un facteur significatif de la classification, bien que cette variable ait souvent été utilisée pour la sélection de routes lors du développement de cycles.

3.2.6.2 - Enregistrement des conditions de circulation

Le découpage précédent permet une sélection de 12 itinéraires représentatifs des 6 zones types, incluant les différents types de routes proportionnellement aux statistiques de la zone. Un 13ème itinéraire est conçu comme représentatif de toute la ville. Il ne s'agit pas de représenter des "trajets réels" qu'effectueraient les conducteurs, mais plutôt de "caractériser les différents facteurs propres à une zone donnée, pour déterminer les conditions de conduite". Dans ce but, les itinéraires représentatifs ont été définis à partir de la répartition des kilométrages journaliers effectués par les véhicules en fonction des types de voies et des zones de la ville, et des données de trafics moyens journaliers.

Un véhicule est instrumenté et conduit dans chacune des zones sur ces itinéraires entre 7h et 19h [Newman, 1992], avec la technique de la "voiture suiveuse" (chase car technique), technique évaluée et considérée comme satisfaisante pour mesurer les conditions de conduite par [Johnson, 1975] (cf. également chapitre 2). Trois mille kilomètres sont enregistrés au travers de la ville.

3.2.6.3 - Méthodes de construction de cycle

Une première méthode de simulation de cycles est testée, par génération aléatoire d'une courbe vitesse / temps [Lyons, 1986], au travers de la distribution croisée des vitesses et accélérations (probabilité d'occurrence des 2 variables lors des mesures enregistrées). Cette méthode permet

d'être globalement représentatif de l'ensemble des conditions rencontrées dans chaque zone et à chaque période. Les avantages et limites de cette méthode sont décrits en particulier dans [Kenworthy, 1986] qui mentionne les précautions suivantes :

- il n'est pas pertinent d'inclure les périodes à l'arrêt dans la distribution croisée. La prise en compte de ces périodes et des accélérations initiales après ces périodes est résolue séparément par la simulation aléatoire de deux distributions correspondantes,

- il n'existe a priori pas de critère pour se déplacer dans la matrice, c'est-à-dire pour spécifier comment vitesse et accélération s'enchaînent seconde après seconde en situation de conduite. Les auteurs écartent une simulation de type "sélection de la valeur la plus probable". Ce type de simulation présente en effet l'inconvénient d'accumuler en début de simulation les événements les plus fréquents et de reléguer en fin les plus rares. Ils préfèrent une simulation aléatoire basée sur la distribution cumulée, qui permet de répartir les événements à faible probabilité tout au long de la simulation,

- enfin, une analyse montre que le taux de changement des accélérations (la dérivée de l'accélération) tend vers zéro, c'est à dire, que lorsqu'un véhicule commence un mouvement d'accélération, ou de décélération, il y a une forte tendance que ce mouvement se poursuive. Les forts changements en accélération ou en décélération sont rares. Les auteurs préconisent donc un maintien de "statut-quo" dans la simulation aléatoire, c'est-à-dire que lorsque un mouvement d'accélération est commencé (selon l'accélération simulée), on tente d'abord de préserver ce niveau d'accélération, si cela est compatible avec les probabilités observées.

Cependant, les auteurs [Newman, 1992] préfèrent à la méthode précédente, la sélection d'enregistrements représentatifs (choix de "parcours" proches du parcours moyen) pour chaque zone, chaque période et globalement, en respectant les variables suivantes : vitesse moyenne, nombre d'arrêts au kilomètre, énergie cinétique positive, écart type de l'accélération, durée au ralenti et distribution des vitesses.

De la description de ces paramètres il ressort que la zone géographique est un facteur de plus grande variation que l'horaire. La construction de cycles représentatifs de chaque zone et chaque période se fait par le choix de "parcours" proches du parcours moyen de la zone, et de même l'élaboration de cycles représentatifs de la ville. La ville de Perth apparaît être relativement peu congestionnée : la vitesse moyenne de circulation est supérieure à 40 km/h, indépendamment de la période, et varie peu avec celle-ci. Les durées relatives à l'arrêt représentent entre 10 et 15% seulement. D'un point de vue méthodologique, il est regrettable que Perth n'inclut des quartiers "congestionnés", ce qui aurait permis de valider la méthode pour ce type de conditions.

3.2.6.4 - Le cycle de conduite en tant qu'empreinte de la ville

Les auteurs développent ensuite l'hypothèse que les cycles peuvent être considérés comme "empreintes" de la ville, et proposent de mettre en évidence les relations entre la courbe vitesse en fonction du temps et les caractéristiques décrivant la zone en terme de moyens de transport et d'occupation de l'espace. Dans ce but, les cycles sont envisagés en tant qu'expression

d'"événements du trafic urbain": événements liés aux intersections (obstacles primaires physiques au mouvement libre), événements liés à l'interaction entre véhicules (restrictions au mouvement par le nombre de véhicules, cf. figure 3.6). Ces événements sont mesurés par deux méthodes :

- à partir de données "de la rue" (densité de circulation, congestion, nombre de véhicules par heure, vitesses moyennes enregistrées sur les sections, nombres et types d'intersections)

- à partir de données enregistrées à bord de véhicules (par analyse des courbes de vitesse, en fonction des changements de modes de fonctionnement, des variations fortes de la vitesse, arrêts, etc.) :

- on considère 2 profils types d'événements liés à l'interaction des véhicules:

- a) le véhicule démarre, atteint une faible vitesse avant de s'arrêter de nouveau (embouteillages, files d'attente);

- b) décroissance de la vitesse par baisses successives de faible amplitude (moins de 33%), attribuée à l'interaction des véhicules, sans arrêt à intersection, ou à une intersection sans trop de trafic, feu vert par exemple;

- les événements liés aux intersections correspondent quant à eux à de fortes variations de la vitesse (plus de 33%), jusqu'à l'arrêt ou presque (intersections contrôlées, etc.). En trafic extrêmement congestionné, ces profils peuvent être liés à l'interaction avec d'autres véhicules, mais sont alors isolés, suivis d'une série d'événements courts (type a précédent).

Les autres "événements", (variations plus faibles de vitesse) sont attribués à la route (configuration topographique), à de faibles interactions avec les autres véhicules, et au comportement du conducteur, et sont considérés comme un "bruit inévitable". Une vérification

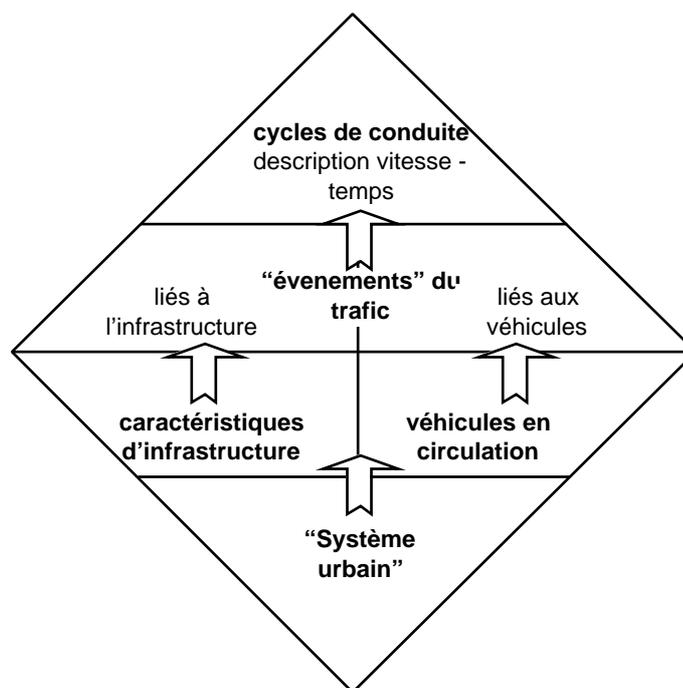


Figure 3.6 : Modèle "écologie urbaine et conditions de circulation"

expérimentale de la définition de ces événements semble avoir été satisfaisante.

On mesure de fortes corrélations entre les ensembles de paramètres définis précédemment, démontrant ainsi la pertinence des variables et de l'approche "écologie urbaine" pour analyser les caractéristiques de circulation.

On retiendra l'approche tout à fait originale de ces travaux, s'appuyant notamment sur la classification des zones géographiques selon les paramètres caractéristiques urbains. Les auteurs posent les bases d'une "théorie de la circulation urbaine" qui lierait densité d'activité, intersections, nombres de véhicules, et courbes caractéristiques vitesse - temps (ou cycle de conduite), et concluent que la congestion ne peut être résolue simplement par l'amélioration du réseau et l'organisation du trafic.

Cette approche conduit à définir six villes dans la ville, pour lesquelles des solutions différentes sont à trouver pour des problèmes différents de transports. Les paramètres "utilisation de l'espace" sont prépondérants par rapport aux paramètres "socio-économiques" (souvent utilisés dans les modèles de prédiction des transports). Les données de type "débit de trafic" présentent un faible intérêt (bien que souvent utilisées dans les approches traditionnelles d'organisation du trafic). Les paramètres qui semblent les plus importants sont la distance au centre-ville, et l'intensité d'activité (population, travail et disponibilité des transports).

Des concepts originaux sont développés lors de cette étude (écologie urbaine, mesures d'événements liés aux véhicules et aux intersections, etc.), qui s'appuie sur de nombreuses sources statistiques (structure du réseau routier, répartition des kilométrages, population, transports, etc.). Ces travaux font largement appel aux techniques de l'analyse des données (classification des zones géographiques, analyses factorielles, régression multiple) et envisagent différentes méthodes de génération des cycles, et notamment une approche critique de la méthode utilisant une simulation aléatoire.

3.2.7 - Cycle autoroutier

Ces travaux font partie d'un vaste programme de recherche sur les émissions de polluants sur autoroute («Abgas-Grossversuch», [Meier, 1986]). Des expérimentations lourdes ont été menées pour caractériser les conditions de conduite et développer des cycles de conduite autoroutiers, puis mesurer les émissions de polluants des véhicules et évaluer l'incidence de limitations de la vitesse.

Les expérimentations concernent 20 sections d'essai (de 25 à 40 km chacune) représentatives du réseau autoroutier allemand. Trente voitures ont été instrumentées. Les conducteurs sélectionnés devaient observer une "consigne de vitesse ou vitesse souhaitée" (par exemple 110 ou 140 km/h). Ces essais représentent de l'ordre de 600 000 km. D'autre part, un véhicule équipé d'un radar a permis de mesurer la vitesse réelle de véhicules suivis de manière aléatoire (selon des distributions de types et classes de véhicules). Cette méthode a permis d'enregistrer de l'ordre de 100 000 km. Par ailleurs des systèmes de mesure de la vitesse des véhicules au passage (vidéo,

etc.) ont été utilisés pour mesurer la vitesse du trafic, et la distribution des vitesses selon les types de véhicules en certains points du réseau

On utilise une simulation statistique dite Méthode de "Monte-Carlo", pour simuler, à partir de la vitesse V_i au temps t_i , l'accélération probable a_i , selon la distribution cumulée observée des accélérations correspondant à la classe de vitesse considérée.

De fait, on considère des distributions de probabilité vitesse - accélération pour le croisement des catégories suivantes :

- 2 itinéraires (R130 et T100) correspondant à des "recommandations" de vitesse limite (130 et 100 km/h),
- la "charge" de la route: caractérisée par l'intensité de circulation, le débit de poids-lourds, la largeur des voies, résumée en 4 classes de difficulté croissante de circulation,
- la pente de la route en trois classes (horizontal: de -1 à +1%, ascendant, ou descendant),
- le type de véhicule (véhicules à essence faiblement, moyennement, ou fortement motorisés, et véhicules Diesel).

On construit les cycles par type de véhicule, par itinéraire, et selon la pente et la densité de circulation pour une durée de 900 secondes, en 1, 2 ou 3 éléments de durées (900, 450 ou 300 secondes). Ces éléments correspondent à différents niveaux moyens de vitesse selon les catégories de véhicules: niveaux bas de 100 ou 110 km/h, niveaux moyens atteints par les véhicules de gammes moyennes et hautes: 140 et 120 km/h, et niveaux hauts ne concernant que les véhicules puissants: 170 et 150 km/h. Ces éléments sont reliés par des rampes permettant de passer d'un niveau de vitesse à l'autre.

L'objectif final étant de mesurer des "facteurs d'émissions" sur chacun des modes de fonctionnement décrits par les cycles correspondants, il n'y a pas ici à proprement parler de souci de représentativité. Celle-ci relève d'autres aspects de l'étude, que sont la description du réseau autoroutier et la composition du parc, établis ailleurs. On construit en conséquence un ensemble de cycles correspondant à des situations différentes, et de fait gradués en niveaux de vitesse moyenne (figure 3.7).

Une conclusion marginale mais intéressante de ces travaux concerne la comparaison des méthodes de mesure des vitesses de circulation : les vitesses mesurées par la technique du véhicule suiveur présentent des variations beaucoup plus importantes sur un même itinéraire (fluctuations de l'ordre de 20 à 30 km/h) que celles mesurées lors des tests avec une consigne de vitesse (écarts de l'ordre de 10 km/h), trop stables pour être réelles (cf. figure 2.1). Ceci démontre les limites des "consignes de conduite".

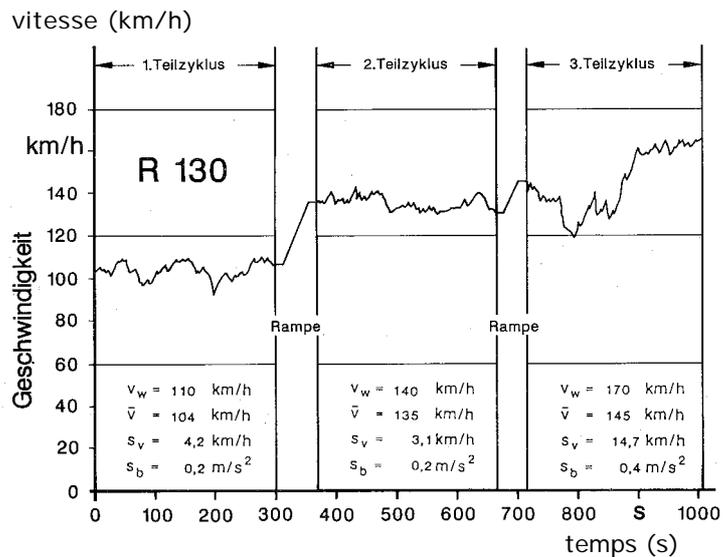


Figure 3.7 : Cycles autoroutiers en 3 parties correspondant à une infrastructure limitée à 130 km/h, par niveaux de vitesse et rampe intermédiaires [Meier, 1986]

3.2.8 - Méthodologie statistique pour l'analyse des cinématiques

Ces travaux constituent une démarche originale en vue d'une connaissance plus précise de la structure des déplacements des véhicules devant permettre « une reconstruction précise des effets additifs engendrés par un déplacement » en particulier la consommation de carburant [Crauser, 1989], [Maurin, 1990]. Ces travaux s'appuient sur une base d'enregistrements effectués à bord de 35 voitures privées françaises [André, 1987].

Les "séquences cinématiques" entre arrêts, constituées d'une phase de ralenti suivie d'une phase de roulage, sont décrites par les variables suivantes : durée de la séquence, durée au ralenti, distance parcourue, vitesse moyenne et vitesse maximale atteinte, nombre d'extrêmes au cours de la séquence, durée relative à vitesse stabilisée, et un histogramme en 4 classes des vitesses instantanées.

Une Analyse en Composantes Principales suivie d'une classification des séquences permet d'établir une typologie caractérisant des comportements cinématiques contrastés. Les auteurs montrent la pertinence du découpage en classes par rapport aux consommations mesurées. On sélectionne ensuite des séquences dans chaque classe selon certains critères de représentativité et en niveaux croissants de vitesse pour constituer un ensemble de cycles, utilisés ensuite pour la constitution d'une base de facteurs d'émissions de polluants du parc de voitures en circulation [Joumard, 1990].

La juxtaposition de séquences en niveaux croissants de vitesse ne repose sur aucune considération statistique, et ne trouve sa justification que d'une part dans l'usage d'exprimer les émissions de polluants en fonction de niveaux de vitesse moyenne, d'autre part dans l'hypothèse d'additivité des séquences par rapport aux effets négatifs de la circulation. Cette hypothèse pourrait être justifiée en ce qui concerne la consommation de carburant (hormis les conditions

particulières du démarrage à froid et de mise en température du moteur), mais plus difficilement en ce qui concerne les émissions de polluants.

La deuxième partie de ces travaux concerne l'analyse des trajets en terme de succession de séquences. Une approche de type probabiliste (probabilités des successions des différents types de séquences) n'est pas satisfaisante en raison de l'hétérogénéité de la structure séquentielle des déplacements. On établit une typologie des trajets, décrits par les nombres de transitions entre les différents types de séquences, puis soumis à une classification, en trois classes principales : les trajets à prédominance urbaine, et ceux représentatifs des circulations routière et autoroutière.

Une méthode de validation de la classification est proposée à partir de la technique de ré-échantillonnage (bootstrap). On extrait des échantillons des données initiales, qui sont soumis aux mêmes analyses, puis on analyse la stabilité de certains indicateurs statistiques (valeurs propres, contributions des modalités, etc.) et définit des intervalles de confiance.

Ces travaux posent des bases méthodologiques très innovantes pour la caractérisation des conditions de circulation et des déplacements. L'élaboration de cycles de conduite ne s'appuie que partiellement sur ces bases, puisqu'elle néglige la typologie des déplacements. L'hypothèse d'additivité des séquences par rapport aux effets négatifs de la circulation semble être justifiée en ce qui concerne la consommation de carburant (hormis les conditions particulières du démarrage à froid et de mise en température du moteur), mais plus difficilement en ce qui concerne les émissions de polluants.

3.2.9 - Cycles urbains européens

Ces travaux se sont appuyés sur les bases méthodologiques précédentes pour la construction de cycles de conduite représentatifs des conditions de circulation Européennes. Les données concernaient 58 véhicules instrumentés, 8200 trajets et 73,000 km enregistrés [André, 1989 et 1991b]. Chaque trajet est considéré comme une série de séquences cinématiques entre arrêts (période de ralenti suivie d'une phase de roulage), ce principe reposant sur l'hypothèse que les conditions de circulation sont relativement homogènes au cours d'une telle séquence.

La sélection de variables descriptives des accélérations (et notamment les coefficients de forme des distributions des vitesses et accélérations instantanées) a permis une amélioration significative de la méthode initiale. L'Analyse en Composantes Principales permet d'identifier le niveau de vitesse et les accélérations comme facteurs principaux. Une typologie en 4 classes de conditions de circulation contrastées est obtenue par classification. Les trajets sont analysés en terme de fréquences des successions des différents types de séquences identifiés précédemment. Par analyse des correspondances simples (sur des fréquences) suivie de classification, on identifie trois types principaux de trajets caractérisés par leur composition en séquences des différents types.

Il est alors possible de construire des cycles représentatifs des trajets urbains et des conditions de circulation spécifiques. On détermine durée et distance du cycle pour satisfaire les distributions

observées. Un cycle consiste en la juxtaposition de séquences réellement enregistrées, sélectionnées aléatoirement pour reproduire les probabilités des successions des différents types et les distributions des coordonnées factorielles des séquences de ce type. Un ensemble de 14 cycles urbains est construit et utilisé pour établir des facteurs d'émissions européens [Jost, 1994]. Ces travaux ont été également prolongés par le développement d'un cycle court utilisable lors de procédures de contrôle technique des véhicules [André, 1994b].

Ces travaux se caractérisent également par le développement et l'utilisation d'un algorithme de sélection réaliste des rapports de boîte de vitesse. Cet algorithme détermine le rapport à utiliser en fonction des conditions de vitesse et d'accélération locales au cours d'un cycle, tout en tenant compte des caractéristiques techniques du véhicule (puissance, rapports de transmission) et des statistiques observées en conduite réelle. On reproduit ainsi les comportements des différents conducteurs lors des expérimentations, au travers des probabilités des changements de rapports en fonction du rapport engagé, du régime moteur et de l'accélération future [André, 1995].

A partir d'une large base de données de conduite en usage réel (la plus large parmi les cas analysés), et au travers de la typologie des trajets et des conditions de circulation, on obtient une description très détaillée des conditions de conduite européennes. L'analyse par découpage en séquences entre arrêts doit trouver ses limites pour la simulation de cycles autoroutiers (dont les séquences sont très longues). La prise en compte des stratégies de changement des rapports de boîte réellement observées permet certainement d'améliorer la qualité du cycle de conduite pour mesurer des facteurs d'émissions réels.

3.2.10 - Méthode de construction et validation de cycles

Les auteurs proposent une méthode, des outils et des critères de validation des cycles générés [Cohen, 1993], sans toutefois concrétiser leurs travaux par la construction de cycles. La méthode s'appuie sur une analyse des conditions de conduite en différents niveaux : trajets, séquences entre arrêts, modes de fonctionnement (accélération, décélération, ralenti, stabilisé), et vitesses instantanées.

La définition des modes: accélération, décélération, croisière est ici fonction du niveau de vitesse, ce qui permet de tolérer des fluctuations de $0,3 \text{ m} / \text{s}^2$ à 50 km/h en régime de croisière mais de considérer comme accélérations des niveaux de $0,12 \text{ m} / \text{s}^2$ à 110 km/h (cf. figure 3.8).

Les cycles sont générés par simulation de type « Monte-Carlo » (modèle de type « chaîne de Markov »), non sur les vitesses et accélérations instantanées, mais sur les distributions des segments modaux définis ci-dessus : un segment (ou mode) est sélectionné aléatoirement parmi ceux susceptibles de succéder au segment précédent, (niveaux de vitesse proches), et dont le type est le plus probable après le (les) type(s) précédent(s). On ajuste les vitesses entre les différents segments.

Un grand nombre de variables sont calculées à différents niveaux : global, séquences entre arrêts, et segments modaux, et comparées avec celles établies sur l'ensemble des données initiales

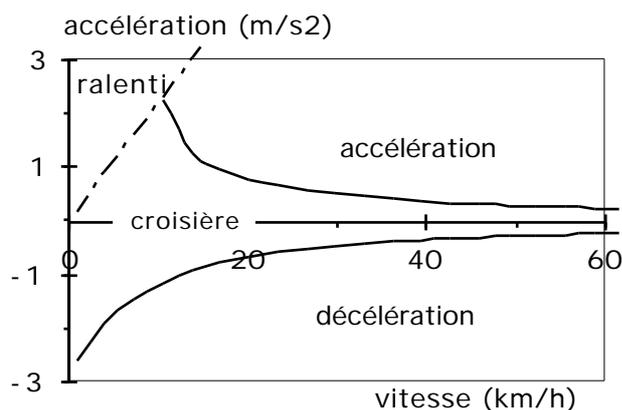


Figure 3.8 : Définition des modes de fonctionnement des véhicules légers [Cohen, 1993]

éventuellement corrigées pour construire un cycle "en complément" ou par exclusion de certaines conditions (exemple : cycle hors conditions du FTP75). Ces variables sont les durées, distances, nombre et durées d'arrêts, les vitesses moyennes et de roulage, les accélérations positives et négatives moyennes, les histogrammes des vitesses et accélérations, puissance spécifique moyenne, la distribution selon les modes ralenti, accélération, décélération, et les distributions croisées des vitesses et accélérations, ou à 3 dimensions des vitesses, accélérations et dérivées de l'accélération, etc. On définit empiriquement des seuils acceptables d'erreurs selon les cas. Pour les distributions croisées, on calcule la somme des différences entre les distributions. Ce critère sert ensuite à classer les cycles générés, et à choisir le plus satisfaisant.

L'approche peut permettre - moyennant certains filtres sur les données initiales - de construire un cycle "en complément" ou par exclusion de certaines conditions. Ceci permettrait de répondre à la problématique de l'EPA (Environmental Protection Agency) aux États-Unis de construire un cycle dit "hors FTP": pour des raisons de pérennité des résultats déjà acquis, on ne remet pas en question le cycle FTP75 lui-même, mais on tente de lui adjoindre un cycle complémentaire qui permette de couvrir les statistiques de fonctionnement sous-estimées par ce cycle (fortes accélérations, etc.).

On retiendra de ces travaux la définition "non linéaire" des modes, la décomposition en modes élémentaires plus courts que les séquences entre arrêts, qui permet une analyse plus fine, et notamment une meilleure description des conditions autoroutières dont les séquences sont très longues, et une intégration plus large de la diversité des comportements. Il conviendrait sans doute d'analyser la pertinence du très grand nombre de variables et critères d'évaluation. L'absence de concrétisation de ces travaux ne permet pas d'apprécier totalement la méthode.

3.2.11 - Cycles correspondant à une conduite contemporaine

Constatant que "les procédures actuelles ont 20 années d'âge et qu'elles ne permettent d'évaluer qu'un seul facteur d'émission correspondant à un usage moyen", les auteurs proposent de

constituer un ensemble de cycles réalistes, représentatifs des conditions de conduite sur autoroutes et voies urbaines [Effa, 1993].

Les données de base ont été enregistrées par la technique du véhicule "suiveur", équipé d'un dispositif de mesure de la vitesse d'un véhicule suivi, sur une centaine d'itinéraires représentatifs des déplacements sur 24 heures dans la région de Los Angeles, soit environ 2000 km [Austin, 1993]. En l'absence de véhicule à suivre, les données cinématiques du véhicule suiveur sont utilisées. Les données concernant réellement des véhicules suivis portent sur 80% de la conduite sur autoroute et 45% de la conduite sur grandes artères. Les données enregistrées sur les autoroutes et sur les voies urbaines sont analysées séparément.

On définit selon les cas des "segments" correspondant à "des changements significatifs de la densité du trafic" ou de la congestion, ou correspondant à des portions entre certaines intersections sur les voies urbaines. Les segments sur voies urbaines sont arbitrairement classés en 3 groupes selon leur niveau de vitesse uniquement. Les segments autoroutiers sont analysés selon des variables "sensibles aux fluctuations de la densité du trafic" (cf. figure 3.9) : l'écart-type de la vitesse, (faible à faible densité de circulation et à forte congestion, élevé lorsque le trafic est instable), la somme des variations absolues de la vitesse (rapportée à la distance parcourue et qui augmente continûment avec la densité de circulation), le coefficient de variation de la vitesse, et la durée relative au ralenti (liée particulièrement aux segments à basses vitesses). Sept classes sont ainsi identifiées par classification, en niveaux de congestion ou de densité et de vitesse moyenne croissants.

Les segments sont eux-mêmes décomposés en micro-segments définis comme suit:

- pour les conditions autoroutières ces événements sont les changements entre les différents

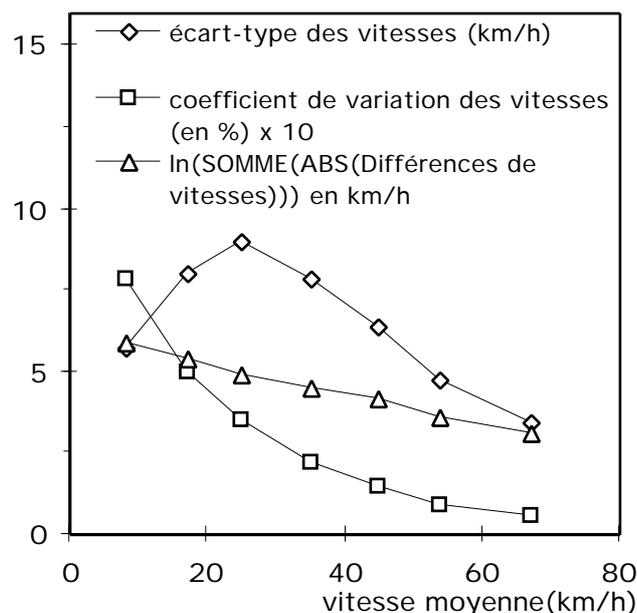


Figure 3.9 : Relations entre différentes variables descriptives de la densité de circulation [Effa, 1993]

modes accélération, décélération et croisière (identifiés lorsque l'accélération varie de plus de 0,44 m/s² par rapport à la moyenne calculée sur le segment ou mode en cours),

- sur voies urbaines, les événements de découpage en micro-segments correspondent aux intersections rencontrées.

On construit des cycles composites reposant sur les définitions précédentes, par simulation aléatoire d'une succession de micro-segments. Un cycle autoroutier débute à une vitesse correspondant à la moyenne des segments correspondants, et résulte d'une succession aléatoire de micro-segments dont la vitesse initiale correspond approximativement à la vitesse finale du précédent ; on ne réalise pas de transition entre 2 micro-segments successifs, mais on décale le nouveau segment pour l'ajuster à la vitesse précédente (on ne crée pas ainsi d'accélération "artificielles", non issues des données de base).

Un cycle voie urbaine débute et se termine au ralenti, et résulte d'une succession aléatoire de micro-segments avec les mêmes précautions que précédemment ; on s'assure d'autre part qu'un micro-segment se terminant par une "file d'attente" à une intersection, est suivi d'un micro-segment qui a réellement succédé à ce type de situation, et réciproquement.

La durée minimale d'un ensemble de cycles est évaluée pour permettre une description à 80% des données de base, ce critère étant calculé à partir de la somme des différences absolues entre les distributions croisées vitesse - accélération. On génère de l'ordre de 500 cycles pour chaque groupe, que l'on classe selon leur proximité au centre du groupe (distance euclidienne basée sur les variables : vitesse moyenne et écart-type, somme des variations de vitesse, et énergie cinétique positive), et le taux de couverture des données de base.

Dix cycles sont générés assurant une bonne description des données de base. Les cycles urbains FTP et NYCC (New-York City Cycle) diffèrent assez largement des cycles proposés, y compris lorsqu'on les compare aux cycles les plus proches.

On notera quelques particularités de ces travaux : l'identification de variables liées à la densité de circulation, les notions de segments - entre intersections ou selon des changements de densité du trafic - et de micro-segments selon les modes de fonctionnement, les critères de validation, la classification en sous-groupes, la définition des modes d'accélération par rapport à un niveau moyen calculé sur ce qui précède.

On note quelques aspects plus arbitraires comme l'utilisation des données du véhicule suiveur en l'absence de véhicule suivi et la classification des segments urbains selon le seul niveau de vitesse moyenne.

3.3 - Cas particulier de cycles pour véhicules utilitaires

Pour les véhicules utilitaires, on construit généralement un cycle pour une famille large de véhicules (de 3,5 à 38 tonnes, avec des vocations très différentes). C'est souvent un cycle pour banc d'essai de moteurs, décrit en terme de régime de rotation et couple développé, variables

adimensionnalisées par les caractéristiques du véhicule (régime de puissance maximale, couple maximal). Les cycles d'essai consistent en un ensemble de points de fonctionnement stabilisé définis par régime et couple (réglementations européennes et japonaises), ou peuvent être des cycles « transitoires » sous forme de consignes régime - couple simultanées et instantanées (réglementation américaines). On note quelques cas de cycles d'essais de véhicules. Nous n'analyserons ici qu'une étude concernant la remise en question du cycle Européen 13 modes actuel, s'appuyant sur les travaux décrits au chapitre 3.2.10. et [Cohen, 1993], et adaptés pour le développement de cycles transitoires d'essai de moteur de véhicules utilitaires [Cohen, 1994].

En ce qui concerne les cycles de conduite (pour véhicules), on se reportera notamment à [Van de Weijer, 1993] pour le développement d'un cycle de conduite pour autobus, s'appuyant principalement sur la reproduction de la distribution croisée des vitesses et accélérations et la sélection aléatoire de séquences entre arrêts du bus.

Trente véhicules utilitaires de différentes catégories (de 3,5 à 38 tonnes, bus, camions, tracteurs routiers, etc.) ont été instrumentés en Allemagne et Suisse. Vitesse, régime de rotation du moteur et couple sur l'arbre de transmission sont mesurés en continu. Le type de voirie, la densité de circulation, etc. sont saisies par un opérateur qui accompagne le conducteur. Par ailleurs, on dispose d'une base de données d'émissions instantanées de polluants en fonction du régime et du couple moteur (mesures sur banc d'essai de 10 moteurs de poids-lourds, en utilisant le cycle transitoire américain).

Six modes de fonctionnement sont définis correspondant à différents seuils des régimes et couples moteur (cf. figure 3.10) : deux modes à couple négatif (le moteur est utilisé en frein) différenciés par un niveau de régime moteur (60% du régime maximal), et quatre modes "moteur" différenciés par un seuil de régime (40% du régime maximal) et un seuil de couple (80% du couple maximal). Ces seuils ont été définis et ajustés pour obtenir les différences les plus significatives des émissions moyennes par mode, calculées à partir de la base d'émissions instantanées.

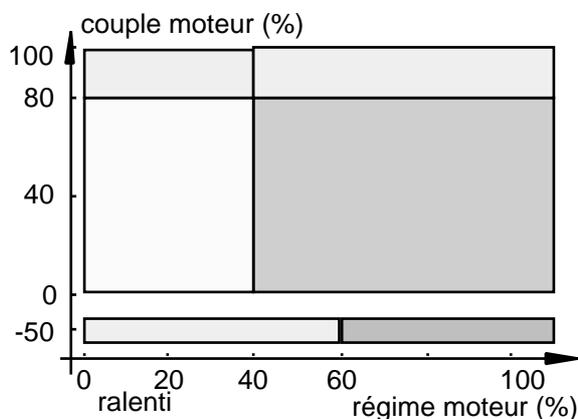


Figure 3.10 : Définition des modes de fonctionnement de véhicules utilitaires [Cohen, 1994]

Les statistiques et la structure du parc européen sont utilisées pour pondérer les données initiales. Les cycles sont générés selon le processus suivant : on pondère et décompose les données de base en les 6 modes définis précédemment. On sélectionne aléatoirement un segment, parmi ceux dont le niveau de régime moteur initial est proche de celui de fin du précédent, et dont le type est le plus probable après le type précédent. On réalise des ajustements en régime et couple à chaque transition.

Les cycles sont évalués par comparaisons de variables avec les données initiales (pondérées et adimensionnalisées) associées à des seuils d'acceptabilité. La somme des différences absolues des distributions croisées : régime - couple (niveau global) d'une part, et régime moyen - couple moyen - durée moyenne de chacun des modes d'autre part, permet de classer les cycles candidats en fonction de leur meilleure adéquation aux données initiales.

Le processus a été appliqué à partir des données enregistrées, puis en tentant d'intégrer le cycle américain (le complément servant en quelque sorte à redresser les statistiques pour coller aux données européennes), solution qui permettrait un rapprochement des réglementations.

Les critères d'évaluation concluent à la représentativité non satisfaisante par rapport aux conditions européennes du cycle américain, du cycle dérivé du cycle américain, et d'un cycle transitoire en 3 catégories : urbain, rural et autoroute, proposé à partir de la même base de données [Steven, 1995].

De ces travaux, on note la définition de modes de fonctionnement liés aux émissions de polluants, permettant de relier les causes aux effets. Ce principe présente cependant l'inconvénient de s'appuyer sur les données actuelles d'émissions de polluants réglementés qui pourraient ne plus correspondre aux technologies et réglementations futures. Le grand nombre de critères d'évaluation - dont la signification n'est pas évidente - laisse apparaître des différences sensibles pour certains paramètres (difficulté d'ajuster 98 variables lors d'un processus de ce type). Les résultats en terme de qualité du cycle sont en conséquence assez subjectifs et il y aurait lieu de privilégier un nombre restreint de critères les plus pertinents.

3.4 - Autres cas

De nombreux autres travaux méritent sans doute autant d'attention que les précédents, dont certains présentent des aspects méthodologiques spécifiques :

- lors du développement du cycle "Melbourne démarrage à froid", [Lansell, 1983] attache une attention particulière à la caractérisation des conditions thermiques de démarrage des véhicules,
- une tentative de développement d'un cycle "International" basée sur la comparaison de données de conduite issues de nombreux travaux internationaux [Watson, 1986], et qui favoriserait le rapprochement des réglementations et les comparaisons internationales,
- le cycle de Sydney, Australie [Kent, 1978] dont l'originalité réside dans la validation du cycle au moyen d'un modèle de calcul des émissions (différence de moins de 1% entre les émissions

calculées sur l'ensemble des données enregistrées à bord des véhicules et les émissions calculées sur le cycle déduit de ces données). Ces résultats doivent cependant être relativisés compte tenu de l'imprécision des modèles actuels de calcul des émissions.

- les travaux pour la modification de la réglementation américaine [Austin, 1993] afin de mieux rendre compte du démarrage à froid et de la "fin de trajet" (parking, manoeuvres), des accélérations fortes et des vitesses élevées [Watson, 1995], et pour représenter les conditions de conduite non décrites par le cycle FTP75.

3.5 - Caractérisation des méthodes

Les méthodes décrites précédemment se caractérisent par les données de base, les méthodes d'analyses de ces données et les outils mis en oeuvre et finalement par le "produit" des travaux (selon l'objectif initial).

3.5.1 - Les données de base

Les données de base se caractérisent d'une part par le champ couvert (véhicules concernés, zones géographiques, périodes) et d'autre part par la méthode de recueil. On note dans les travaux précédents, l'identification préalable d'utilisations types (le trajet domicile travail du matin, l'heure de pointe, certains types de voiries, des trajets types) et la caractérisation préalable des quartiers d'une ville ou des déplacements.

On retrouve la mise en oeuvre des principales méthodes de recueil dont les avantages et limites ont été décrits au chapitre 2.6 : des véhicules équipés confiés à des conducteurs professionnels ou à un échantillon de conducteurs privés, la technique du véhicule "suiveur" ou "flottant", et l'équipement de voitures privées utilisées en conditions habituelles par leur propriétaires. Le plus souvent, le suivi est limité à un ou quelques véhicules et à l'enregistrement de quelques milliers de kilomètres.

Les paramètres mesurés sont toujours la vitesse, l'accélération (souvent dérivée par calcul de la vitesse), et plus rarement la pente de la route, le couple moteur, les conditions de circulation, la consommation, les émissions de polluants (par simulation).

3.5.2 - Les analyses et outils de simulation

Les analyses se caractérisent essentiellement par le niveau auquel elles sont conduites, par les méthodes et outils mis en oeuvre, par les paramètres considérés et finalement par les outils et critères de validation du cycle obtenu.

3.5.2.1 - Le niveau d'analyse

Différents niveaux sont envisagés, éventuellement simultanément : au niveau des signaux instantanés (vitesses et accélérations), par modes cinématiques du véhicule (accélération,

décélération, croisière, ralenti), par modes de fonctionnement du moteur (phases motrices ou résistantes, charge partielle ou pleine charge), par segments entre arrêts, ou encore par trajets.

La définition des modes s'appuie sur des critères très variés souvent arbitraires bien que cet aspect conditionne largement les analyses .

3.5.2.2 - Méthodes et outils d'analyse

Le problème étant de réduire un ensemble de données en un ou plusieurs cycles "représentatifs des zones et périodes", diverses méthodes sont envisagées:

- par génération aléatoire d'une courbe vitesse / temps, en s'appuyant sur une distribution traduisant la probabilité d'occurrence des 2 variables croisées vitesse - accélération. Cette méthode permet d'être globalement représentatif de l'ensemble des conditions rencontrées,

- il est plus fréquent de sélectionner des enregistrements pour lesquels des caractéristiques synthétiques correspondent à celles calculées sur l'ensemble des données enregistrées (éventuellement pondérées, par type de voie, zones, horaires). Cette approche peut être menée au niveau de segments, que l'on ajoute jusqu'à satisfaire des conditions correctes de représentativité.

Les outils mis en oeuvre incluent :

- des outils de comparaison statistiques,
- des outils de simulation aléatoire permettant de reproduire des distributions observées (distribution croisée des vitesses et accélérations, des successions de modes, etc.),
- des outils de classification automatique permettant d'établir des typologies des conditions de circulation,
- des moyens artisanaux (appréciation visuelle, sélection d'enregistrements pour lesquels des caractéristiques synthétiques correspondent à celles calculées sur l'ensemble des données).

Les transitions entre modes sont réalisées par ajustement ou décalage des vitesses. On déplore des transformations arbitraires (limitations des accélérations, éliminations de données, de segments, etc.).

3.5.2.3 - Paramètres et moyens de validation

La durée, la vitesse moyenne, l'écart type de l'accélération, l'énergie cinétique positive, la durée au ralenti, le nombre d'arrêts par kilomètre sont le plus souvent considérés.

D'autres paramètres sont également considérés tels que la vitesse de roulage (hors arrêts), la valeur moyenne des accélérations, des décélérations, la durée moyenne des périodes de roulage, le nombre de changements accélération - décélération, les distributions relatives des vitesses, des accélérations, et les distributions croisées vitesses - accélérations.

Plus rarement on trouve la consommation de carburant, l'expression des énergies (motrices, de freinage, etc.), les émissions de polluants, les conditions de démarrage ou de fin du trajet.

[Kuhler, 1978] propose une hiérarchisation des paramètres à reproduire lors de l'élaboration d'un cycle : il est important de respecter la vitesse moyenne, puis les accélérations et décélérations moyennes, tandis que les autres paramètres peuvent autoriser de plus larges tolérances.

Les moyens de validation mis en oeuvre incluent la comparaison - entre le cycle et les données de base éventuellement corrigées ou pondérées ou d'autres statistiques -, des paramètres et distributions précédentes, ou utilisent la distance au centre de gravité d'un groupe, ou plus simplement l'aspect visuel. Plus rarement les cycles sont validés sur banc d'essai, par des mesures d'émissions. Les critères de validation et leur hiérarchisation semblent assez arbitraires.

3.5.3 - Le "produit" des analyses

Le produit des analyses, c'est d'abord le cycle développé (courbe vitesse en fonction du temps) mais aussi dans certains cas, d'autres conditions de test (thermiques, etc.).

Le cycle peut être un cycle par modes, un cycle unique ou un nombre restreint de cycles permettant une description détaillée des conditions de circulation et des usages. Ce peut être un cycle réglementaire ou un cycle "recherche" en vue de mesurer des facteurs représentatifs d'émissions. L'objectif initial du cycle conditionne largement sa genèse. Un cycle destiné à la réglementation est simple, reproductible et valable pour un large éventail de véhicules. Un cycle "représentatif" doit tenir compte des caractéristiques des véhicules, de la diversité des usages, des comportements de conduite et des conditions de circulation.

Certains travaux prennent en compte la définition des conditions de démarrage, les conditions thermiques, les stratégies de changements des rapports de boîte de vitesse. D'autres travaux s'appuient spécifiquement sur les émissions de polluants ou la consommation.

La plupart des travaux concluent à la non représentativité des cycles réglementaires (faiblesse des accélérations, niveaux de vitesse non réalistes) et des cycles synthétiques par modes (description insuffisante du fonctionnement transitoire).

3.6 - Conclusions

L'élaboration de cycles de conduite repose sur la constitution d'une base de données sur les conditions d'utilisation et de fonctionnement des véhicules. La plupart du temps, cette base concerne un champ d'investigation bien identifié (véhicules et zones concernés), résultant d'études ou de caractérisations préalables.

Une base large permet théoriquement de prétendre à une certaine représentativité et de couvrir la diversité des comportements de conduite et d'usage des véhicules. On se trouve alors confronté à la nécessité de réduction des données afin de décrire en quelques dizaines de minutes de test les conditions de fonctionnement des véhicules.

Des travaux précédents, nous retiendrons en particulier la nécessité de l'enregistrement en continu de la vitesse et de la prise en compte des variations transitoires, les avantages et limites des méthodes de recueil.

Des méthodes d'analyse mises en oeuvre, on notera les variables proposées (notamment celles liées à la densité de circulation, et les lois de distributions de ces variables qui conditionnent les analyses, les différents niveaux d'analyse envisagés (valeurs instantanées, intégration par segments, par modes de fonctionnement) et les critères de définition des modes ou segments (changement de densité de trafic par exemple).

Différents outils et niveaux de simulation ont été utilisés ou critiqués. On retiendra les précautions mentionnées par les auteurs, l'intérêt des outils de l'analyse des données pour la caractérisation des conditions de circulation et les solutions proposées pour réaliser des transitions entre segments.

Il convient de hiérarchiser les nombreux critères (ou méthodes) de validation envisagés. Les autres conditions de test - non décrites par le cycle de conduite - doivent être prises en compte : changements des rapports de boîte de vitesse et prise en compte des caractéristiques des véhicules, conditions de démarrage et de fin de trajet (identifiées comme aspect important des émissions de polluants).

Certains aspects méritent une réflexion approfondie, tels que la construction de cycles s'appuyant sur des données externes (notamment les émissions de polluants, avec le risque de concevoir un cycle fondé sur les problèmes d'aujourd'hui et non valable ultérieurement), la caractérisation de la conduite en fonction de la structure urbaine, l'opportunité d'harmoniser les méthodes et de définir un ou des cycles internationaux, et finalement l'objectif du cycle (contrôle ou mesure représentative) et l'utilisation des résultats de mesure.

Chapitre 4 - Acquisition de données à bord de véhicules - méthode et outils logiciels

4.1 - Introduction

On a souligné la nécessité d'information sur les conditions d'utilisation et de fonctionnement des véhicules, en particulier pour le développement de méthodes réalistes de mesure. Si les conditions d'utilisations peuvent être approchées au moyen de divers outils d'investigation (enquêtes, mesure du trafic, etc.), la construction de cycles d'essai nécessite de disposer de données détaillées de fonctionnement, en particulier les courbes de vitesse du véhicule en fonction du temps.

Afin de constituer une base de données des conditions réelles d'usages et de fonctionnement des voitures en France, plusieurs expérimentations ont été menées sur des échantillons de voitures privées, équipées d'un matériel d'acquisition de données (EUREV: étude expérimentale sur les usages réels des véhicules [André, 1987], [André, 1991 a et b]).

En nous appuyant sur ces travaux, nous définissons les principes méthodologiques pour la constitution d'une base de données en vue de la construction de cycles d'essai : observation en usages réels, véhicules instrumentés utilisés normalement par leur propriétaire, constitution d'un échantillon représentatif. On liste les paramètres à mesurer et les solutions techniques envisagées et on décrit le système d'acquisition de données. Les systèmes doivent satisfaire des contraintes sévères d'environnement.

Bien que ce cadre soit limité à la construction de cycles pour les voitures, on donne quelques éléments concernant les véhicules utilitaires.

Les expérimentations sur véhicules et les analyses ultérieures ont nécessité le développement de nombreux outils informatiques qui sont décrits succinctement : outils de terrain pour vérifier in situ le bon fonctionnement des systèmes, utilitaires pour valider les données enregistrées compte tenu de nombreux problèmes liés à l'instrumentation à bord de véhicules sans possibilité de contrôle du fonctionnement des matériels, outils de calcul et de gestion des analyses statistiques.

4.2 - Principes de base

Deux grands principes de base sont retenus :

- l'observation des conditions d'usages et de fonctionnement des véhicules en situation réelle d'utilisation : des véhicules privés sont équipés de systèmes d'acquisition de données ("boîte noire") puis utilisés normalement par leur conducteur sur une période d'un mois,

- la représentativité de l'échantillon de véhicules : les zones géographiques, les modèles de véhicules et les propriétaires de ces véhicules sont sélectionnés de manière à assurer cette représentativité.

Les expérimentations sont lourdes : complexité de l'instrumentation et de son intégration sur les véhicules, procédure de sélection, contraintes liées à l'accès et à l'équipement des véhicules privés en différents lieux. D'autre part les équipements (systèmes d'acquisition et capteurs) sont coûteux (la sélection, l'expérimentation et le suivi pendant un mois de 20 véhicules au moyen de 5 chaînes d'acquisition est évaluée à environ 1,5 Million de Francs en 1995). Pour ces différentes raisons, les échantillons sont limités en nombre de véhicules expérimentés. On cherche donc à obtenir une représentation de l'usage des véhicules, dans sa globalité, sans chercher à décrire l'influence des nombreux facteurs sous-jacents (catégories de véhicules, zones, conducteur, etc.), au travers d'effectifs trop limités pour cela.

Il faut également souligner qu'en ce qui concerne l'analyse des conditions de circulation, un véhicule doit être vu comme un "capteur" de mesure des conditions du trafic dans lequel il circule. En ce sens, la représentation au travers d'un échantillon même limité est considérablement accrue.

4.2.1 - Observation en usages réels

4.2.1.1 - "Boîte noire"

Ce principe implique une parfaite fiabilité des matériels, des capacités suffisantes (autonomie de fonctionnement, capacité d'enregistrement), un automatisme total, et l'impossibilité de bénéficier d'informations explicatives complémentaires (conditions particulières rencontrées, type de voiries, etc.). L'intervention du conducteur (pour coder une information par exemple) n'est pas souhaitable: des essais ont montré la non fiabilité de l'information. D'autre part, c'est un rappel permanent que le fonctionnement du véhicule est enregistré, et ceci peut induire des changements de comportement (vitesses pratiquées, etc.). La présence d'un technicien ou enquêteur à bord simplifierait les problèmes matériels (contrôle des systèmes et intervention éventuelle) et garantirait la fiabilité de la saisie d'informations complémentaires, mais aurait une incidence certaine sur le comportement. Cette solution n'est guère envisageable compte tenu de l'imprévisibilité des utilisations et de leur dispersion dans le temps.

4.2.1.2 - Pré-étude d'implantation

L'ensemble des matériels de mesure ne doit pas perturber le fonctionnement du véhicule ni le comportement du conducteur. Dans ce but, les matériels sont rendus aussi discrets que possible. Les adaptations des capteurs (mécaniques, électriques, etc.) sont propres à chaque modèle et nécessitent une pré-étude d'implantation spécifique des capteurs, réalisée sur un véhicule du type correspondant. Les adaptations mécaniques et électriques nécessaires à l'équipement des véhicules à instrumenter sont ensuite réalisées sur cette base. Une certaine "universalité" des adaptations est recherchée, qui permettrait de minimiser ces phases de pré-étude.

4.2.1.3 - Durée de suivi d'un véhicule

Une durée de suivi de l'ordre du mois permet de limiter les conséquences des variations dans la semaine, ou dues aux jours fériés, vacances, etc. La prise en compte des effets saisonniers nécessiterait des suivis d'un même véhicule sur des périodes différentes de l'année. Cependant ceci implique une complexité quasiment équivalente à l'équipement d'un autre véhicule (il est difficile de laisser à demeure des capteurs coûteux) et des difficultés particulières (en cas de revente du véhicule, etc.). On s'attachera plutôt à couvrir les effets saisonniers sur l'ensemble des véhicules (globalement) plutôt qu'à ré-équiper chacun des véhicules à plusieurs périodes.

4.2.1.4 - Enregistrement chronologique

Tous les paramètres mesurés sont enregistrés en continu. Ceci permet un retour aux données de bases pour l'élimination d'aberrations dues à un dysfonctionnement de matériels (capteurs, enregistreur ou même le véhicule). Cela permet de plus d'analyser les interactions des différents paramètres mesurés et leurs caractéristiques en fonction de différentes conditions extérieures. Enfin, la construction de cycles de conduite à partir des cinématiques (vitesses, accélérations) n'est possible qu'à partir des données en mode chronologique.

4.2.1.5 - Protocole

On identifie les véhicules à instrumenter et prépare les matériels. Un véhicule est équipé d'un système d'acquisition de données et des capteurs (un véhicule de remplacement est confié au propriétaire). La durée d'équipement est de l'ordre de une journée pour une voiture avec une configuration de mesure relativement légère et peut nécessiter 3 jours pour un véhicule utilitaire, avec une configuration plus lourde.

Le véhicule est restitué à son propriétaire, qui l'utilise normalement pendant une durée de un mois. En cours de suivi, des visites sont prévues tous les 10 à 15 jours pour vérifier le bon fonctionnement des matériels (et limiter la perte en cas de défaillance des systèmes ou de capteurs) et pour recueillir les données enregistrées. Au bout de cette période, le véhicule est déséquipé.

4.2.2 - Sélection des véhicules

La grande diversité des véhicules et de leur vocation (voitures privées, de location, ou à usage commercial, taxis, véhicules utilitaires légers ou lourds, engins spécifiques, etc.) conduit à considérer des familles de véhicules.

On cherche à constituer une base d'information représentative ; cela signifie que l'on s'intéresse aux types de véhicules les plus répandus (les véhicules très spéciaux type voitures sportives, ou très haut-de-gamme sont exclus) et de même, on ne considère pas des cas d'utilisation relativement rares (traction de caravane, etc.), sous réserve que ces utilisations soient effectivement marginales.

Le nombre de véhicules testés étant relativement faible, leur sélection nécessite d'autant plus de précautions. Afin d'obtenir une description du parc de véhicules concernés, il est nécessaire de tenir compte au moins de la répartition géographique des véhicules, de la structure du parc (modèles, technologies, âge), et également des conducteurs eux-mêmes.

La sélection des véhicules se fait - après identification des zones géographiques et des modèles de véhicules retenus - par tirage aléatoire d'adresses de propriétaires de ces véhicules à partir du fichier national des immatriculations. Un questionnaire préalable d'identifier les propriétaires qui acceptent de participer et de renseigner les aspects concernant le conducteur du véhicule (âge, sexe, situation professionnelle et familiale, utilisation du véhicule). On constitue l'échantillon sur cette base.

4.2.2.1 - Nombre de véhicules

Les expérimentations précédentes en France sur les voitures particulières ont montré que des échantillons de l'ordre de quelques dizaines (20 véhicules minimum) peuvent permettre d'obtenir une assez bonne image des usages et conditions de fonctionnement avec cependant un nombre limité de modèles. En effet, en [André et al., 1987 et 1991a], on observe que les résultats obtenus avec un échantillon d'une vingtaine de véhicules restent stables lorsqu'on l'étend à 40, pourvu que ceux-ci soient l'objet de précautions lors de leur sélection.

4.2.2.2 - Répartition géographique

La localisation géographique des véhicules est certainement l'un des paramètres les plus importants conditionnant les types d'usages et conditions de fonctionnement des véhicules : zone urbaine ou rurale, montagnaise ou en plaine, en région climatique chaude ou froide. Pour les véhicules utilitaires, il est vraisemblable que les conditions d'utilisations soient spécifiques pour les régions charnières en matière de transit de marchandises ou sur les grands axes de communications.

Il est donc important de sélectionner les véhicules en tenant compte de la répartition géographique du trafic et en déclinant les zones les plus caractéristiques (grandes villes, zones rurales, etc.)

4.2.2.3 - Structure du parc de véhicules

La grande diversité des véhicules est liée d'une part aux technologies (véhicules à essence à carburateur ou injection, ou Diesel, équipés ou non de pots catalytiques, etc.), variables selon les constructeurs et les modèles, d'autre part à leur évolution (on observe facilement 20 années d'évolution des technologies sur le parc roulant des voitures ou des véhicules utilitaires). De la même manière, les véhicules ont été soumis à différentes réglementations selon les années de conception (en particulier en matière d'émissions de polluants), réglementations qui ont influencé dans une large mesure leur conception technologique.

Par ailleurs, les conditions d'utilisation varient avec l'âge des véhicules (diminution du

kilométrage annuel, [Eggleston, 1991]). Elles varient également selon la "vocation" du véhicule : l'utilisation d'un taxi ou d'une voiture de location diffère certainement de celle d'une voiture privée, l'utilisation des véhicules utilitaires varie fortement selon leur aménagement (citerne, plateau, benne, etc.), selon la nature des marchandises transportées, le type de mission (livraison en zone urbaine, transport à longue distance, etc.) et le mode de fonctionnement de l'entreprise (pour compte propre ou compte d'autrui).

Pour les voitures particulières, nous avons retenu les paramètres suivants de description du parc et de sélection des véhicules : la technologie (essence, Diesel, injection, catalyseur), la marque et le modèle, l'année de fabrication (et la réglementation associée), le kilométrage total déjà effectué.

Les véhicules utilitaires doivent être envisagés par famille : voitures commerciales, petits véhicules utilitaires, véhicules industriels ou poids-lourds, et véhicules de transport de passagers (autobus et autocars). Pour ces véhicules, un échantillon doit tenir compte des technologies, de la "vocation" du transport (livraison, etc.) et du type d'entreprise [André, 1994a].

Ces éléments nécessitent des analyses préalables de caractérisation et de description du parc automobile, de sa répartition géographique et de ses usages à partir des statistiques nationales (d'immatriculation, de trafic, etc.).

4.2.2.4 - Choix en fonction des conducteurs

Compte tenu de l'incidence du comportement de conduite, les véhicules doivent être sélectionnés en fonction de leur conducteur, selon au moins l'âge et le sexe du conducteur principal, sa situation professionnelle et familiale, etc. Le profil des conducteurs varie considérablement selon les modèles, la motorisation, l'âge des véhicules (par exemple, les utilisateurs de petites voitures sont plutôt des femmes, des jeunes, ou des retraités). La connaissance de ces profils - hélas rarement disponibles - devrait guider au choix des conducteurs. A défaut, on s'assure au moins de la diversité de l'échantillon.

Une indemnisation et certaines précautions de mise en confiance sont nécessaires pour motiver la participation des propriétaires des véhicules. Certaines catégories socioprofessionnelles sont difficiles à atteindre (milieux ouvriers - employés pour lesquels la voiture représente un investissement important), d'autres trop faciles (enseignants, professions libérales). Il semble plus difficile de motiver des possesseurs de véhicules "haut-de-gamme".

4.2.3 - Paramètres à mesurer et capteurs

Les paramètres à prendre en compte diffèrent sensiblement d'un type de véhicule à l'autre : par exemple, la charge transportée est un élément prépondérant pour les véhicules lourds, alors que son influence sur les émissions et la consommation des voitures particulières est relativement limitée en raison de plages de variation beaucoup plus faibles (nombre de personnes à bord, bagages transportés).

4.2.3.1 - Paramètres

Pour construire un cycle de conduite, seule la mesure de la vitesse en circulation serait nécessaire. Si l'on s'intéresse aux conditions de fonctionnement, on doit considérer également le régime de rotation du moteur et l'utilisation des rapports de boîte de vitesse. La prise en compte des conditions de démarrage implique de considérer les conditions thermiques (ambiantes et du moteur). Dans le cas des véhicules lourds on doit également considérer la charge transportée et la description du profil routier (gradient). Pour la définition de cycles d'essai sur banc moteur, couple et régime moteur sont nécessaires.

Compte tenu de la lourdeur des expérimentations et de l'intérêt de la connaissance d'autres paramètres d'utilisation des véhicules (pour l'étude de l'influence de ces paramètres sur les émissions) on ne limitera pas l'instrumentation à ces seuls paramètres. Nous considérerons principalement :

- les usages : description des trajets (durée, distance), leur distribution aux cours de la journée, etc.,
- le véhicule en circulation : vitesses et accélérations pratiquées, arrêts, conditions de circulation
- et le fonctionnement du moteur et de certains de ses auxiliaires.

Dans ce but, les paramètres suivants sont mesurés :

- la date et l'heure de chaque trajet,
- la distance parcourue - dont sont dérivées la vitesse et l'accélération du véhicule - ,
- le régime de rotation du moteur, l'ouverture du papillon ou la position de la commande d'injection comme indicateur de la "charge du moteur",
- les températures d'eau et d'huile du moteur et de l'air extérieur,
- les utilisations de certains accessoires comme les essuie-glaces, l'éclairage, les freins, qui permettent de rendre compte de conditions externes (conditions climatiques, conditions de circulation); l'usage du starter, facteur déterminant des émissions et de la consommation,
- l'utilisation de la boîte de vitesse (à partir de la vitesse du véhicule et du régime moteur).

Pour les véhicules utilitaires, on considère également l'évaluation de la masse totale du véhicule et du profil routier (pentes), et / ou le couple transmis par l'arbre de transmission.

La consommation de carburant peut être également mesurée à bord des véhicules, ce qui permet en particulier l'analyse de l'incidence des conditions d'utilisation et de fonctionnement sur ce paramètre.

4.2.3.2 - Capteurs et matériels

En raison d'un environnement sévère à bord des véhicules (vibrations, températures élevées ou négatives, perturbations électromagnétiques), les matériels de mesure doivent être robustes. Les capteurs et l'électronique conçus pour l'automobile (distance, vitesse, consommation, température,

etc.) présentent l'avantage d'une grande fiabilité et de coûts très faibles, au détriment de la précision de la mesure. Celle-ci peut s'avérer cependant suffisante dans bien des cas. En revanche, dès qu'il s'agit de mesures de couple sur un arbre tournant, de capteurs potentiométriques, ou d'accéléromètres, les matériels utilisés sont des capteurs de "laboratoire" coûteux et précis, mais souvent peu adaptés à un fonctionnement embarqué.

Après test de plusieurs solutions, on trouvera ci-après la liste des paramètres mesurés, ainsi que la description de solutions technologiques retenues.

4.2.3.3 - Vitesse, accélération et distance parcourue

Trois montages ont été testés :

- **un transmetteur d'impulsions** monté sur le câble de transmission de l'information vitesse au tableau de bord (reliant la boîte de vitesse au compteur du véhicule) : ce montage utilise un transmetteur standard (optoélectronique) destiné à la monte sur automobile, et donc très fiable. On doit noter que l'information mesurée est relativement "éloignée" de la distance parcourue à la roue (par de nombreux étages de transmission et par l'élasticité du câble en rotation). Ce capteur autorise une précision que l'ordre de 20 cm en distance, c'est-à-dire d'environ 0,7 km/h pour la vitesse calculée à chaque seconde. L'accélération longitudinale étant calculée à partir de la vitesse (par dérivation), on obtient donc une précision de l'ordre de 0,2 m/s². Cette précision est suffisante pour la mesure de l'accélération du véhicule. C'est ce montage qui a été utilisé dans le cadre des expérimentations.

- dans le cas des véhicules à propulsion arrière, **une roue phonique** (ou dentée) est montée sur l'arbre de transmission, et un capteur (optique, ou inductif - effet "hall") est monté en regard. La solution cellule photoélectrique a été préférée après essais. La précision dépend du nombre de dents de la roue phonique et du rapport de transmission (entre l'arbre et la roue). Le point de mesure est plus "proche" de la distance réellement parcourue.

- **un émetteur radar**, (visant directement le sol, et interprétant la vitesse ou distance parcourue, par l'interférence entre les rayonnement émis et réfléchi) constitue la solution la plus simple (de mise en oeuvre), la plus directe (mesure de la distance réellement parcourue) et la plus précise (résolution de l'ordre de 1 centimètre). Cette solution est cependant beaucoup plus onéreuse.

4.2.3.4- Autres paramètres et capteurs

- *Consommation de carburant* : elle est mesurée au moyen d'un débitmètre volumétrique, à roues ovales (chaque tour des roues dentées correspond à un volume de 1 cm³). Une chambre de dégazage est nécessaire pour éviter la formation et la mesure d'un débit contenant des bulles.

La précision peut être améliorée par l'utilisation d'un capteur avec compensation de la perte de charge introduite sur le conduit du carburant, et par la mesure de la température du carburant au niveau du débitmètre afin de corriger la consommation. Le retour vers le réservoir du carburant refoulé par la pompe injection doit être bouclé en aval du débitmètre (afin de ne pas comptabiliser

tout ce qui revient au réservoir). Un échangeur de chaleur est alors nécessaire afin de baisser la température du carburant transitant vers la pompe.

- *Régime moteur* : sur les véhicules à essence, le régime moteur peut être mesuré par une adaptation électronique sur le signal d'allumage. Plus généralement, un système optique (réflecteurs et fibre optique) est utilisé pour mesurer la vitesse de rotation d'une partie tournante du moteur (poulie).

- *Utilisation d'accessoires* : les utilisations des freins, du starter et des essuie-glaces sont enregistrées au niveau des informations électriques correspondantes (témoins lumineux, etc.).

- *Températures* : Les températures de l'eau de refroidissement et de l'huile du moteur sont mesurées au moyen de thermocouples J. Les points de mesure nécessitent des adaptations spécifiques sur les circuits respectifs. La température d'air ambiant est mesurée à l'arrière du véhicule.

- *Charge du moteur* : La position du papillon du carburateur (pour les voitures à carburateur), ou de la commande de la pompe à injection ont été mesurées comme indicateur de la charge du moteur (capteurs potentiométriques de position linéaire ou angulaire). La mesure du couple à la roue a été envisagée pour les véhicules utilitaires, par collage sur un cardan ou sur l'arbre de transmission de jauges de contraintes et télétransmission de la tension mesurée. L'alimentation électrique des parties tournantes est assurée par induction [André, 1994b]. On doit mentionner les réelles difficultés à mesurer le couple et l'insuffisance des technologies envisagées : dans le cas du montage sur un cardan, l'espace disponible est très limité et les mouvements de l'arbre sont importants ; dans tous les cas les matériels en dessous du véhicule sont très exposés (projection de cailloux, eau, etc.). Des capteurs de couple "magnéto-strictif" sans contact sont en cours de développement pour l'automobile. Ces capteurs permettraient sans doute plus aisément et à moindre coût la mesure du couple transmis sur un arbre [Garshelis, 1995].

- *Masse du véhicule et gradient de la route* : la masse transportée par le véhicule et le gradient de la route sont particulièrement importants dans le cas des véhicules utilitaires. L'évaluation de la masse est envisagée à partir de la mesure de la déformation de 2 suspensions diagonalement opposées, au moyen de 2 capteurs potentiométriques linéaires pour les petits véhicules utilitaires. L'évaluation du gradient a été envisagée sans succès par calcul à partir des mesures du couple à la roue, de l'accélération longitudinale et de la vitesse du véhicule [André, 1994b].

4.2.3.5 - Intégration mécanique et électronique

La plupart des signaux nécessite un conditionnement pour mise en forme pour l'enregistrement : alimentation électrique, filtrage, temporisation, etc.. Ces conditionnements sont centralisés dans un boîtier conditionneur (sous le capot), ainsi que l'ensemble des liaisons électriques vers les capteurs et vers l'enregistreur (dans la malle arrière).

Pour chaque modèle de véhicule équipé, des documents techniques sont constitués décrivant les capteurs, leur conditionnement et les adaptations mécaniques au véhicule.

4.2.4 - Système d'acquisition de données embarquable

La nécessité d'un matériel parfaitement fiable nous a conduit à faire développer un système d'acquisition de données embarquable ("SYMADE" - SYstème Modulaire d'Acquisition de Données Embarquable) spécifique, basé sur l'expérience acquise lors des premières expérimentations en France [André, 1987 et 1991]. De la taille d'une valise, il a été conçu pour résister aux perturbations électriques du réseau du véhicule, aux vibrations et températures par le choix de cartes électroniques à vocation industrielle. De conception modulaire et reconfigurable, il est possible de faire évoluer le programme d'application développé en langage C. Huit voies analogiques, 8 voies logiques et 3 voies de comptages sont paramétrables par l'utilisateur et acquises à des fréquences variables de 0.02 à 5 Hertz. L'acquisition est asservie au contact du véhicule, les données sont stockées sur mémoire sauvegardée. Le paramétrage, le dialogue, et le transfert des données se font par l'utilisation d'un micro-ordinateur portable. Tous les paramètres mesurés sont enregistrés en continu.

Le SYMADE a bénéficié de plusieurs évolutions au niveau logiciel et matériel : augmentation de la capacité d'enregistrement et du nombre de voies (32 voies analogiques, 16 voies logiques, et 5 voies fréquences), amélioration et protection de la carte d'alimentation, banalisation du paramétrage des voies (libellé, coefficients de conversion, fréquence d'acquisition, format sur 1 ou deux octets, décalage de zéro, division de la valeur mesurée) et souplesse d'utilisation, configuration de mesure inscrite en tête du fichier enregistré [André, 1994b].

Les dernières évolutions ont permis sur la miniaturisation de l'enregistreur (de l'ordre de 250 x 210 x 100 mm), le stockage sur carte mémoire amovible (jusqu'à 20 MOctets), la diminution de la consommation électrique du système dans un rapport de 1 à 10 (de l'ordre de 200 mA, contre 2 à 3 Ampères antérieurement) et la diminution du coût par un facteur 2.

La diminution de la consommation électrique constitue un progrès certain, de nombreux problèmes étant liés à des défauts d'alimentation. La diminution de coût permettra sans doute d'envisager des expérimentations sur des échantillons plus larges.

4.3 - Outils logiciels

4.3.1 - Introduction

Que ce soit au niveau des expérimentations sur véhicules, des calculs au niveau de trajets et segments cinématiques, ou des analyses statistiques et de l'élaboration de cycles, de nombreux outils informatiques ont été nécessairement élaborés. Il n'est pas possible d'en donner dans ce cadre une description complète, et nous évoquerons principalement les grandes lignes plus quelques spécificités éventuelles.

Ce qui caractérise principalement ces outils est lié à la complexité de gestion de données expérimentales. L'instrumentation à bord de véhicules, dans un environnement sévère en terme de températures, de vibrations et de perturbations électromagnétiques, et l'absence de contrôle du fonctionnement des matériels, contribuent largement à augmenter la probabilité de problèmes, tant au niveau du fonctionnement des systèmes d'acquisition et des capteurs que de la validité des informations enregistrées. Ce sont par exemple des défauts d'alimentation, des défaillances de capteurs et le plus souvent des dysfonctionnements dont on ne connaît pas l'origine. La plupart de ces problèmes sont constatés a posteriori, et de nombreux utilitaires sont donc nécessaires pour tester et corriger lorsque cela est possible les données enregistrées.

Une autre difficulté tient à la quantité des données enregistrées. Chaque véhicule instrumenté circule en moyenne quelques heures par jour, et génère à chaque seconde d'utilisation une quinzaine de paramètres mesurés. Après une dizaine de jours de suivi de plusieurs véhicules, on recueille des quantités de données considérables, qu'il n'est pas possible de visualiser en détail. On a donc besoin d'outils de "pré-visualisation", permettant, par calcul d'informations synthétiques (distributions, valeurs moyennes, maximales, test de variables par rapport à des valeurs limites, test de la cohérence entre différentes informations, etc.), d'identifier rapidement des erreurs ou des dysfonctionnements.

Les outils développés dans ce cadre s'articulent de manière synthétique selon le schéma figure 4.1 et sont principalement :

- des outils de terrain sur ordinateur portable, pour la vérification in situ des données enregistrées à bord des véhicules,
- des utilitaires de lecture et d'interprétation immédiate des données enregistrées et permettant une analyse succincte du contenu des fichiers indépendamment de la configuration de mesure et de la nature des voies enregistrées,
- des outils de calculs en vue d'analyses spécifiques (calcul de variables dérivées, intégration d'information à différents niveaux : sur un trajet ou un segment cinématique, calcul de distributions, etc.). Ces outils gèrent des informations identifiées (vitesse, etc.) en vue d'analyses ultérieures.

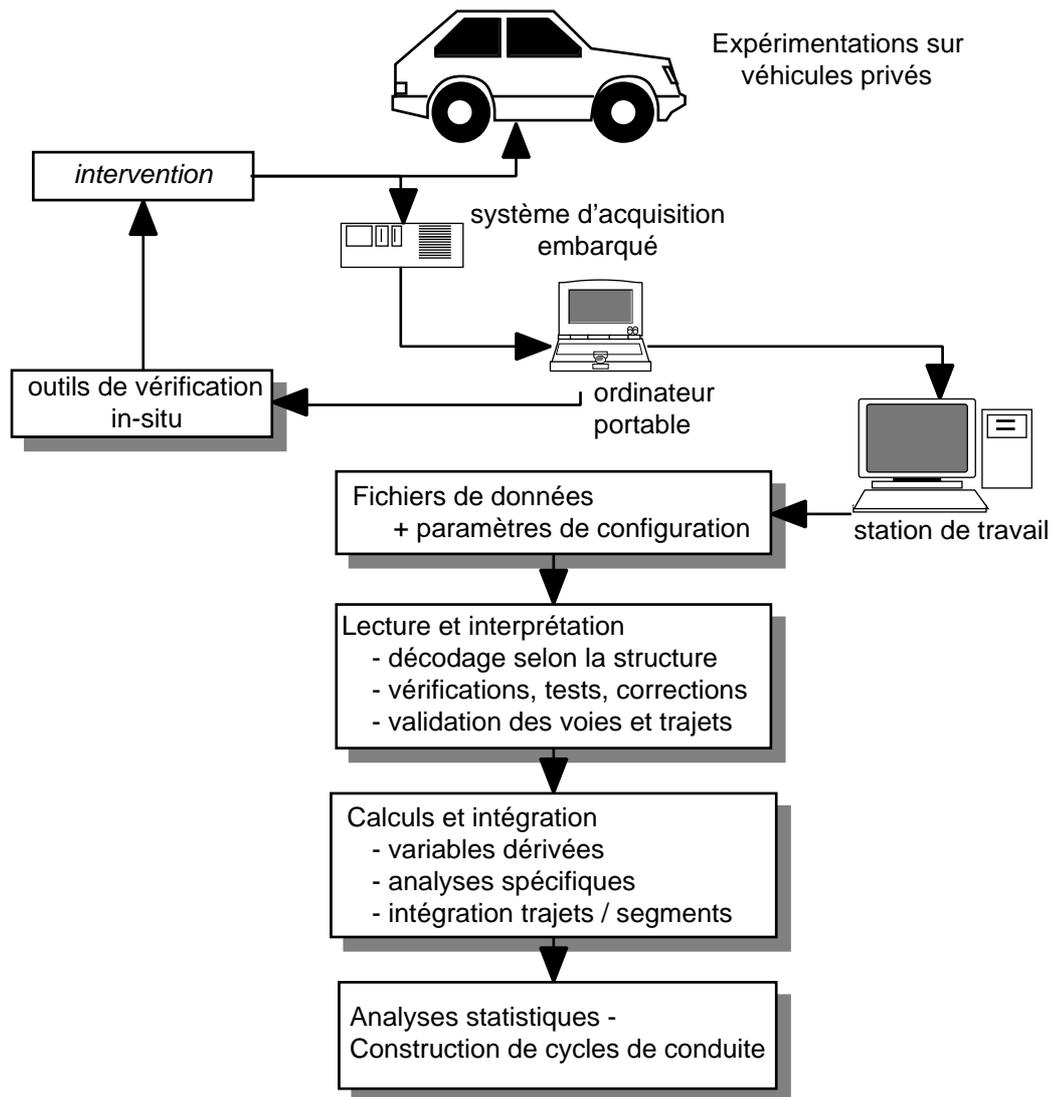


Figure 4.1 : Schéma de principe et d'articulation des différents outils informatiques

- des outils d'analyse ou de gestion des analyses statistiques des données ou calculées au niveau précédent (notamment pour la construction de cycles d'essai).

On donne d'abord quelques éléments sur les fichiers enregistrés avant de décrire les utilitaires nécessaires à leur exploitation et les outils plus spécifiques des analyses.

4.3.2 - Fichiers de données

4.3.2.1 - Fichiers issus des systèmes d'acquisition

Le logiciel de la centrale d'acquisition assure l'enregistrement d'un fichier de données, constitué des valeurs mesurées au cours des trajets successifs, l'acquisition étant pilotée par l'information contact du véhicule. Le transfert des fichiers vers un ordinateur portable, est assuré par un protocole de communication et plus récemment par l'utilisation de cartes mémoires amovibles qui ont remplacé la mémoire sauvegardée de stockage des données de la centrale.

Les fichiers de données sont constitués d'une suite d'octets. Le ou les 2 premiers blocs de 128 octets (pour les versions les plus récentes du logiciel de gestion de la centrale) renseignent sur la configuration de mesure. Leur interprétation permet donc de lire les blocs de mesures.

Les informations de configuration incluent :

- la version du logiciel d'acquisition, le nombre d'octets enregistrés, la longueur en octets d'un bloc de mesure (selon la configuration de mesure et de codage décrite ci-après),
- la période d'acquisition, la durée de temporisation en fin d'enregistrement, avant de considérer qu'un trajet est terminé, le mode de fonctionnement des voies compteurs (cumul ou fréquence), l'état des voies (non acquises, acquises à la fréquence de base, ou à selon une période multiple de la période de base (2x, 5x, 10x), le codage des voies (8 ou 16 bits soit un ou deux octets), le décalage éventuel du zéro des voies, et leur facteur de division éventuel.

Selon cette configuration de mesure, les octets suivants sont organisés sous forme de blocs, correspondant à 10 séries d'acquisition. Les blocs de mesures sont de taille variable et leur structure est complexe en fonction des rythmes d'acquisition et codages des différentes voies, ainsi qu'illustré figure 4.2, excepté que l'ensemble des octets sont bout à bout. Un trajet consistera en 6 octets précisant la date de début d'acquisition, 1 octet délimiteur, puis un nombre variable de blocs de mesure (selon la durée du trajet et la fréquence d'acquisition), séparés également par un octet délimiteur. Cet octet sera à 255 pour signaler la fin du trajet. On aura ensuite dans ce cas, une nouvelle date sur 6 octets (figure 4.3).

A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,				
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,	D1,	E1,		
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,				
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,	D1,	E1,		
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,			F1	F2,
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,	D1,	E1,		
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,				
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,	D1,	E1,		
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,				
A1	A2,	B1	B2,	C1	C2,	D1,	E1,	F1	F2

Figure 4.2 : Bloc de 72 octets correspondant à 10 acquisition, selon la configuration de mesure suivante:

- 3 voies A, B, C, codées sur 2 octets enregistrées à la période de base,
- 2 voies D, E, codées sur un octet enregistrées à 2 x la période de base
- 1 voie F, sur 2 octets enregistrée à 1 fois la période de base

•Bloc de Configuration (128 octets), second bloc de configuration (128 octets) selon version
•DATE (6 octets) de début d'un trajet (ou de début de l'acquisition)
•délimiteur (1 octet : 0)
•BLOC DE MESURES (72 octets)
•N fois : (délimiteur (1 octet : 0) + BLOC DE MESURES (72 octets))
•Délimiteur (1 octet : 255)
•DATE (6 octets) de début d'un trajet (ou de début de l'acquisition)
•etc.

Figure 4.3 : Organisation des blocs de mesure (selon la configuration précédente) au cours d'un trajet

4.3.2.2 - Autres fichiers

Des fichiers de données en provenance d'autres laboratoires ont été acquis au moyen de centrales d'acquisition différentes. Pour ces fichiers, une conversion préalable en grandeurs interprétées a été assurée par le laboratoire d'origine. On a donc des fichiers se présentant sous forme ASCII, et pour lesquels chaque ligne d'informations correspond à une acquisition. Ces fichiers nécessitent principalement des outils de prise en compte de la configuration et de la validité de mesure.

4.3.2.3 - Paramétrage des fichiers de données

Les fichiers précédents ne renseignent qu'une partie de la configuration de mesure. Ne sont pas définis : la nature des voies réellement enregistrées, le type de conversion nécessaire et les coefficients de cette conversion, la validité des mesures (d'une voie enregistrée, des trajets, etc.) constatée a priori ou a posteriori, les informations nécessaires à l'identification du véhicule, du lieu, les caractéristiques techniques du véhicule (certaines résultant d'analyses préalables des fichiers enregistrés), etc.

Il a donc été nécessaire d'associer à chaque fichier acquis un fichier paramètres correspondant, renseignant ces différents aspects. L'évolution des informations requises a nécessité une évolution du format et du contenu de ces fichiers paramètres, qui sont donc identifiés par une version (cf. figure 4.4). Le format est libre ce qui facilite la modification et la compréhension.

&nom_fichier.1	Identification version (&) et nom du fichier
nom_générique	Nom générique (commun à plusieurs fichiers)
MARSEILLE	Ville
RENAULT 21 GTS	Modèle véhicule
DRIVE-FRANCE	Phase d'expérimentation
11 0. 0. 5.0 250.0	Identification enregistreur et conversion A/D
8	Nombre de voies acquises
1 0.7229 0. 1	Voie N° i : coefficients Ax + B, type de conversion
2 30.0 0. 1	idem
3 1.0 0. 2	
4 0. 0. 3	
5 0.862 -20.63 4	
6 0.86 -19.37 4	
7 0.876 -18.96 4	
8 0.4082 -2.0408 5	
4980 1000 4980. 5 250 12. 120	Diverses informations d'étalonnage
1 2 3 4 5 -6 7 8	Ordre et sens des 8 voies logiques (ex: en 6 essuie-glaces à 0 si activés)
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1	Validité des 14 voies enregistrées (0: OK)
1 0 0 1 0 0 0 0	Validité des 8 voies logiques (0 : OK)
1 55 3	Validité des trajets (premier : 1, dernier : 55 et exclus : 5 à 7)
5 6 7	Pondération du fichier
1.0	Rapports de transmissions (vit. / rég. en val. brutes)
0. 0.34 0.60 0.94 1.28 1.56	Seuil de test de cohérence vitesse - régime
115	Codes d'identification (num. fichier, générique, véh., ville, modèle, phase)
15 6 61 2 1 3	Affectation des voies mesurées (vitesse en 1, etc.)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	Info. véhicule (année, kilométrage, poids, puissance, régime de couple maxi, cylindrée)
1988 32916 970	vitesse équivalentes aux 1000 tours/mn,
65. 5500. 1721.	technologie (Essence 1, Diesel 2, etc.)
8.2 14.5 22.7 30.8 37.60	Type mine
1	
L48205	

Figure 4.4 : Exemple d'un fichier de paramètres associé à un fichier de mesures enregistrées sur un véhicule Renault 21 en région de Marseille

Le même type de fichier paramètres est utilisé quelque soit la provenance (et le format) des fichiers de données (avec quelques nuances : pour les fichiers en valeurs pré-calculées, toutes les conversions seront à 0).

4.3.3 - Lecture et interprétation des données

4.3.3.1 - Fichiers issus des systèmes d'acquisition SYMADE

Ces fichiers ont nécessité le développement des outils suivants :

a) Accès, lecture des fichiers au niveau 0

De par la taille des fichiers (jusqu'à 4 ou 8 MOctets) et leur nombre, la rapidité d'accès aux informations est devenue primordiale. Des procédures d'accès en langage C ont été utilisées. Ces outils élémentaires (interfacés avec les sous-programmes de niveau supérieur), réalisent principalement la lecture / écriture des octets, le positionnement dans le fichier, plus les tests d'erreur de lecture ou d'accès.

Les procédures élémentaires équivalentes en FORTRAN sont également disponibles (lecture en accès direct).

b) Décodage des octets enregistrés

Des sous-programmes utilitaires s'appuyant sur les précédents ont été développés pour :

- la lecture et interprétation des blocs de configuration du fichier,
- la lecture d'un bloc d'information selon la structure identifiée par la configuration,
- le calcul des informations brutes (résultant du codage sur un ou 2 octets, des décalages et divisions éventuels, et notamment des octets correspondant à des voies logiques (8 voies codées 1 ou 0 sur un octet), et de l'information "contact " qui permet de délimiter la fin réelle du trajet dans le dernier bloc de mesures.

La possibilité d'une configuration assez variable des blocs de mesure a nécessité une structure particulière de programmation pour identifier les octets correspondants aux valeurs mesurées, compte tenu de leur codage et de la fréquence d'acquisition. En effet, dans un bloc de mesure, la constitution des sous-blocs d'octets (ou acquisition) diffère d'une ligne d'acquisition à l'autre (cf. figure 4.2).

D'autres outils ont par ailleurs été développés pour afficher / éditer / corriger les octets et les valeurs brutes selon la structure d'enregistrement (cas d'erreur de configuration, d'erreurs de date liées aux changements d'horaires, etc.).

Enfin des sous-programmes permettent de contrôler la validité des fichiers :

- test de la cohérence de la structure par rapport à la configuration : Les octets délimiteurs ne peuvent prendre que 2 valeurs (0 ou 255). En cas d'autres valeurs, le fichier présente un

problème de structure. On cherche dans ce cas à retrouver plus avant dans le fichier une structure normale et on neutralise la partie endommagée.

- test de la cohérence des dates de trajet : compte tenu de la temporisation de fin de trajet, une durée minimale est normalement requise entre deux trajets. D'autre part en fin de chaque trajet, on doit avoir indication de l'arrêt du véhicule (information contact). En cas de durée entre trajets trop courte, ou d'absence d'arrêt du véhicule, on doit conclure à un dysfonctionnement de la centrale (tension batterie insuffisante ou micro-coupure). Celle-ci le plus souvent se ré-initialise après quelques instants ou lorsque la tension de la batterie interne, tombée trop bas, le permet à nouveau. En cas de coupure de courte durée, le trajet découpé artificiellement à l'enregistrement, peut être reconstitué.

Jusqu'à ce niveau d'interprétation des données enregistrées, les outils sont indépendants de la configuration de mesure (et de la version du logiciel de gestion des centrales d'acquisition).

c) Calcul des valeurs mesurées

A chaque fichier de données analysé est associé un fichier de paramètres. Des outils ont été développés pour :

- la saisie et l'édition de ces paramètres (associés au contrôle des analyses).
- l'utilisation et la validation des paramètres correspondant à un autre fichier de données, ou l'utilisation de conversions par défaut.

La configuration complète décrite par ces fichiers paramètres permet :

- de tenir compte de la validité du trajet et des voies mesurées
- de calculer les valeurs mesurées selon l'affectation des voies, le type de conversion, les coefficients correspondants,
- de créer la base de temps (et de distance parcourue) des informations,
- de mémoriser l'ensemble des données mesurées au cours d'un trajet entier.

Des outils élémentaires de conversion des mesures selon leur type ont été développés (voies fréquences, analogiques, voies logiques). D'autres sous-programmes permettent de contrôler la validité des informations :

- test de la cohérence des informations vitesse et régime de rotation moteur (selon les rapports de transmission),
- test des voies mesurées : pour chacune des voies mesurées on définit éventuellement une configuration de test : valeurs minimale et maximale admissibles, variations maximales. On dénombre en fin de lecture d'un fichier les situations de franchissement de ces seuils, pour chacune des voies enregistrées.
- statistiques simples : pour chacune des voies mesurées, on calcule sur un trajet ou sur le fichier les valeurs minimales et maximales, la valeur moyenne et l'écart-type.

Les résultats de ces tests permettent d'identifier une voie déficiente ou une conversion erronée. On mettra alors à jour le fichier des paramètres concernant la validité de cette voie ou des trajets correspondants.

4.3.3.2 - Schéma global de lecture et interprétation des informations

La lecture et l'interprétation des données issues des centrales d'acquisition embarquées à bord des véhicules s'articule de manière schématique comme illustrée en figure 4.5, autour des utilitaires décrits précédemment. Ce schéma s'insère lui-même dans un contexte plus global d'analyse des variables enregistrées, décrivant les usages (trajets, etc.) et les conditions de fonctionnement des véhicules.

La lecture des premiers blocs de configuration d'un fichier de données et du fichier des paramètres associés permet de déterminer la structure du fichier, l'affectation des voies et leur validité. La lecture des blocs de mesure selon cette structure permet de calculer les valeurs des paramètres mesurés au cours d'un trajet et de les tester selon une configuration de test

Préalables :

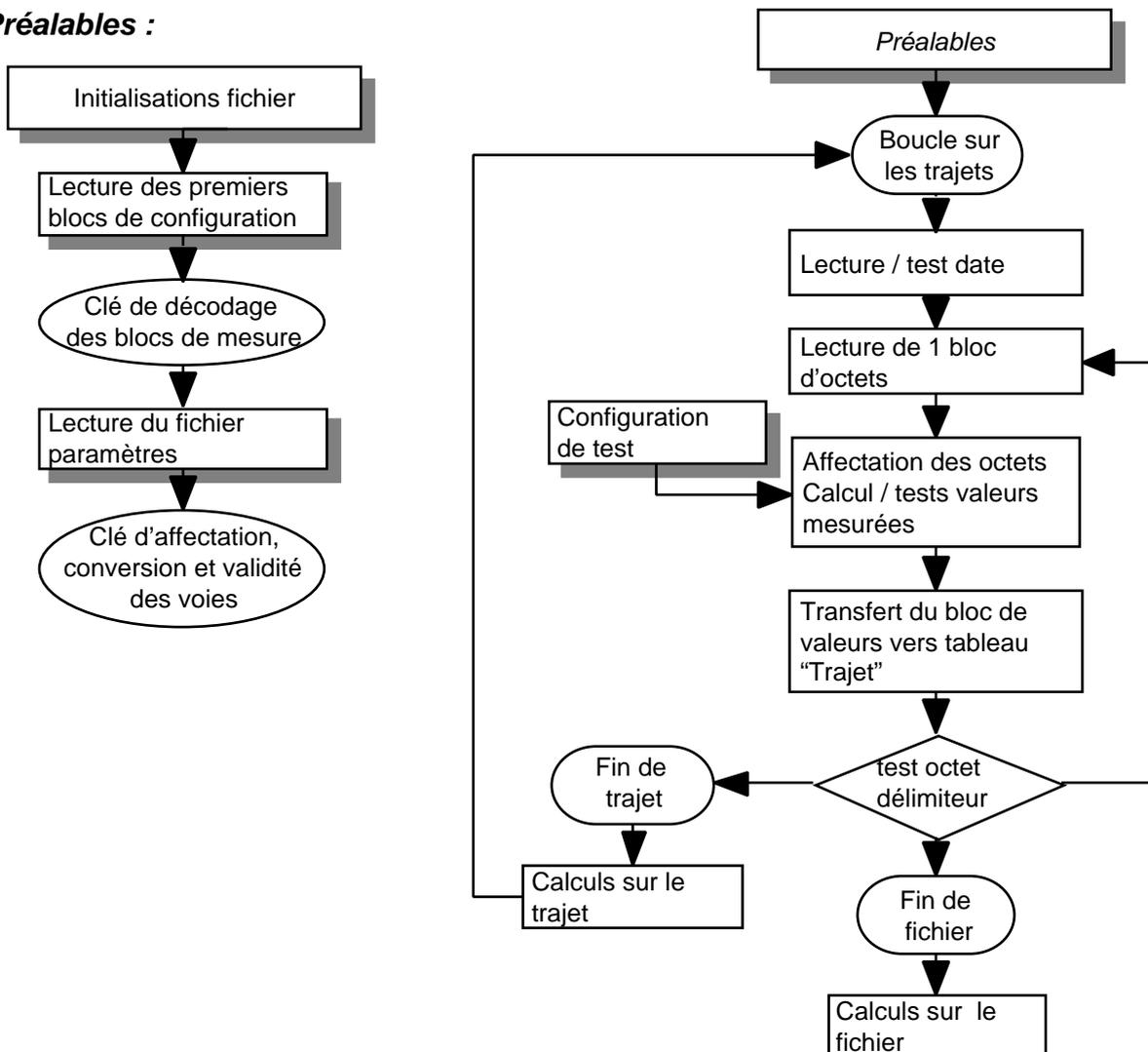


Figure 4.5 : Schéma de principe de la lecture et interprétation des données issues des centrales d'acquisition

préalablement définie. La fin de trajet est identifiée par l'octet délimiteur des blocs de mesure. On calcule alors les informations intégrées sur le trajet, avant de lire le trajet suivant.

Plusieurs outils ont été développés sur ce schéma pour une pré-analyse des fichiers enregistrés, notamment pour :

- le contrôle de la validité des fichiers : test de la structure du fichier, de la cohérence des dates et des fins de période d'acquisition, décodage / affichage (écran / fichier) des octets selon la structure du fichier et la configuration de mesure, avec possibilité de positionnement et correction du fichier ;
- le contrôle de la validité des informations : contrôle global du fichier par édition d'informations synthétiques par trajet : durées, distances, consommations, etc., tests de la cohérence des mesures, édition de statistiques simple, édition des valeurs mesurées, etc.

4.3.3.3 - Autres fichiers

Les fichiers en provenance d'autres laboratoires nécessitent des outils spécifiques de lecture des informations, et sont gérés de manière similaire en ce qui concerne la prise en compte de la configuration de mesure (affectation et validité des voies, validité des trajets, informations diverses), les tests et vérification des informations (dates, valeurs mesurées, etc.), la gestion des valeurs mesurées par trajet et la suite des autres calculs.

4.3.4 - Calculs et intégration

Des outils ont été développés pour permettre différentes analyses des données enregistrées à bord des véhicules. Ils diffèrent des précédents en ce sens qu'ils sont portés sur des grandeurs identifiées (vitesse, consommation, tension batterie, etc.). Ils gèrent indifféremment les fichiers issus des centrales d'acquisition, des expérimentations antérieures (au moyen d'autres matériels) et en provenance d'autres laboratoires ou dérivés d'analyses préalables.

Les principales fonctions sont les suivantes :

- calculs de variables dérivées des signaux mesurés: accélérations, consommations, divers indicateurs cinématiques, rapports de boîte de vitesse, identification d'arrêts et d'événements, interprétations diverses des valeurs, lissages, tests, comptages, etc. ;
- édition des variables enregistrées et dérivées ;
- calcul de distributions (mise en classes) d'une variable ou du croisement de 2 variables, en fonction de la durée ou de la distance parcourue, ou calcul d'une troisième variable selon les classes. Ces distributions peuvent être ventilées selon le rapport de boîte, la période (jour / nuit), ou d'autres critères. La définition des classes des variables est lue préalablement. Les distributions sont calculées par fichier analysé et cumulées par véhicule (plusieurs fichiers pouvant concerner un seul véhicule). Un utilitaire adéquat permet de cumuler plusieurs distributions (intégration sur un ensemble de véhicules, etc.).

- analyse des signaux cinématiques (vitesse, accélération du véhicule) selon les modes de fonctionnement (accélération, stabilisé, décélération) ;
- calcul des distributions d'occurrence des changements des rapports de boîte en fonction des vitesses, accélérations, régime moteur (utilisées ensuite pour la simulation des changements de rapports de boîte au cours des tests sur banc à rouleaux) ;
- calculs de valeurs synthétiques par intégration au cours d'un trajet ou d'un segment cinématique correspondant à différents critères d'interruption.

Enfin, on mentionnera des analyses spécifiques concernant les conditions thermiques de fonctionnement des moteurs, les stratégies de conduite (utilisation des boîtes de vitesses, régimes, accélérations pratiquées, etc.), les cinématiques des véhicules, etc.

Ces outils s'appuient directement sur les utilitaires précédents. Ils permettent donc la prise en compte des différentes versions des centrales d'acquisition et des fichiers paramètres (pour la prise en compte des configurations de mesure : ordre, validité, affectation et fréquence d'acquisition des voies, etc.). Ils permettent également la gestion d'une base de temps irrégulière, une gestion "unifiée" des différentes voies (lues ou calculées) et une généralisation de la notion d'intégration des variables par trajet, séquence, segment cinématique ou entre différents événements (après lecture complète du trajet, on identifie les indices correspondant au type de segments considérés, avant d'effectuer les calculs entre ces indices).

Des outils complémentaires prolongent les fonctions précédentes notamment pour la reconstitution des journées d'utilisation et l'analyse des usages journaliers à partir des informations par trajets et pour l'analyse des conditions de fonctionnement et d'utilisation des véhicules à partir des histogrammes, distributions croisées, etc.

Un schéma global d'analyse des fichiers en vue de la constitution d'un fichier des variables cinématiques intégrées au niveau d'un segment cinématique est donné en figure 4.6.

Comme précédemment, ce schéma implique un bouclage sur les blocs de mesure et sur les trajets. On archive et teste l'ensemble des valeurs mesurées sur un trajet, avant de calculer les variables dérivées et d'effectuer des calculs spécifiques décrits précédemment. En cas de calculs intégrés sur un segment cinématique, on recherche dans le trajet un indice correspondant au critère souhaité de définition du segment. Ce critère peut être l'identification d'un arrêt du véhicule, une durée ou une distance donnée, ou correspondre à l'identification d'un événement mesuré par l'une des voies enregistrée (ou calculée). On intègre les calculs entre deux indices d'interruption, de la même manière que sur un trajet entier (qui constitue un cas particulier de segment).

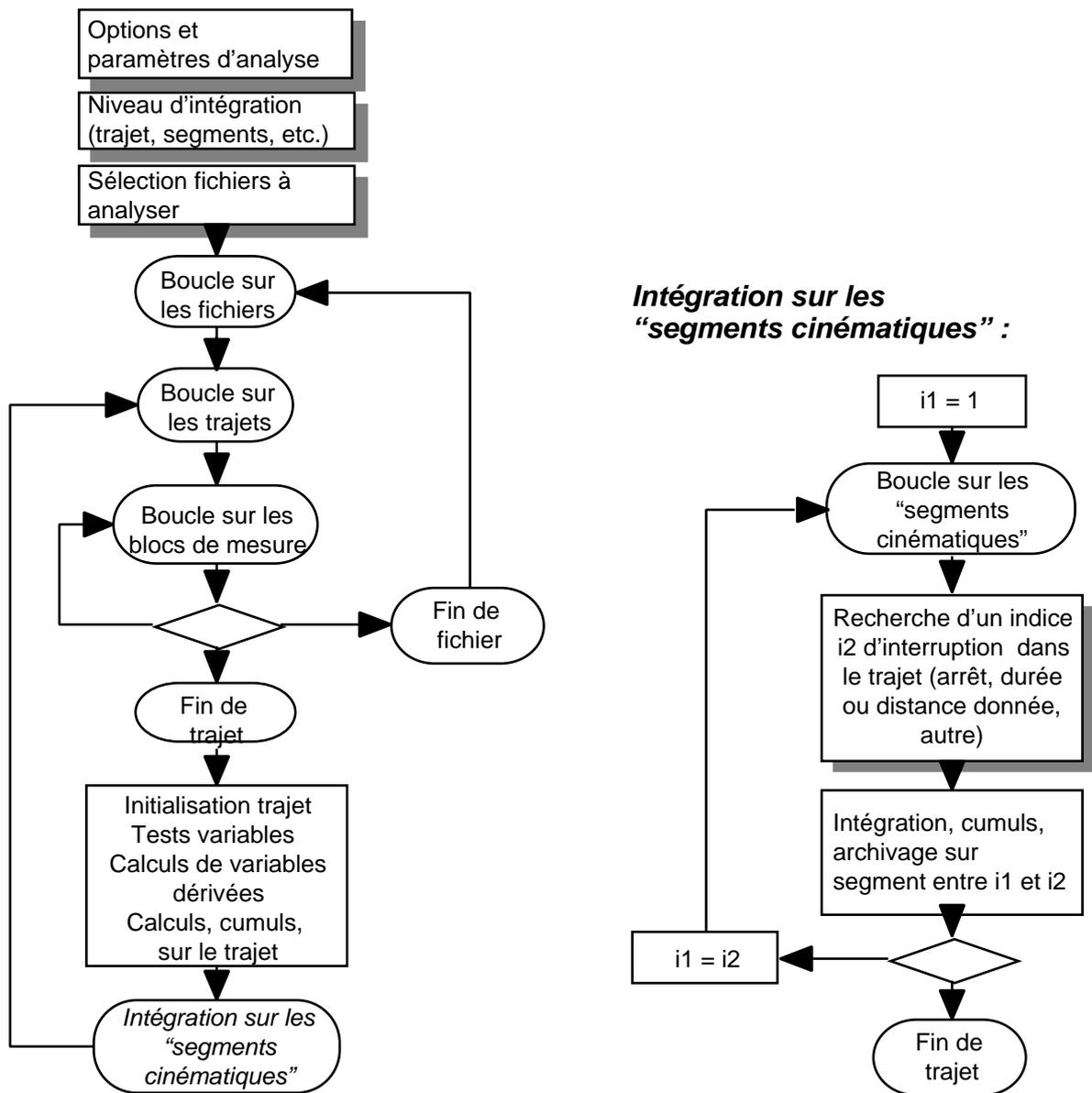


Figure 4.6 : Schéma de principe de l'organisation du calcul des variables cinématiques, au niveau d'un trajet, d'une séquence entre arrêts, d'un segment cinématique ou selon un autre mode de découpage

4.3.5 - Analyses spécifiques en vue de la construction de cycles de conduite

A partir des fichiers constitués précédemment, on procède à des analyses statistiques successives, dont certains résultats sont archivés en vue de la construction de cycles de conduite. On utilise principalement le logiciel d'analyse des données SPAD et, pour des analyses descriptives complémentaires, le logiciel BMDP (cf. [Lebart, 1982 et 1993] et [BMDP, 1990]).

Des outils ont été conçus pour gérer les fichiers résultats, construire un fichier des trajets à partir du fichier des segments cinématiques et pour gérer un algorithme de reconstitution d'un cycle de conduite en fonction des résultats des analyses statistiques.

4.3.5.1 - Constitution des fichiers analysés

Les fichiers des segments cinématiques sont construits par les outils décrits au chapitre 4.3.4. Les fichiers des trajets sont construits alternativement par les mêmes outils, ou à partir du fichier des segments comme indiqué au chapitre 4.3.5.3. Les deux types de fichiers sont construits de manière similaire et comportent essentiellement :

- l'identification du véhicule (phase expérimentale, zone géographique, modèle et véhicule),
- l'identification du segment ou du trajet (numéro d'ordre, date et heure de début, etc.),
- des informations globales calculée sur le segment / trajet (durée, distance, arrêts, etc.),
- puis les variables spécifiques par bloc d'informations cohérentes (variables décrivant les vitesses et leur distribution, les accélérations, les conditions thermiques, etc.),
- à ces variables, et après les analyses factorielles, s'ajoutent les coordonnées factorielles et l'affectation des segments / trajets aux classes correspondantes des diverses partitions.

Le fichier des trajets comporte en outre la constitution du trajet en les différents types de segments

La structure des données enregistrées suit le schéma suivant (figure 4.7) : pour une phase expérimentale (i.e. un pays ou les données enregistrées par un laboratoire), plusieurs localités ont été concernées, et globalement un certain nombre de modèles de véhicules. Pour un modèle et une localité, un ou plusieurs véhicules ont été instrumentés et ont restitués chacun un ensemble de trajets. Ces trajets sont à leur tour analysés à un niveau plus fin de segments cinématiques (entre arrêts ou autre).

Les localités, les modèles et les véhicules ayant été sélectionnés pour assurer la représentativité de l'échantillon de véhicules, l'ensemble des trajets ou des segments est analysé comme une

Phase expérimentale	Localisations	Véhicules	Trajets	Segments cinématiques	Variables
• Phase P1	• Localité A	• Véhicule A	• T1	• S(1,1) • S(1,2) S(1,3)	• Var (1 à N)
			• Tj	• S(j,1) • S(j,2) • ... • S(j,n)	
		• Véhicule B • Véhicule C • ... • Véhicule K	• trajets T1 à Tm • trajets T1 à Tk	• S(n,k) • Segments ...	
	• Localité B	• Véhicule L • etc.	• trajets	• segments	• variables
• Phase P2	• Localités C, D • etc.	• Véhicules	• trajets	• segments	• variables
• etc.					

Figure 4.7 : Structure des données enregistrées

représentation globale de l'utilisation des véhicules. On ne considère pas les niveaux : véhicules, modèles, localités ou phase expérimentale, sauf comme éléments illustratifs de certaines analyses. Afin de redresser des inégalités des périodes de suivi des véhicules et des nombres de véhicules suivi selon les phases, une procédure de pondération est appliquée (cf. chapitre 5.2).

4.3.5.2 - Gestion des analyses statistiques

Deux types d'"éléments cinématiques" (c'est à dire des portions de déplacement, illustrées en particulier par le courbe de vitesse en fonction du temps) sont concernés par les analyses :

- des segments cinématiques correspondant à différents critères (séquence entre deux arrêts successifs, segments de longueur ou de durée donnée, etc.)
- des trajets entiers, (éventuellement reconstitués par addition des segments précédents).

Il n'y a pas de différences majeures d'analyse des différents types de segments sauf au niveau de certaines variables (le nombre d'arrêt sera toujours 1 dans le cas de séquences entre arrêts). Par contre l'analyse des trajets diffère par les variables descriptives considérées (on considérera par

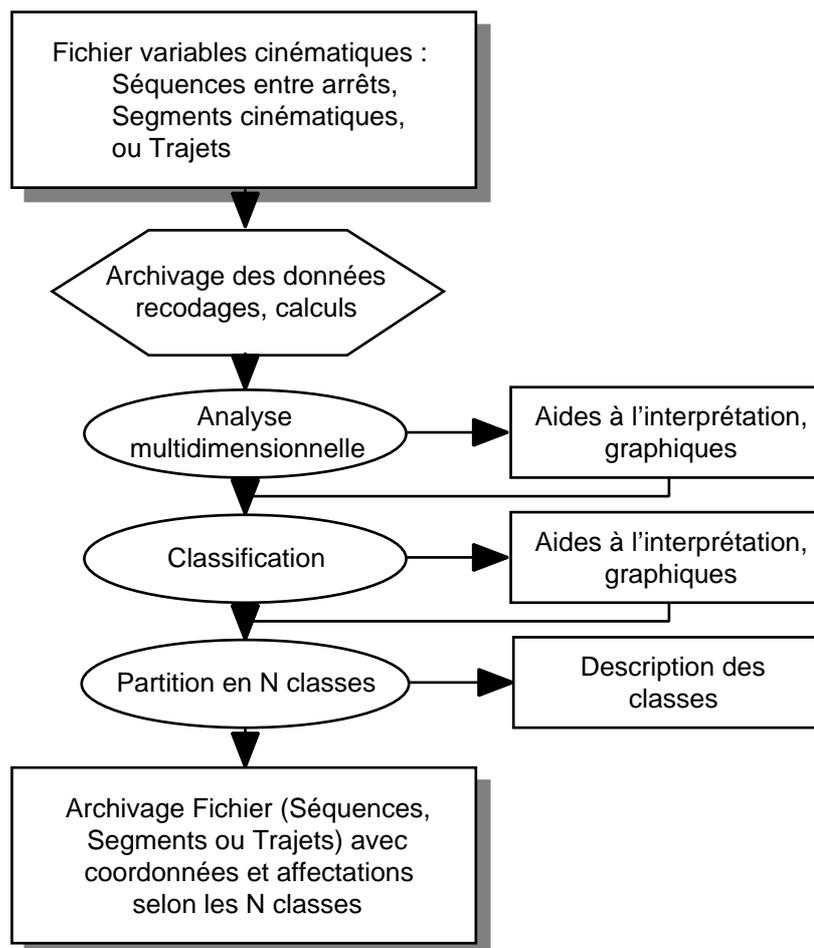


Figure 4.8 : Schéma de principe de l'analyse statistique d'un fichier de séquences entre arrêts, segments cinématiques ou trajets, décrits par les variables cinématiques

exemple leur constitution en segments cinématiques).

Plusieurs types d'enchaînements d'analyses statistiques ont été envisagés pour les différents types de fichiers précédents : Analyse en Composantes principales (A.C.P.) suivie de classification, Analyse des Correspondances Binaires (A.C.B.) et classification, enfin recodage en classes, Analyses des Correspondances Multiples (A.C.M.) puis classification. Tous ces enchaînements (figure 4.8) incluent une étape d'archivage des données, de recodage et de calculs préalables, des étapes d'aides à l'interprétation et de tracé de graphiques factoriels, les étapes d'analyse factorielle, de classification et de partitionnement, et une étape de réédition du fichier d'origine avec les informations complémentaires (coordonnées factorielles et affectation aux classes issues de la classification et partition).

Afin de faciliter le montage "rapide" d'une analyse selon le fichier à analyser (fichiers des séquences entre arrêts, des segments ou des trajets, complets ou sur un échantillon des enregistrements) et le type d'analyse envisagé, un utilitaire de préparation des fichiers paramètres différentes étapes SPAD a été élaboré. On dispose ainsi immédiatement de l'ensemble des étapes, qu'il faut cependant ajuster pour la sélection des variables, la pondération, les filtres éventuels, les nombres d'axes factoriels à éditer ou à utiliser, la partition souhaitée, etc., en s'appuyant notamment sur les résultats et les aides à l'interprétation.

4.3.5.3 - Gestion globale des analyses

Les outils précédents sont envisagés pour réaliser :

- l'analyse typologique des conditions de circulation à partir des segments cinématiques,
- l'analyse typologique des trajets selon leur constitution en segments cinématiques.

Cette seconde étape n'est rendue possible qu'après reconstitution des trajets à partir du fichier des segments, incluant leur affectation. En effet, l'objectif (cf. chapitre 5.4) est de caractériser les trajets selon les différents types de conditions de circulation (i.e. de segments cinématiques) rencontrés. Il a donc été nécessaire de créer des outils pour gérer ces différents fichiers et cumuler au niveau trajet les informations établies au niveau des segments.

L'enchaînement des analyses statistiques et la construction de cycle est illustrée figure 4.9. Plusieurs sous-programmes ont été élaborés et sont utilisés tant par l'outil de gestion que par l'outil de construction des cycles.

Ce sont notamment des utilitaires de lecture / écriture des variables segments ou trajets : ces outils sont paramétrés selon l'enregistrement éventuel de coordonnées factorielles et de partitions (et leur nombre). Les informations sont organisées par blocs d'informations cohérentes (identifications, variables décrivant la vitesse, distribution croisée, etc.), associés à des instructions spécifiques d'écriture / lecture. Ces instructions sont communes à l'ensemble des outils d'archivage / lecture des segments ou trajets. De cette manière, il est possible de modifier simplement les informations archivées et leur format au travers des différentes étapes de programmation, et notamment d'ajuster les instructions de lecture des logiciels d'analyse.

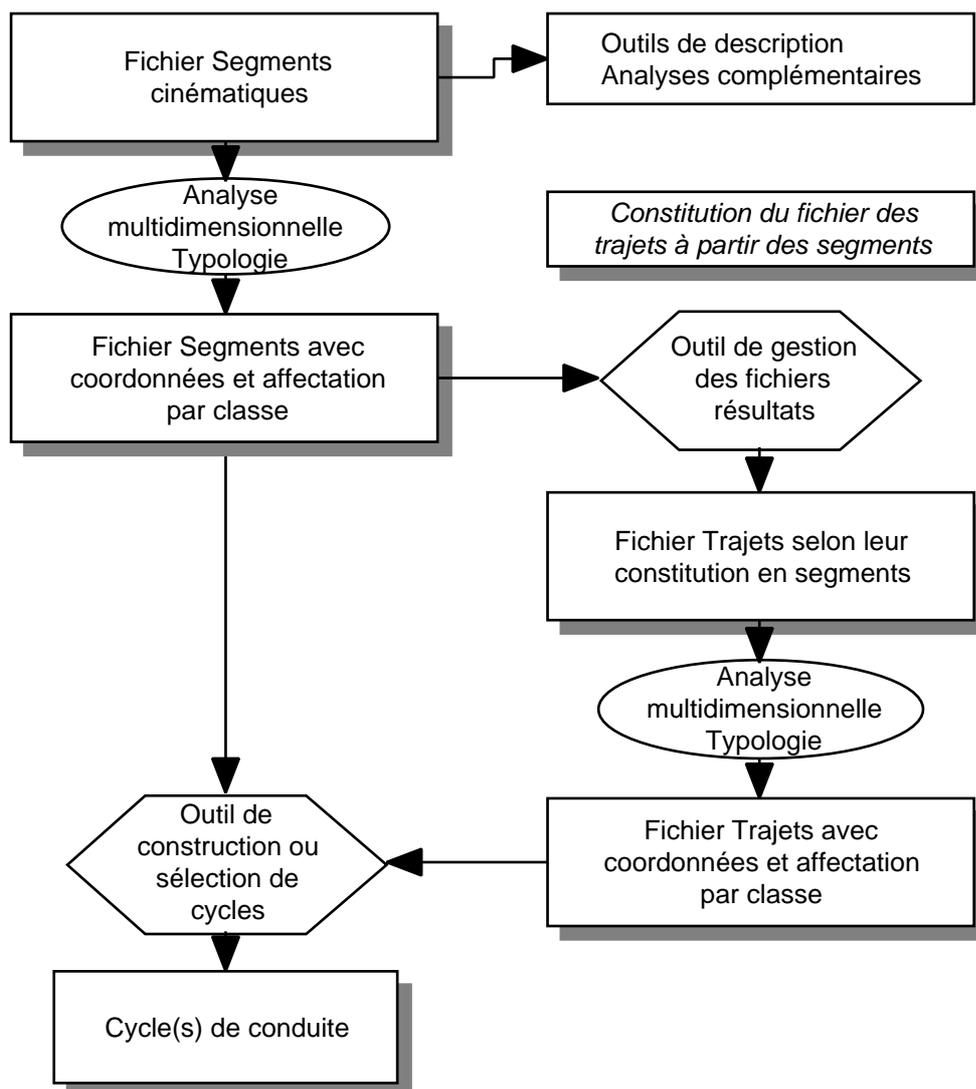


Figure 4.9 : Enchaînement des analyses statistiques, de la gestion des fichiers résultats et de la construction de cycles d'essai

L'outil de gestion des fichiers résultats permet :

- à partir de la lecture d'un fichier segment,
 - la sélection aléatoire ou selon certains critères de segments cinématiques,
 - la construction d'un fichier des successions des différents types de segments,
 - la constitution du fichier des trajets par cumul des segments correspondants,
- à partir de la lecture des fichiers segments et trajets :
 - l'extraction d'un échantillon de segments correspondant à un échantillon de trajets
 - l'affectation des codes trajets (issus de l'analyse factorielle et typologique des trajets) aux segments.

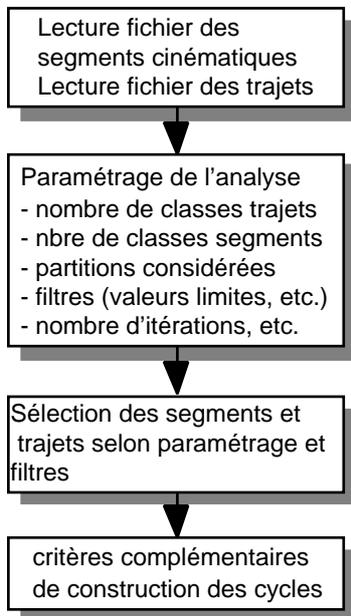
4.3.5.4 - Outils de construction ou sélection de cycles d'essai

Deux approches ont été envisagées pour l'élaboration des cycles de conduite (Cf. chapitre 5.5) : l'une par addition de segments cinématiques (approche microscopique), l'autre par sélection de

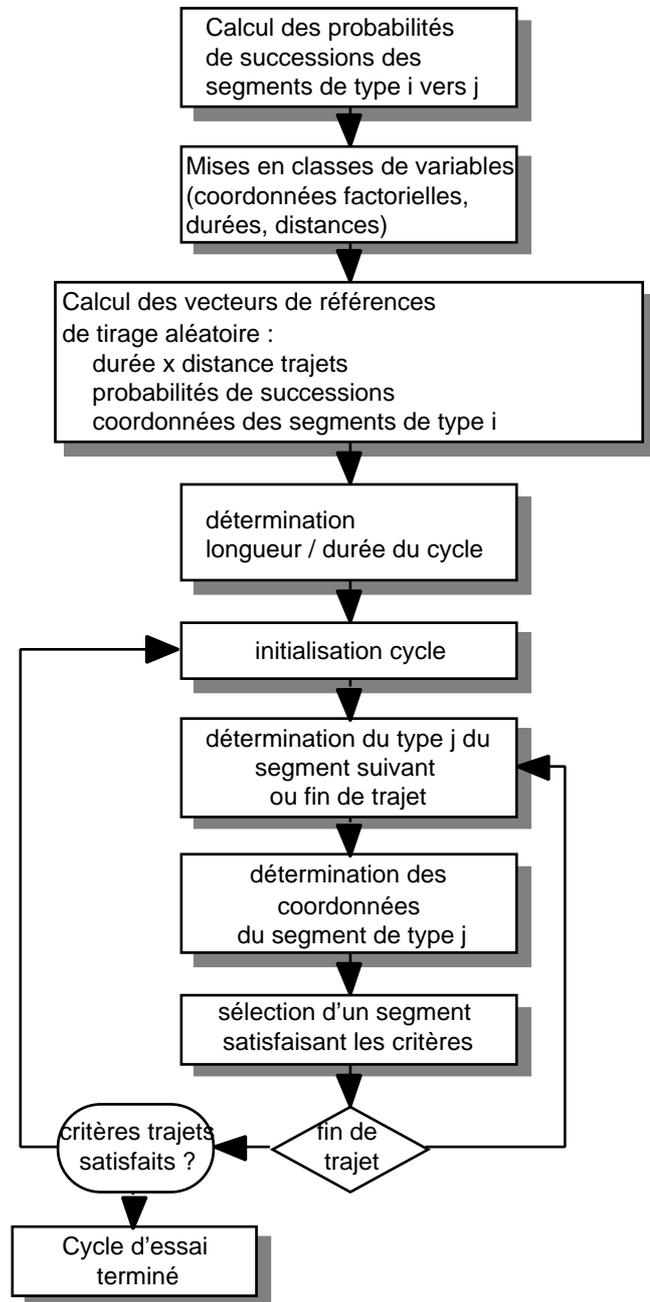
trajets les plus "représentatifs" (approche macroscopique). Ces deux approches sont illustrées de manière très synthétique en figure 4.10.

L'approche microscopique a nécessité la mise en oeuvre d'utilitaires permettant à partir la lecture d'un ensemble de segments ou de trajets décrits et après un paramétrage de l'analyse

Préalables :



Approche microscopique :



Approche macroscopique :

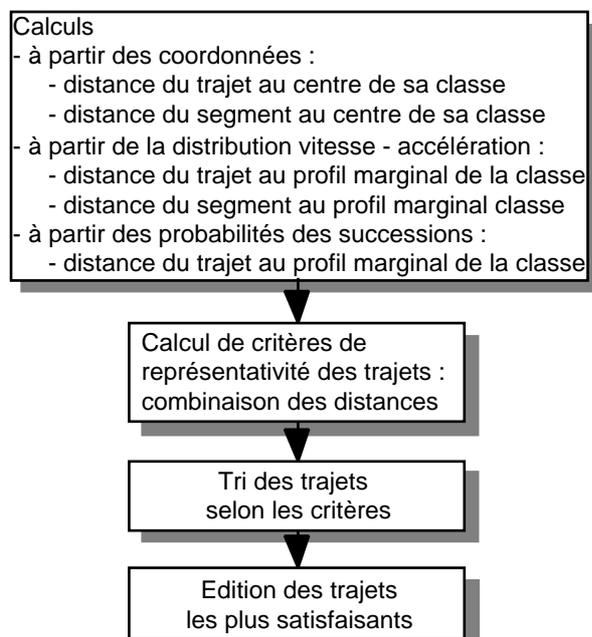


Figure 4.10 : Schéma simplifié de la construction de cycles d'essai :

- approche macroscopique par sélection de trajets "optimaux"
- approche microscopique par sélection et juxtaposition de segments (dans le cas de segments quelconques, le segment j doit satisfaire la condition: vitesse initiale proche de la vitesse finale du segment i)

(partitions trajets et segments considérées, classe de trajets retenue, divers critères complémentaires de détermination du cycle, etc.) :

- la calcul des probabilités de successions des différents types de segments,
- le calcul de la distribution croisée des premières coordonnées factorielles des segments, et de la distribution de variables trajets (durée, distance),
- pour chacune de ces distributions, on construit un vecteur de référence qui permettra ensuite par tirage aléatoire de reproduire cette distribution

L'approche macroscopique s'appuie principalement sur le calcul des distances factorielles des segments et des trajets aux centres de leur classe respective, et sur le calcul des distances entre la distribution croisée des vitesses et accélérations d'un trajet et la distribution marginale calculée sur la classe correspondante. Des utilitaires de tri permettent de sélectionner les meilleurs trajets par rapport à une combinaison de critères dont la définition est laissée à l'utilisateur.

4.3.6 - Outils de terrain

Afin de tester in situ de la bonne marche des systèmes d'acquisition et capteurs, des outils ont été développés sur ordinateur portable, en Turbo-Pascal, pour un décodage, une relecture, et une visualisation rapide d'un fichier de données enregistrées.

Ces outils ont été conçus pour tenir compte des différentes versions et évolutions des enregistreurs (gestion des paramétrages, décalages de zéro, divisions, et fréquences variables selon les voies). Un environnement multi-fenêtres et une conception modulaire objet permettent une gestion plus conviviale et plus souple des visualisations graphiques et une maintenance facilitée. Ces outils permettent par sélection de menus :

- la gestion des fichiers de données des enregistreurs selon leur version, et la vérification de leur structure et de la cohérence des informations,
- la gestion d'un fichier de coefficients et libellés associé à une campagne de mesures permettant l'interprétation des voies (conversion, échelles de représentation graphiques, légendes) ;
- l'identification rapide des trajets par scrutation sans lecture des blocs de mesures, selon la structure du fichier ;
- le positionnement sur l'un des trajets, la possibilité d'en décodé les octets, de lister les variables enregistrées (à l'écran ou vers un fichier), ou de les visualiser graphiquement à l'écran.

4.4 - Conclusions

L'instrumentation de véhicules en vue de la constitution d'une base d'information sur les usages et conditions de fonctionnement repose sur 2 principes :

- l'observation en situation réelle : des véhicules privés sont équipés d'un système d'acquisition de données et suivi en utilisation habituelle par leur conducteur sur une période d'un mois,

- la constitution d'un échantillon de véhicules : par sélection de zones géographiques, de modèles de véhicules et des propriétaires de ces véhicules de manière à assurer une certaine représentativité.

Le nombre de véhicules expérimentés étant limité par le coût, on cherche à obtenir une représentation de l'usage des véhicules, sans prétendre décrire l'influence des catégories de véhicules, des zones géographiques ou des conducteurs.

L'observation en usage réel impose l'automatisme du matériel en raison de l'impossibilité du contrôle de son fonctionnement et l'impossibilité de bénéficier d'informations complémentaires sur les conditions de conduite. Les équipements doivent satisfaire à des contraintes sévères d'environnement à bord des véhicules. Les principaux paramètres d'utilisation du véhicule et de fonctionnement du moteur sont mesurés en continu.

La sélection des véhicules passe par l'identification de zones géographiques d'expérimentation, des modèles de véhicules les plus présents dans le parc automobile. Un tirage aléatoire d'adresses de propriétaires de ces véhicules à partir du fichier national des immatriculations et un questionnaire préalable permettent de constituer un échantillon assurant la diversité des conducteurs.

Les expérimentations et les analyses ultérieures ont nécessité le développement d'outils informatiques pour vérifier in situ le bon fonctionnement des systèmes, pour valider, corriger et interpréter les données enregistrées, et pour gérer des analyses spécifiques à la construction de cycles de conduite. Ces outils permettent de gérer les nombreux problèmes liés à l'instrumentation à bord de véhicules, dans un environnement sévère et en l'absence de contrôle du fonctionnement des matériels, et avec des volumes considérables de données enregistrées (quelques heures de fonctionnement par jour et par véhicule).

Chapitre 5 - Méthode d'analyse et de construction de cycles de conduite

5.1 - Introduction

On dispose d'une base d'information sur les conditions d'utilisation et de fonctionnement d'un échantillon de véhicules. Cette base est constituée par l'enregistrement en continu des paramètres de fonctionnement et en particulier la vitesse du véhicule, au cours de trajets effectués en usage normal par les conducteurs. La base d'information a été constituée pour permettre une représentation globale des conditions d'utilisation, par la sélection de modèles de véhicules représentatifs du parc automobile, de zones géographiques et de conducteurs diversifiés.

A partir de cette base, on souhaite construire un ou des cycles d'essai, - courbes de vitesse du véhicule en fonction du temps - garantissant une certaine représentativité par rapport à la réalité. La construction de cycles d'essai est une réduction ou modélisation de ces données. Nous avons choisi d'articuler cette modélisation selon deux aspects : d'une part la modélisation des conditions de circulation et d'autre part la modélisation des trajets effectués ou plus largement des usages des véhicules. La construction de cycles d'essai est envisagée selon quatre phases (cf. figure 5.1) :

1 - L'observation des conditions de circulation au travers de l'enregistrement chronologique de la vitesse des véhicules au cours de trajets, dont les principes méthodologiques ont été discutés au chapitre 4.

2 - La modélisation des conditions de circulation : on souhaite construire des cycles de

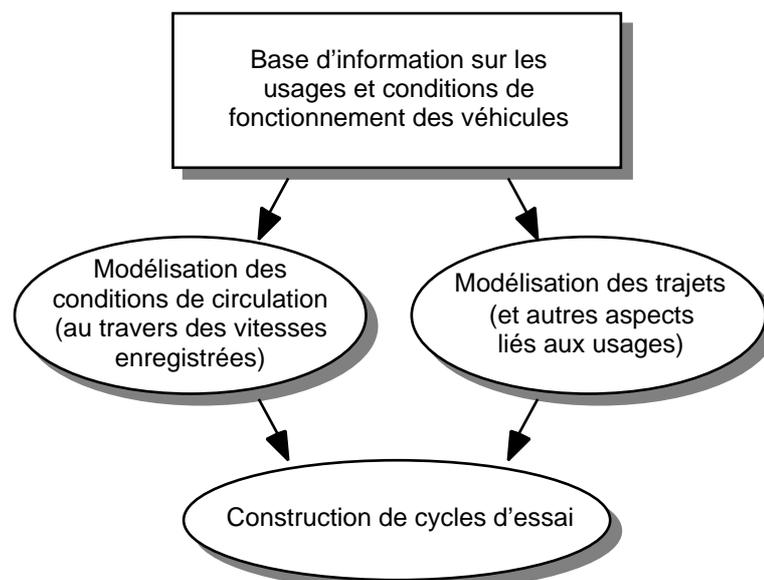


Figure 5.1 : Schéma de principe de la construction de cycles d'essai

conduite représentatifs des conditions de circulation. Les vitesses enregistrées à bord des véhicules constituent une mesure de ces conditions. Il ne s'agit pas de décrire les conditions de circulation "en moyenne" mais dans leur diversité. Les conditions de circulation varient selon divers éléments extérieurs (infrastructure, zone urbaine ou rurale, densité du trafic). Il s'agit de décrire les conditions à un niveau suffisamment microscopique ou "local" pour tenir compte de ce fait. En raison de cette hétérogénéité au cours des trajets, on envisage une décomposition des profils de vitesse en éléments cinématiques plus courts que le trajet, correspondant à des conditions de circulation locales.

On considère donc une "tranche" de déplacement d'un véhicule, décrite par sa vitesse, comme une mesure des conditions de circulation locales (d'un lieu). L'arrêt éventuel fait partie de cette description.

Au delà du choix de ce niveau d'analyse, il s'agit de sélectionner des paramètres cinématiques "pertinents" décrivant ces éléments, c'est à dire liés aux conditions de circulation. On conduit une réflexion sur les variables cinématiques utilisées antérieurement, leur nature et leur pertinence, sur le niveau d'analyse et sur les outils d'Analyse des Données appropriés en vue d'une caractérisation des conditions de circulation.

On évalue ensuite différents schémas : "variables - niveau d'analyse - outils", quant aux résultats de l'analyse typologique des conditions de circulation à partir d'un échantillon de données. On considère d'abord un schéma fondé sur les séquences cinématiques entre arrêts décrites par différentes variables et utilisant l'Analyse en Composantes Principales [Crauser, 1989].

Les insuffisances de ce schéma nous conduisent à sélectionner des variables décrivant spécifiquement la cinématique (à l'exclusion des variables décrivant la taille des séquences). On propose finalement une analyse de segments plus homogènes en taille que les séquences entre arrêts, et décrits par la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées. On utilise l'Analyse des Correspondances Binaires suivie de classification automatique.

3 - La modélisation des trajets : afin de construire des cycles représentatifs des usages des véhicules, on souhaite également décrire et caractériser les trajets. Cette caractérisation est envisagée selon une démarche similaire à celle développée pour l'analyse des conditions de circulation. Elle peut être généralisée à une notion plus large d'usage des véhicules (description des journées d'utilisation). Plusieurs approches sont envisagées s'appuyant sur la structure ou composition des trajets selon les différents types de conditions de circulation rencontrées.

4 - La construction de cycles d'essai : elle repose sur les caractérisations précédentes, c'est à dire sur les typologies des conditions cinématiques et des trajets, ainsi que sur d'autres critères tels que la durée d'un test, le nombre de cycles à définir, etc. La construction de cycles est envisagée selon deux schémas : on construit un cycle par juxtaposition de segments cinématiques jusqu'à reconstitution d'un trajet satisfaisant des critères de représentativité. Cette solution impose la

réalisation de transitions entre les segments. L'autre solution consiste en la sélection de trajets minimisant simultanément les critères de représentativité des segments et des trajets.

Des conditions de test autres que la vitesse doivent également être considérées : les conditions de démarrage, les rapports de boîte de vitesse à utiliser sur un véhicule pour reproduire le cycle de conduite lors des tests. Plus généralement, on doit s'interroger sur la prise en compte des capacités des véhicules (puissance, etc.) dans la construction des cycles.

On décrit d'abord dans ce chapitre les principes et hypothèses sous-tendus par cette démarche : observation en usage réel, vitesse d'un véhicule en tant qu'indicateur des conditions de circulation, hétérogénéité des conditions de trafic, etc. On discute ensuite de l'utilisation des cycles d'essai, des résultats de mesure des émissions de polluants sur ces cycles et de validation de la méthode.

On décrit ensuite les étapes de développements méthodologiques qui ont permis de concrétiser les approches de modélisation des conditions de circulation, de modélisation des trajets et de construction de cycles (illustrées en figure 5.2) :

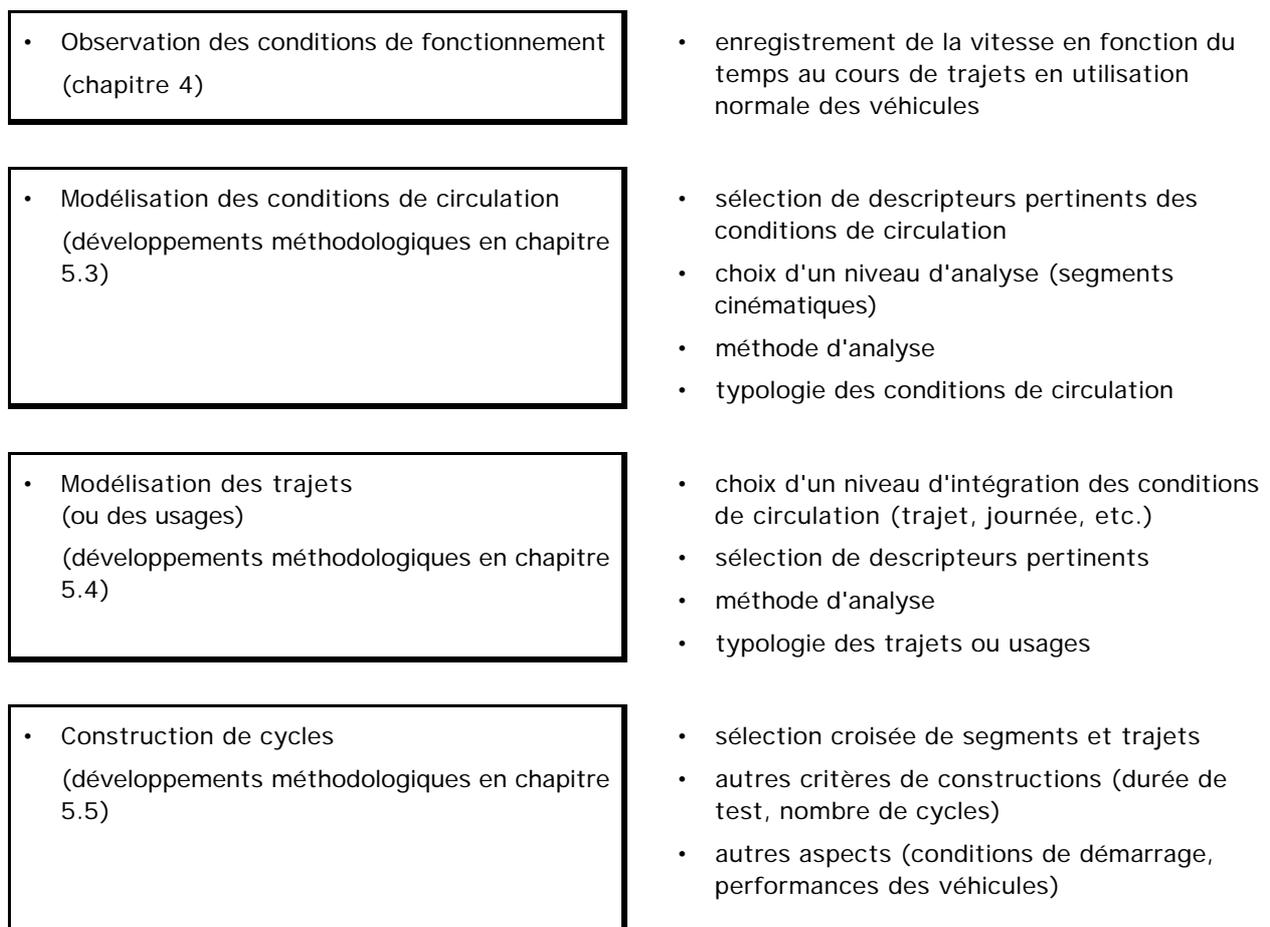


Figure 5.2 : Schéma simplifié de la méthode d'analyse des conditions de circulation et de construction des cycles

5.2 - Principes et hypothèses

On décrit les principes de la démarche adoptée de modélisation des conditions d'utilisation des véhicules en vue de la construction de cycles de conduite, les conditions de sa mise en oeuvre et les hypothèses sous-jacentes.

5.2.1 - Observation et modélisation

5.2.1.1 - Observation des conditions normales d'utilisation et de fonctionnement des véhicules

Les analyses reposent sur l'observation et l'enregistrement des conditions d'usage et de fonctionnement des véhicules. Suivant ce principe, une base de données a été constituée, par enregistrement à bord de voitures privées des principaux paramètres de fonctionnement du véhicule, dont la vitesse (cf. chapitres 4 et 6).

Les données enregistrées concernent un ensemble de 77 véhicules conduits par leur(s) conducteur(s) habituel(s). Au cours des 10000 trajets effectués, soit 90000 km parcourus, la vitesse est enregistrée en continu (à chaque seconde). Les données consistent donc en un ensemble de courbes de vitesse, correspondant à un ensemble de trajets divers parcourus par un échantillon de véhicules. Selon les principes méthodologiques mis en oeuvre (cf. chapitre 4), cette base de données constitue une description globale des conditions d'utilisation et de circulation : on ne s'intéresse donc pas au comportement de chacun des conducteurs ou à l'utilisation selon les catégories de véhicules. Elle est également une mesure des conditions de circulation des autres véhicules du trafic. Cette base est considérée comme représentative même si elle est relativement limitée en nombre de véhicules. Le cas échéant, il serait possible de s'appuyer sur d'autres sources statistiques (constitution du parc de véhicules, kilométrages annuels, enquêtes sur les déplacements, cf. chapitre 2) pour pondérer différemment les modèles de véhicules, les zones géographiques, en vue de redresser les résultats.

5.2.1.2 - Modélisation ou caractérisation

Un cycle type ou représentatif est finalement une réduction, un modèle des données observées. De fait, il s'agit d'une double modélisation destinée d'une part à caractériser les conditions de circulation et d'autre part à décrire les trajets.

La base d'information constituée est à la fois large (par le nombre de trajets enregistrés et les durées de route ou distances parcourues) et restreinte (par le nombre de véhicules instrumentés). De toute façon, elle est très large par rapport aux cycles que l'on souhaite développer, qui ne représenteront que quelques dizaines de minutes, pour des contraintes liées aux mesures d'émission sur banc d'essai. Il faut donc réduire ces données dans un souci de représentativité par rapport aux conditions réelles d'utilisation.

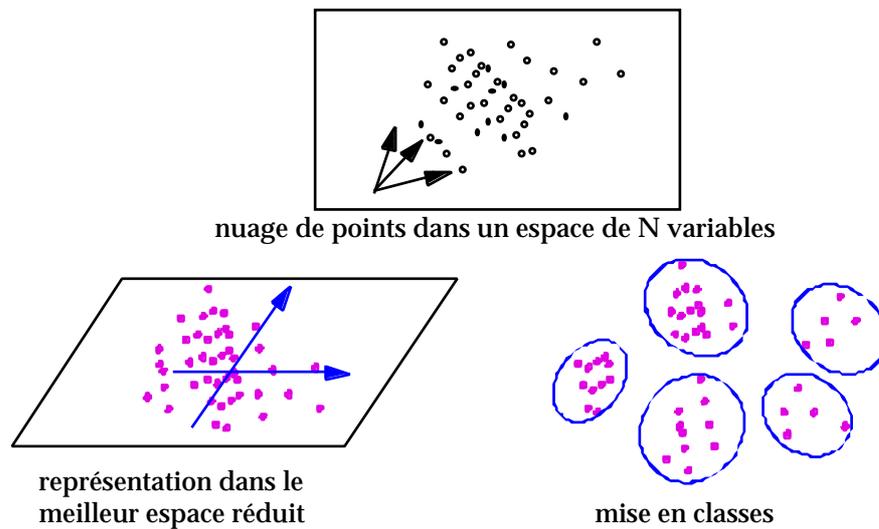


Figure 5.3 : Outils d'Analyse des Données pour la caractérisation des conditions d'utilisation et de fonctionnement des véhicules

Les conditions d'utilisation et de fonctionnement étant variées, on souhaite disposer non d'un cycle représentatif unique moyen mais éventuellement d'un ensemble de cycles décrivant les différentes conditions rencontrées (circulation en zone urbaine, trajets autoroutiers, etc.).

La démarche retenue repose sur une description de la base d'information au travers d'une partition en un ensemble de classes types. On propose l'utilisation des outils d'analyse des données pour aboutir à cette typologie (figure 5.3).

Une analyse multivariée doit permettre de comprendre les liens entre les variables descriptives considérées et de réduire la dimension du problème aux seuls facteurs principaux. On cherche un espace d'observation de dimension réduite, et qui maximalise l'information restituée.

Une classification automatique sur les coordonnées permet d'identifier des groupements types. On réalise une partition de l'ensemble en classes homogènes, contrastées entre elles. Cette partition n'est pas unique. Elle peut être justifiée par le résultat d'indicateurs statistiques (critères d'inertie entre classes et d'inertie totale). Au delà de ces critères statistiques, un plus grand nombre de classes apporte une description plus fine. On peut privilégier un nombre final de classes en fonction de la connaissance que l'on a par ailleurs, ou en fonction de contraintes liées aux tests sur banc d'essais. On notera, lors des analyses (cf. les représentations des nuages d'observations dans les plans principaux), la très grande continuité et diversité des conditions d'utilisation ou de fonctionnement des véhicules. Ceci illustre la difficulté particulière d'une description des observations en quelques classes nécessairement très simplificatrices. On construit ensuite des cycles d'essai représentatifs de ces différentes classes.

5.2.2 - Principes de la modélisation des conditions de circulation

5.2.2.1 - Vitesse et conditions locales de circulation

Un cycle de conduite n'est autre qu'une courbe de vitesse en fonction du temps. Cette restriction est principalement dictée par les méthodes et matériels de mesures, en particulier le banc d'essai de véhicules sur lequel on reproduit une courbe de vitesse.

La première hypothèse sur laquelle se sont appuyés la plupart des travaux, est la dépendance entre la vitesse enregistrée à bord d'un véhicule et les conditions de circulation. En d'autres termes, la vitesse d'un véhicule est un indicateur, une mesure des conditions de trafic que l'on souhaite apprécier. Cette hypothèse semble valide en zone urbaine, ou dès lors que la circulation d'un véhicule est conditionnée par la densité du trafic. Dans le cas d'un trafic faible, la mesure de la vitesse d'un véhicule est probablement dans une plus grande mesure le reflet du comportement du conducteur. Dans ce cas, un échantillon de conducteurs suffisamment important peut permettre d'intégrer la diversité des comportements.

On tente donc de décrire et caractériser les conditions de circulation au travers de la mesure de la vitesse d'un véhicule dans le trafic. Dans ce but, on doit identifier les descripteurs de la courbe de vitesse qui rendent compte des conditions de circulation. L'approche bibliographique (chapitre 3) et les travaux que nous avons menés auparavant nous fournissent un grand nombre de descripteurs plus ou moins pertinents qu'il faut valider.

5.2.2.2 - Hétérogénéité et niveau d'analyse des conditions de circulation

Les trajets sont extrêmement variés : certains sont très courts, d'autres atteignent plusieurs centaines de kilomètres. Au cours de ces trajets, les conditions de circulation peuvent varier considérablement : on peut par exemple rencontrer des conditions de circulation très difficiles, avant d'enchaîner sur des conditions autoroutières. Si la notion de trajet est justifiée pour construire un cycle en tant que "mission" du véhicule, elle est donc trop macroscopique lorsqu'on souhaite décrire les conditions locales de circulation.

Il est donc nécessaire d'analyser les conditions de circulation sur des éléments plus courts que les trajets (analyse microscopique) décrivant des conditions locales de circulation. Par ailleurs, en vue d'une caractérisation de ces conditions, il est préférable d'identifier au sein des trajets des éléments pour lesquels les conditions de circulation sont relativement homogènes.

On considère donc une "tranche" de déplacements comme une mesure des conditions locales de circulation. Au cours d'un trajet, chacune de ces tranches représente une mesure des conditions de circulation d'un lieu. Il n'y a donc pas nécessairement de lien chronologique entre les différents points de mesure que constitue un trajet.

D'autre part, on doit considérer que les arrêts éventuels au cours de cette tranche de déplacement font partie de la description des conditions de circulation du lieu. Il n'est donc pas justifié d'analyser séparément les phases d'arrêt (à vitesse nulle). Cependant, il est pertinent

d'exclure ces phases du calcul des variables de mouvement. Une tranche de déplacement est alors décrite par des variables décrivant la phase d'arrêt et des variables décrivant le mouvement.

On notera que l'approche serait sans doute différente si l'objectif était de modéliser la courbe de vitesse du véhicule au cours d'un trajet, et non les conditions de circulation.

Plusieurs travaux antérieurs [Crauser, 1989] et [André, 1995] ont utilisé les "séquences cinématiques" entre 2 arrêts successifs du véhicule, pour lesquelles les conditions de trafic sont plus homogènes qu'au cours d'un trajet entier. On envisagera d'autres niveaux d'analyse par un découpage plus fin en segments cinématiques de tailles homogènes, car ce concept ne permet finalement pas de rendre compte de conditions locales de circulation : la notion de séquence entre arrêts autorise des séquences très longues, au cours desquelles le profil de vitesse peut changer de nature.

A l'opposé, il ne s'agit pas de considérer des segments trop courts voire les vitesses instantanées (à chaque seconde), car dans ce cas on n'obtient plus une représentation des conditions de circulation, mais la description des modes de fonctionnement (accélération, décélération). Si ces modes interviennent plus fréquemment en circulation urbaine par exemple, ils n'en sont cependant pas une caractéristique.

5.2.2.3 - Caractérisation des conditions de circulation

La modélisation des conditions locales de circulation est envisagée par la typologie ou caractérisation des segments ou éléments cinématiques.

5.2.3 - Principes de la modélisation des usages / trajets

5.2.3.1 - Cycle de conduite et trajet

Nous avons retenu de construire des cycles qui soient d'une part représentatifs des conditions de circulation au travers des profils de vitesse, d'autre part représentatifs des conditions d'usages au travers des trajets effectués. Cette notion de cycle - trajet n'a pas été toujours retenue et l'on a souvent construit un cycle d'essai en fonction d'une durée minimale de test (de l'ordre de 10 minutes de test sont nécessaires au remplissage des sacs de prélèvement des gaz d'échappements pour une installation de type C.V.S.), ou maximale (les procédures de type contrôle technique des véhicules doivent être rapides) ou selon diverses contraintes liées aux matériels et méthodes de mesure des émissions de polluants.

On a mentionné l'hétérogénéité des conditions de circulation au sein des trajets. On s'attachera à reproduire cette hétérogénéité y compris dans sa chronologie au cours du trajet. Cet aspect est important car les émissions de polluants d'un véhicule sont largement conditionnées par "l'histoire" des paramètres de fonctionnement du moteur. C'est le cas lors d'un démarrage à froid ou lorsque le moteur n'est pas encore en situation thermique stable (cf. chapitre 1.5). C'est également le cas après un fonctionnement long à forte puissance. Les émissions d'oxydes d'azote d'un moteur surchauffé sont plus fortes.

Lors du développement de nombreux cycles, on a privilégié une homogénéité des conditions cinématiques et un échelonnement des niveaux de vitesse moyenne dans le but d'obtenir des niveaux d'émissions gradués selon la vitesse moyenne [Crauser, 1989]. Dans ce cas, on ne décrit pas l'hétérogénéité des conditions de circulation et de même lorsque les cycles sont construits à partir d'une matrice de probabilité des fréquences des vitesses et accélérations instantanées par exemple [Kenworthy, 1986].

Afin d'obtenir une meilleure représentativité des conditions de circulation, homogénéité et échelonnement des vitesses doivent être abandonnés pour prendre en compte les enchaînements des différents types de conditions de circulation au cours d'un même trajet.

Les mesures d'émissions de polluants sur banc d'essai sont en particulier nécessaires pour évaluer les émissions sur autoroute, en ville, etc., en vue de quantifier les différents types d'émissions en ville et ailleurs. Cette exploitation conduit naturellement à tenter de caractériser les trajets de types urbain, routier, autoroutier, à partir des profils de vitesse enregistrés, dont - il est bon de le rappeler -, nous n'avons pas connaissance de la localisation.

5.2.3.2 - Modélisation des trajets

Comme pour la modélisation des conditions de circulation, nous utiliserons également les outils d'analyse des données et de classification pour établir une typologie des trajets. Comme précédemment, il s'agit d'identifier les paramètres descriptifs des trajets à considérer. A la suite de la caractérisation des conditions de circulation, les trajets seront naturellement décrits en terme de leur composition en éléments ou segments types des différentes conditions de circulation, mais d'autres paramètres peuvent être envisagés. Analyse et classification doivent permettre une partition de l'ensemble des trajets, au moins selon les types de trajets: urbain, routier, autoroutier, mais qui peut admettre un nombre plus grand de classes pour une meilleure description de cet ensemble.

5.2.3.3 - Extension à la notion plus large d'usage

Pour la plupart, les travaux antérieurs se sont appuyés sur la caractérisation des conditions de circulation et ont intégré les résultats sous la forme d'un cycle avec ou sans référence à une notion de trajet.

Si cette référence à la réalité des trajets est justifiée (prise en compte de trajets souvent courts, intégration correcte des phases de démarrage et de fin de trajet et de l'évolution thermique du moteur), elle peut être élargie à la notion plus large d'usage du véhicule. On peut mentionner en particulier l'enchaînement des trajets au cours d'une journée et les périodes de non-utilisation prolongée du véhicule qui déterminent les conditions de démarrage des véhicules.

Cette extension s'avère nécessaire en particulier pour la définition de "profils de mission" de nouvelles motorisations (électrique ou mixte : électrique et thermique) pour lesquelles le profil journalier d'utilisation conditionne l'utilisation des batteries du véhicule (en mode électrique) et

leur dimensionnement (l'utilisation des véhicules électriques est pour l'instant fortement liée à leur autonomie et à la recharge journalière des batteries au domicile).

Cette extension trouve également sa justification lorsque l'on doit modéliser des phénomènes qui impliquent des durées plus importantes que celles des trajets : définition de méthodes de test de la durabilité des dispositifs antipollution, description des conditions de régénération de dispositifs filtrant les particules, etc.

Pour ces raisons, on gardera à l'esprit la possibilité d'extension des travaux menés dans ce cadre à une notion plus large de l'usage des véhicules. La description de l'usage des véhicules peut être envisagée en terme de trajets types ou de conditions de circulation types selon l'objectif visé. Cette généralisation est rigoureusement similaire à la modélisation des trajets envisagée précédemment.

5.2.4 - Principes de la construction de cycles

La construction de cycles d'essai repose sur les modélisations précédentes ainsi que sur d'autres critères tels que la durée d'un test, le nombre de cycles à définir, etc. Cette construction est envisagée de plusieurs manières :

- les méthodes de caractérisation des conditions de circulation et des usages permettent de sélectionner des éléments (segments ou trajets) représentatifs de chacune des classes (au centre de gravité des classes ou selon leur distance au centre, etc.). Pour construire un cycle - trajet, on peut sélectionner un trajet qui minimise simultanément des critères de représentativité des segments qui le constituent et les critères de représentativité du trajet.

- alternativement, on peut reconstituer un trajet type par sélection et juxtaposition de segments cinématiques représentatifs des conditions de circulation correspondantes. Le cycle constitué doit lui-même répondre aux critères de représentativité des trajets qu'il décrit.

Lorsque le nombre de cycles est limité, on déterminera préalablement certains paramètres que l'on souhaite respecter (valeur moyenne ou probable d'une variable pour un sous-groupe de trajets par exemple).

5.2.5 - Autres aspects

Outre la caractérisation des conditions de circulation et des trajets, d'autres aspects concernent directement la mesure des émissions de polluants : la définition des conditions de démarrage et la prise en compte des capacités des véhicules. On discutera ensuite de l'utilisation des résultats de mesure et de la validation des cycles développés. Préalablement, on envisage les principes d'une pondération pour corriger les inégalités de représentation des différents véhicules lors des expérimentations.

5.2.5.1 - Pondération (redressement)

Bien que le protocole expérimental ait prévu des durées de suivi équivalentes pour chacun des véhicules, les données enregistrées ne sont pas également distribuées (en terme de durée de suivi) entre les véhicules testés et entre les phases d'expérimentation (4 phases d'expérimentation sur 20 véhicules ont été menées dans 4 pays européens). L'inégalité des durées de suivi est due uniquement aux problèmes techniques lors des expérimentations (défiance des équipements, perte de données, etc.).

Afin de redresser cette inégalité de suivi, les principes suivants de pondération sont proposés:

- une première correction est appliquée pour compenser les nombres différents de véhicules expérimentés selon les phases expérimentales. Une phase sera pondérée par le rapport entre le nombre moyen de véhicules testé (sur l'ensemble des phases) sur le nombre de véhicules de cette phase (surpondération des phases à faible nombre de véhicules).

- au sein d'un ensemble de données d'une phases expérimentale, une seconde correction est appliquée pour compenser les inégalités de durées de suivi des véhicules. Les données correspondant à un véhicule sont pondérées par le rapport du nombre moyen de journées de suivi pour cette phase expérimentale sur le nombre de journées de suivi de ce véhicule (surpondération des véhicules suivis sur de plus courtes périodes).

- cependant, en vue de limiter les effets et risques des deux règles précédentes, une limite maximale de surpondération est appliquée (coefficient maximal de surpondération limité à 2), afin de ne pas trop extrapoler des données enregistrées sur des durées de suivi trop courtes.

Ces règles de pondération ne seront appliquées que lors des analyses finales et non pour la mise au point méthodologique.

On pourrait également considérer un redressement dans le but de représenter correctement les populations de véhicules des différents pays ou entre les villes moyennes et les grandes agglomérations, etc., mais les termes de ce redressement ne sont pas évidents.

5.2.5.2 - Conditions de démarrage

Les conditions de démarrage et en particulier avec un moteur froid sont responsables de surémissions importantes qu'il est nécessaire de mesurer. Il est donc important de décrire les conditions de démarrage au travers de la base de données enregistrées, notamment par l'analyse des températures lors du démarrage. On s'attachera en particulier à déterminer s'il existe une dépendance entre les conditions cinématiques, les trajets et les conditions de démarrage. Il s'agit de déterminer également quelles conditions de circulation sont affectées par le démarrage moteur froid, et comment définir le démarrage à froid (conditions de température, conditionnement du véhicule).

5.2.5.3 - Prise en compte des capacités des véhicules

Un aspect jusque-là relativement éludé des approches de construction de cycles concerne la prise en compte des capacités des véhicules. On a construit un ou plusieurs cycles de conduite indépendamment des catégories des véhicules. Ces cycles sont ensuite utilisés pour mesurer les émissions de polluants de tous les véhicules quelles que soient leurs capacités (puissance, masse, vitesse maximale, etc.).

Une telle approche est possible si les cycles sont dimensionnés (accélération maximale, vitesse maximale) selon les capacités des véhicules les plus faiblement motorisés (en terme de puissance massique par exemple), ou si on admet que les véhicules faiblement motorisés ne reproduisent pas certaines parties des cycles. Dans les deux cas cependant, les véhicules à forte motorisation sont testés lors de conditions moyennes ne correspondant pas à leurs capacités.

L'analyse comparative des conditions de circulation et d'usage des véhicules en quelques grandes catégories à déterminer devrait permettre de répondre à la question de la nécessité ou non d'une approche spécifique selon les capacités des véhicules, ceci indépendamment de la complexité engendrée par la multiplication des procédures de test.

5.2.5.4 - Rapports de boîte de vitesse

La courbe de vitesse ne définit pas complètement le cycle de conduite. Il reste à définir les rapports de boîte de vitesse à utiliser (au moins pour le cas des véhicules à transmission manuelle). Pour de nombreux cycles d'essai, les changements des rapports de boîte de vitesse sont fixés selon le niveau de vitesse indépendamment des véhicules (cycle européen par exemple). Dans le cadre d'autres travaux, ils sont laissés à l'appréciation du technicien qui conduit les tests. La première méthode peut favoriser ou défavoriser les véhicules selon leurs caractéristiques de transmission. La seconde supposerait une certaine représentativité (par rapport à la population des conducteurs de voitures) du comportement de conduite d'un technicien - lui-même le plus souvent "professionnel de l'automobile". Les conditions de laboratoire (banc d'essai) sont elles-mêmes assez éloignées des conditions de circulation sur route (bruit, absence de perception du mouvement, etc.).

En cohérence avec les autres principes développés précédemment en vue de décrire correctement la diversité des comportements de conduite, il est souhaitable de tenir également compte de la diversité des comportements par rapport à l'utilisation des rapports de boîte de vitesse. On cherchera donc à décrire et à reproduire les stratégies observées de changement des rapports de boîte, déterminés à partir de l'enregistrement simultané des régimes de rotation du moteur et de la vitesse.

5.2.5.5 - Utilisation des résultats de mesure sur les cycles de conduite

On a posé le principe du cycle correspondant à un trajet. Cette approche a des conséquences au niveau de l'utilisation des résultats de mesure d'émission de polluant sur un cycle.

Si on souhaite évaluer les émissions de polluants pour un trajet type (un trajet urbain), l'utilisation des résultats de mesure sur le cycle représentatif de ces trajets est immédiate.

Le plus souvent, on souhaite affecter les émissions aux zones géographiques où elles ont été produites (lors des inventaires de polluants, on souhaite affecter aux zones urbaines les polluants émis effectivement en zone urbaine, et aux zones extra-urbaines les quantités émises sur les autoroutes, routes, etc.). On a déjà mentionné l'hétérogénéité des conditions de circulation rencontrées au cours d'un trajet. On verra ultérieurement qu'un trajet ou un cycle autoroutier par exemple se compose généralement d'une partie correspondant à des conditions de circulation urbaine et d'une partie autoroutière. Il n'est donc pas possible d'affecter totalement en zone extra-urbaine le résultat d'une mesure d'émission de polluant sur un cycle de ce type. Il est nécessaire d'avoir connaissance de la répartition des conditions de circulation urbaine et extra-urbaine du cycle et de mesurer séparément les émissions correspondantes. Cette répartition repose directement sur les résultats de la modélisation des conditions de circulation.

5.2.5.6 - Validation des cycles de conduite

La validation de la construction d'un cycle de conduite devrait recouvrir différents aspects : validation par rapport à la base de données qui a servi à la construction des cycles, validation par rapport aux conditions de circulation, validation en terme de quantités de polluants émises. La plupart du temps elle n'est qu'esquissée et limitée au premier des 3 aspects précédents, voire omise (cf. chapitre 3).

A part cette question difficile de la représentativité d'un ou plusieurs cycles, se pose également la question de la suffisance de cet ensemble à décrire la diversité des conditions rencontrées. En particulier, des conditions cinématiques peuvent être considérées comme marginales lors de l'analyse des conditions de circulation et être fortement responsables d'émissions de polluants.

Ces deux questions ne seront qu'abordées au chapitre 7 mais nécessitent d'être posées.

5.2.6 - Conclusions

La méthode d'analyse et de construction des cycles est envisagée selon un schéma en quatre phases : l'observation des conditions de circulation, la modélisation des conditions de circulation, la modélisation des trajets et la construction de cycles à partir des résultats des analyses précédentes.

Ce schéma repose sur des hypothèses qu'il ne faut pas perdre de vue lors de la mise en oeuvre des analyses, pour une exploitation correcte des résultats et également lors de l'utilisation des résultats de mesure des émissions de polluants au cours de tests utilisant les cycles construits. Parmi ces hypothèses, on rappelle que la base de données initiale est considérée comme une image globale représentative des conditions d'usages et de fonctionnement, que la vitesse d'un véhicule au cours d'une tranche de déplacement constitue une mesure des conditions locales de

circulation et que le cycle de conduite est conçu comme une représentation des conditions de circulation et des trajets.

D'autres aspects sont à considérer tels que la définition des conditions de démarrage, la détermination des rapports de boîte de vitesse à utiliser sur un véhicule donné pour reproduire le cycle de conduite et plus généralement la prise en compte des capacités des véhicules dans la construction des cycles.

5.3 - Modélisation des conditions de circulation - développements

5.3.1 - Introduction

On souhaite décrire les conditions de circulation au travers de la courbe de vitesse en fonction du temps, enregistrée à bord de véhicules au cours de trajets effectués en usage normal. Deux aspects fondamentaux de cette démarche concernent d'une part la sélection de variables "pertinentes" pour la description des conditions de circulation, et d'autre part la définition d'éléments cinématiques sur lesquels les variables seront calculées, afin de décrire des conditions locales de circulation. La méthode d'analyse est conditionnée par les éléments précédents. Variables, éléments cinématiques (ou niveau d'analyse) et outils constituent un schéma d'analyse (cf. figure 5.4).

Afin d'identifier ces variables et ce niveau d'analyse, nous considérons d'abord les approches antérieures : les diverses variables proposées par la littérature, les travaux méthodologiques initiaux [Crauser, 1989] et les travaux ayant aboutis à la construction de cycles urbains [André, 1995].

On procède d'abord à une réflexion systématique sur les variables cinématiques descriptives des conditions de circulation. On analyse leur nature et la pertinence de leur utilisation. Cette réflexion, complétée par des analyses préliminaires permet de dresser une liste de précautions et

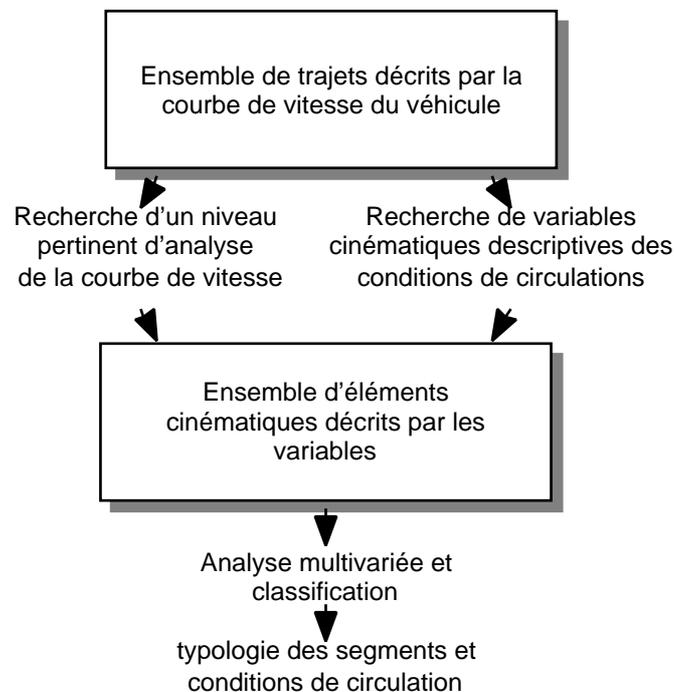


Figure 5.4 : Schéma de principe de la modélisation des conditions de circulation

de propositions pour nos travaux.

On envisage et évalue ensuite différents schémas d'analyse définis par un niveau d'observation (séquences, segments), un ensemble de variables descriptives et les outils d'analyses correspondants.

Dans une perspective de continuité des travaux menés, on évalue d'abord le schéma proposé antérieurement par [Crauser, 1989] et fondé sur les séquences cinématiques entre arrêts et l'Analyse en Composantes Principales normée (variables centrées et réduites).

Les insuffisances de ce schéma, liées à la grande hétérogénéité des séquences cinématiques entre arrêts, nous conduisent à considérer des segments plus homogènes en taille. On adopte également une description plus précise du profil de vitesse au travers de la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées. Les segments sont alors analysés par l'Analyse des Correspondances Binaires (A.C.B.) suivie de classification automatique.

5.3.2 - Définition d'un schéma d'analyse: variables - niveau - outils

Un schéma d'analyse des conditions de circulation au travers de la vitesse mesurée par les véhicules au cours des trajets repose sur :

- la sélection d'un niveau d'analyse ou de découpage de la courbe vitesse en fonction du temps enregistrée au cours d'un trajet, afin que les éléments obtenus soient une représentation des conditions locales de circulation,
- la sélection de paramètres ou variables cinématiques décrivant ces éléments,
- l'utilisation d'outils d'analyse appropriés.

On examine les nombreuses variables utilisées lors d'autres travaux. On considère ensuite différentes approches de découpage de la courbe de vitesse : la séquence cinématique entre arrêts successifs du véhicule au cours d'un trajet utilisé lors de plusieurs travaux, puis la définition de segments cinématiques de tailles plus homogènes que celles des séquences.

5.3.2.1 - Variables cinématiques descriptives des conditions de circulation

De nombreuses variables ont été utilisées pour rendre compte des conditions de circulation. Ces variables concernent souvent la description de la vitesse et / ou de l'accélération au cours d'une période donnée (séquence, segment, etc.). Quelquefois, elles renvoient à des paramètres indirectement reliés à la vitesse : régime de rotation du moteur, consommation de carburant, etc. Elles reposent souvent sur des critères plus ou moins arbitraires (par exemple : seuil d'accélération en dessous duquel la vitesse est considérée comme stabilisée).

Après avoir listé les variables envisagées par différents auteurs, on analyse leur pertinence par rapport à la description des conditions de circulation. Ces premiers éléments permettent d'identifier certaines précautions pour la sélection de ces variables. Des analyses préalables permettent d'affiner cette sélection.

1 - Variables utilisées antérieurement

[Klingenberg, 1977] appuie ses travaux sur une décomposition en séquences entre arrêts. Il sélectionne la durée de la séquence et la durée à l'arrêt, la vitesse moyenne de roulage (ou hors arrêts), le nombre de changements : accélération - décélération, les valeurs moyennes d'accélération (positive) et de décélération, et les pourcentages de la durée passés en accélération, décélération et à vitesse stabilisée, puis lors de prolongements de ces travaux, le nombre de changements accélération - décélération par minute et par séquence.

[Jost, 1986] lors de l'élaboration de cycles autoroutiers analyse au cours d'une phase "stabilisée" (c'est-à-dire autour d'un certain niveau de vitesse) l'écart-type de la vitesse et de l'accélération.

[Hughes, 1988] considère le régime moteur moyen, la consommation relative (en litre au 100 km), le nombre de phases de ralenti, et les régimes et consommations moyennes mesurées sur les phases d'accélération, de décélération, à vitesse stabilisée et au ralenti. Il s'agit dans ce cas d'une analyse par trajet entier, sans décomposition en segments.

Lors du développement des cycles INRETS, [Crauser, 1989] utilise la durée totale, la durée à l'arrêt et la distance parcourue comme paramètres décrivant la taille de la séquence, les vitesses moyennes et maximales décrivant le niveau de vitesse. Il introduit une distribution simplifiée de la vitesse exprimée en pourcentage de la durée de route en 4 classes (< 15 km/h, 15-45, 45-75 et plus de 75 km/h) et le nombre de minima et maxima observés sur la courbe vitesse (changements de signe de l'accélération). Il considère également la durée relative à vitesse stabilisée (en % de la durée totale et définie par un niveau d'accélération inférieur à 0,15 m/s²).

A la suite de ces travaux, en [André, 1995], nous avons proposé l'utilisation de caractéristiques de dispersion et de forme : écart-type (de même unité que la grandeur décrite), asymétrie et aplatissement (qui sont des grandeurs adimensionnelles) ainsi que les percentiles comme alternative à la description des distributions des vitesses et des accélérations au cours des séquences entre arrêts. Les séquences particulières ne comportant qu'une phase d'arrêt sans roulage (en fin de trajet) étaient analysées séparément. Nous avons retenu les variables cinématiques suivantes : la durée de route (hors arrêts) et la durée à l'arrêt et la distance parcourue (taille de la séquence), la vitesse hors arrêts et la vitesse maximale (niveau des vitesses), l'écart-type, les coefficients d'asymétrie et aplatissement et les valeurs des percentiles 20% et 80% décrivant la distribution des vitesses instantanées, et les mêmes coefficients décrivant la distribution des accélérations instantanées.

Nous avons également considéré divers indicateurs du caractère perturbé de la vitesse tels que les nombres de phases en accélération normale ou forte, de phases stabilisées ou de changements : accélération - décélération. Les phases d'accélérations, décélérations et stabilisées étaient définies par des seuils d'accélération et des durées minimales.

Diverses variables ont été utilisées en illustratif (elles ne participent pas à l'analyse): celles proposées antérieurement et des variables complémentaires telles que le nombre d'actions sur le

frein, le régime moteur moyen, la consommation de carburant, la distribution croisée des vitesses et accélérations en 3 x 3 classes et le rang de la séquence dans le trajet.

[Effa, 1993] propose l'écart-type, le coefficient de variation et la somme des variations absolues de la vitesse (rapportée à la distance parcourue) comme paramètres discriminants des conditions de circulation.

2 - Analyse critique des variables précédentes

On a regroupé dans le tableau 5.1 ces variables classées selon le type d'information qu'elles renseignent. On distingue en première approche : la taille de l'élément cinématique (en durée, en distance), le niveau de vitesse (moyenne ou maximale), la distribution des vitesses instantanées, la description des accélérations, les événements tels que changements : accélération - décélération et les autres variables. On constate que :

1 - certaines de ces variables sont liées entre elles par calcul et par des relations complexes non linéaires :

- les durée totale, distance parcourue et vitesse moyenne retenues par [Crauser, 1989] (ou durée de route, distance parcourue et vitesse hors arrêt, [André, 1995]) sont liées entre elles par une relation directe non linéaire : ($vitesse = \frac{distance}{duree}$),

- les effectifs des 4 classes d'un histogramme des vitesses instantanées sont liées entre elles et à la valeur de la vitesse moyenne :

$$(V_{<15km/h} + V_{15-45km/h} + V_{45-75km/h} + V_{>75km/h} \quad Vitesse_{moyenne})$$

- des liens complexes existent entre les différents coefficients de forme des distributions des variables et avec les autres descripteurs (moyenne, écart-type, asymétrie, etc.).

Enfin, on note que des relations complexes existent entre les paramètres décrivant les vitesses et ceux décrivant les accélérations, la seconde variable étant la dérivée de la première.

2 - les variables sélectionnées sont quelquefois de natures différentes: certains paramètres sont exprimés en pourcentage du temps (vitesse moyenne, régime moteur moyen, durée en accélération), d'autres en pourcentage de la distance (consommation relative), d'autres enfin sont intégrés sur la séquence (nombre de minima, etc.).

3 - Certaines variables peuvent être liées à l'imperfection de l'outil de mesure :

- le nombre de minima et maxima, exprimé par les changements de signe de l'accélération (elle-même dérivée par calcul de la mesure de vitesse) intègre les fluctuations liées à l'imprécision du capteur et de la chaîne de mesure.
- on observe le même problème pour le calcul de la somme des différences absolues des vitesses.

4 - Certaines variables sont ambiguës ou redondantes

- le nombre de phases stabilisées est de fait lié à la fréquence des accélérations et décélérations qui délimitent les phases stables. Une faible valeur peut signifier des conditions très stables ou l'absence de phase stable. C'est donc une variable ambiguë.
- les nombres de changements : accélération - décélération et décélération - accélération sont fortement liés entre eux ainsi qu'avec les nombres d'accélérations, de décélérations et d'actions sur le frein. Cependant, il ne s'agit pas ici d'une dépendance totale et il peut être utile de conserver certaines de ces variables.

5 - Les variables utilisées ne décrivent qu'imparfaitement les conditions de circulation car elles ne rendent compte que très partiellement des variations de vitesses, des accélérations moyennes et de leurs variations.

Tableau 5.1 : Variables descriptives des profils de vitesse

Catégorie	Variables	Références bibliographiques *	nouvelles variables envisagées
décrivant la taille de la séquence	longueur (km) durée totale durée hors arrêts durée à l'arrêt durées en accélération, décélération et stabilisé nombre de phases au ralenti	(2) (3) (1) (2) (3) (1) (2) (3) (1) (4)	distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées
décrivant le niveau de vitesse	vitesse moyenne vitesse moyenne hors arrêts vitesse maximale	(2) (1) (3) (2) (3)	percentile 75% de la distribution de la vitesse
décrivant la distribution des vitesses V(t)	distribution en 4 classes (limites: 15, 45, 75 km/h) écart-type des vitesses asymétrie, aplatissement, quartiles de V(t) écart-type, coefficients de variation et somme des variations des vitesses	(2) (3) (5) (3) (6)	intervalle interquartiles de V(t)
décrivant les accélérations (t)	accélération et décélération moyennes durée (%) en stabilisé ($\pm 0.15m/s^2$) écart-type des accélérations asymétrie, aplatissement, quartiles de (t) régime et consommation en accélération, décélération et stabilisé et ralenti	(1) (2) (3) (5) (3) (4)	intervalle interquartiles de (t),
décrivant des nombres d'événements	nombres de changements accélération - décélération nombre de mini - maxi de V(t) nombres d'accélérations, décélérations, fortes accélération et décélérations	(1) (3) (2) (3) (3)	
autres variables	nombre d'actions sur le frein régime moteur moyen, consommation utilisation des rapports de boîte de vit.	(3) (4) (7)	énergies cinétiques et puissances moyennes selon les modes
variables illustratives	durée totale, vitesse moyenne, distributions de V(t) en 4 classes, et V(t) x (t) en 9 classes, demande de puissance, régime moteur, consommation	(3)	variables inutilisées - capacités et identification des véhicules - conditions thermiques

* (1) : [Klingenberg, 1977] - (2) : [Crauser, 1989] - (3) : [André, 1995] -
 (4) : [Hughes, 1988] - (5) : [Jost, 1986] - (6) : [Effa, 1993]
 (7) : [Rapone, 1995]

3 - Propositions préalables pour nos travaux

a) Objectifs

Compte tenu des objectifs de représentation des cycles de conduite, 3 aspects principaux doivent être considérés :

- 1 - rendre compte des conditions de circulation : il s'agit de décrire les vitesses et accélérations liées à la densité du trafic et dont l'incidence est forte sur les émissions de polluants. On cherche en particulier à rendre compte des niveaux moyens (de vitesse, ou d'accélération), mais aussi de la dispersion et des distributions de ces variables et du caractère perturbé des vitesses.
- 2 - rendre compte des conditions de démarrage, au travers des températures d'air ambiant et du moteur.
- 3 - prendre en compte les capacités des véhicules au travers de leurs caractéristiques techniques.

b) Variables complémentaires

Ces variables sont envisagées pour répondre aux objectifs précédents.

Le lien entre les quantités d'énergie mises en oeuvre et la consommation et les émissions de polluants conduit à calculer les variables mesurant l'énergie cinétique en accélération (phase motrice), en décélération (énergie de freinage) et en stabilisé (accélération inférieure à 0.3 m/s^2). Ces énergies sont calculées par la somme des écarts de la vitesse au carré. On calcule également les durées de ces phases et les accélérations moyennes correspondantes. Le rapport des énergies aux durées permet d'évaluer des puissances moyennes sur ces phases. Compte tenu des faibles variations de vitesse, l'énergie cinétique en "stabilisé" (ou à accélération faible) est fortement entachée de l'imprécision de la mesure de vitesse et présente d'ailleurs peu d'intérêt.

Par ailleurs, en vue de la prise en compte des capacités des véhicules, on utilise l'identification du véhicule et ses caractéristiques techniques comme variables qualitatives permettant a posteriori d'évaluer ce facteur. On a envisagé un indicateur d'accélération relative aux capacités du véhicule à partir de la distribution globale des accélérations pratiquées par le véhicule (on établit une courbe enveloppe d'accélération selon le rapport de boîte et le niveau de vitesse, incluant par exemple 90% de la durée totale de route). Cet indicateur n'a été considéré qu'à titre illustratif en raison de sa complexité.

Dans le but de caractériser les conditions de démarrage à froid, nous considérons les variables suivantes : températures d'air ambiant, d'eau de refroidissement et d'huile du moteur en début de séquence ou segment cinématique, ainsi que les durées et distances nécessaires au cours de la séquence pour atteindre 2 niveaux de température d'eau (60 et 80°C).

4 - Précautions pour la sélection des variables

L'analyse des variables utilisées antérieurement nous conduit à rationaliser leur sélection :

- éviter les relations directes linéaires et non linéaires entre les variables analysées,

- privilégier les variables de même nature et éviter que certaines variables ne s'expriment en fonction de la durée et d'autres en fonction de la distance. La plupart des variables précédentes s'expriment en fonction de la durée (en particulier les estimateurs et coefficients de forme, calculés sur un nombre de points, donc une durée), on privilégiera donc l'expression des variables selon la durée. D'autre part, l'éventualité d'éléments sans déplacement ou avec des distances très faibles interdit de relativiser par la distance.
- éviter les variables ambiguës, bruitées ou liées à la méthode de mesure.
- calculer les variables cinématiques (de mouvement du véhicule) sur la seule phase de roulage (période d'arrêt exclue). Cette phase d'arrêt est relativement indépendante de la phase de roulage qui suit (cf. paragraphe 5.3.3) . L'inclure dans le calcul des variables décrivant le déplacement du véhicule introduit une perturbation supplémentaire.
- l'utilisation de variables non toujours disponibles sur l'ensemble du tableau à analyser (non toujours mesurées ou non calculables dans certains cas) doit être assortie de précautions : on veillera à ce que cette non disponibilité soit marginale et on identifiera clairement des valeurs manquantes dans ces cas.
- privilégier des définitions cohérentes des variables : aux percentiles 20 et 80% seront préférées les quartiles (25 et 75%) ; on ajustera les valeurs limites de classes des vitesses et accélérations qui permettent de construire des distributions et les seuils de calcul d'autres indicateurs (seuil d'accélération positive, etc.).

Par ailleurs, sur la base d'analyses multivariées et en particulier l'identification de relations fortes entre certaines des variables précédentes, nous retiendrons les précautions suivantes :

a) éliminer les variables redondantes :

Lors d'une analyse en composantes principales, on constate que si plusieurs variables décrivent le même phénomène, celui-ci forme un axe principal à forte inertie. D'autre part, deux mesures du même phénomène engendrent du bruit et donc une perturbation des résultats. Parmi les variables précédentes, on note plusieurs cas de corrélations fortes dans le cas des séquences entre arrêts :

- le nombre d'accélérations est fortement lié au nombre de décélérations et plus généralement aux nombres d'événements tels que : nombre de minima et maxima de la courbe de vitesse, nombre d'actions sur le frein ou nombre de fortes accélérations.
- au cours d'une séquence, la vitesse est nulle au départ, atteint un certain niveau avant de retomber à zéro. De ce fait, les quartiles de la distribution des vitesses sont liés au niveau de vitesse moyenne : ce sont des estimateurs de tendance. L'intervalle interquartiles est comparable à l'écart-type (dispersion).
- la distribution des accélérations étant quasi symétrique et de moyenne nulle au cours d'une séquence, l'écart-type (ou l'écart interquartiles) des accélérations est proportionnel aux accélérations moyennes positive et négatives. Il est par ailleurs fortement corrélé aux nombre d'événements et à l'écart-type des vitesses.

- les coefficients d'asymétrie et aplatissement de la distribution de l'accélération semblent jouer un rôle secondaire (ils interviennent sur des axes principaux de rang élevé et à faible inertie).

- la somme des différences absolues des vitesses n'est autre que l'expression de la somme des accélérations positives et des accélérations négatives (en valeur absolue).

b) éliminer les variables instables :

La vitesse maximale bien que fortement liée au niveau de vitesse est une mesure très ponctuelle qui ne rend pas compte du profil de vitesse au cours de la séquence; on lui préférera le percentile 75% plus robuste pour mesurer le niveau "maximal" de vitesse atteint.

5 - Amélioration de la description des conditions de circulation

Deux aspects doivent permettre une description plus pertinente et plus fine des conditions de circulation.

a) décrire les conditions locales

L'objectif étant de décrire des conditions "locales" de circulation, on constate que les variables décrivant la taille de la séquence ne participent que peu à cette description. Parmi celles-ci, on trouve la durée et la distance. Les nombres d'événements (accélérations, etc.) et les énergies cinétiques sont fortement liées à la taille de la séquence. On peut envisager leur réduction par la durée de route (ou par la distance).

b) Recherche d'une meilleure description cinématique

Les variables cinématiques précédentes donnent une description relativement limitée des conditions de circulation, au travers de valeurs moyennes et de coefficients de forme des distributions des vitesses et accélérations. Divers autres paramètres rendent compte des perturbations de la courbe de vitesse.

Nous proposons de décrire plus finement et plus spécifiquement les vitesses et accélérations au travers d'une distribution croisée de ces paramètres. La définition des classes de cette distribution doit s'appuyer sur les fréquences observées et on doit éviter des classes trop fines qui conduisent à des effectifs très faibles. Dans ce but, nous avons calculé une distribution fine des vitesses et accélérations instantanées (pas de 10 km/h et de 0,2 m/s² respectivement) pour deux sous groupes de trajets "contrastés", sélectionnés aléatoirement dans la base d'enregistrements, et de vitesses moyennes comprises entre 10 et 30 km/h pour le premier groupe et supérieures à 60 km/h pour le second. Ces groupes représentent respectivement de l'ordre de 25 et 40 heures de conduites.

L'analyse des distributions croisées en classes fines (cf. figure 5.5) permet d'envisager un regroupement des conditions vitesse - accélération de fréquences très faibles ou nulles. On propose la mise en classe suivante :

- 8 classes de vitesse : de 20 à 140 km/h par pas de 20 km/h,
- 7 classes d'accélérations délimitées par: -1.4 -0.6 -0.2 +0.2 0.6 1.0 m/s²,
soit 56 classes au total.

	Classes d'accélération (m/s ²)																								
	-2,2	-2,0	-1,8	-1,6	-1,4	-1,2	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6		1,8	2,0	2,2	+
10	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	1,0	2,0	2,9	5,1	7,0	10,1	16,6	118	9,4	6,2	4,8	4,0	3,5	2,8	1,9	1,3	0,7	0,4	0,0	198
20	0,5	0,5	0,7	1,0	1,6	2,0	2,8	2,9	4,0	5,3	7,3	6,9	10,0	7,1	5,4	4,5	3,8	2,9	2,2	1,7	0,9	0,7	0,3	75	
30	1,1	0,6	0,9	1,2	1,5	2,0	2,4	3,1	4,0	5,1	6,5	5,9	8,8	7,5	6,4	6,2	5,5	3,6	2,3	1,4	0,7	0,3	0,1	77	
40	1,0	0,5	0,7	1,1	1,4	1,8	2,4	2,9	4,2	6,0	7,3	7,1	10,6	8,6	7,0	5,7	4,1	2,6	1,7	0,9	0,6	0,2	0,1	79	
50	0,6	0,4	0,6	0,7	1,0	1,3	1,8	2,3	3,7	5,8	8,0	9,3	14,4	10,5	7,6	5,2	3,4	1,8	0,8	0,4	0,2	0,1		80	
60	0,5	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,2	1,7	3,0	5,0	7,3	8,8	13,4	9,3	6,0	3,8	2,4	1,2	0,5	0,1	0,1			67	
70	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,8	1,2	2,2	3,8	7,1	8,4	13,6	8,5	4,8	2,5	1,5	0,9	0,2	0,1	0,1			57	
80	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,8	3,7	6,7	9,1	16,9	9,1	4,2	1,8	1,0	0,5	0,1	0,1				58	
90	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,8	1,7	3,4	7,2	12,9	22,4	10,0	3,3	1,2	0,7	0,3	0,1					65	
100	0,1		0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,6	1,2	2,7	6,6	13,6	26,7	8,8	2,8	1,1	0,5	0,1						66	
110			0,1	0,1	0,1	0,2		0,5	1,1	1,8	5,5	14,0	26,0	7,4	2,5	0,6	0,2	0,1						60	
120				0,1	0,1			0,3	0,7	1,5	3,9	14,3	27,3	6,0	1,5	0,3	0,1							56	
130					0,1			0,2	0,5	0,9	2,6	10,1	20,5	4,1	0,8	0,2	0,1							40	
140						0,1		0,2	0,4	0,5	1,6	4,2	10,7	2,5	0,5	0,1	0,1							21	
+																								0	
	4,5	2,6	3,9	5,6	7,7	11	15	21	34	53	88	141	339	109	59	38	27	18	11	6,7	3,9	2,1	0,9	0,0	1000

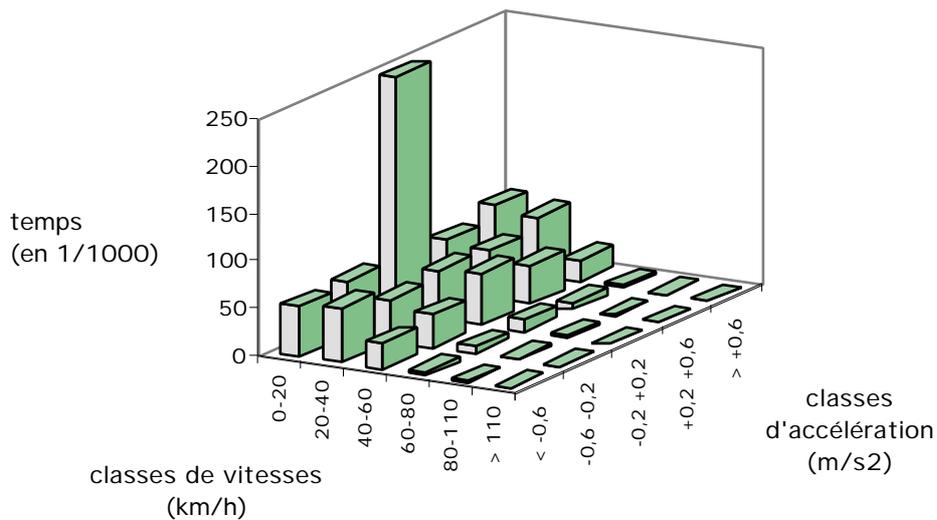
Classes de vitesse (km/h)

Figure 5.5 : Distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées en fonction de la durée de route (2 groupes contrastés de trajets réunis)

Cependant, le croisement de ces classes conduit toujours à des cas d'effectifs nuls ou très faibles (vitesses élevées, fortes accélérations). Pour les analyses, on opère donc des regroupements : jusqu'à 100 km/h on conserve 5 classes d'accélérations (regroupements des classes extrêmes 2 à 2); au-dessus de 100 km/h on regroupe les 3 dernières classes de vitesse et les classes extrêmes d'accélérations 2 à 2, soit 30 classes.

On note qu'il y aurait lieu de valider la définition des classes précédentes en testant la stabilité des résultats finaux. Cependant on constate que les histogrammes des vitesses et accélérations ne présentent pas de discontinuité, sauf le cas des arrêts - vitesses et accélérations nulles -, qui est exclu ultérieurement de la distribution des vitesses et accélérations et pris en compte par la durée à l'arrêt.

trajets de vitesses moyennes comprises entre 10 et 30 km/h



trajets de vitesses moyennes supérieures à 60 km/h

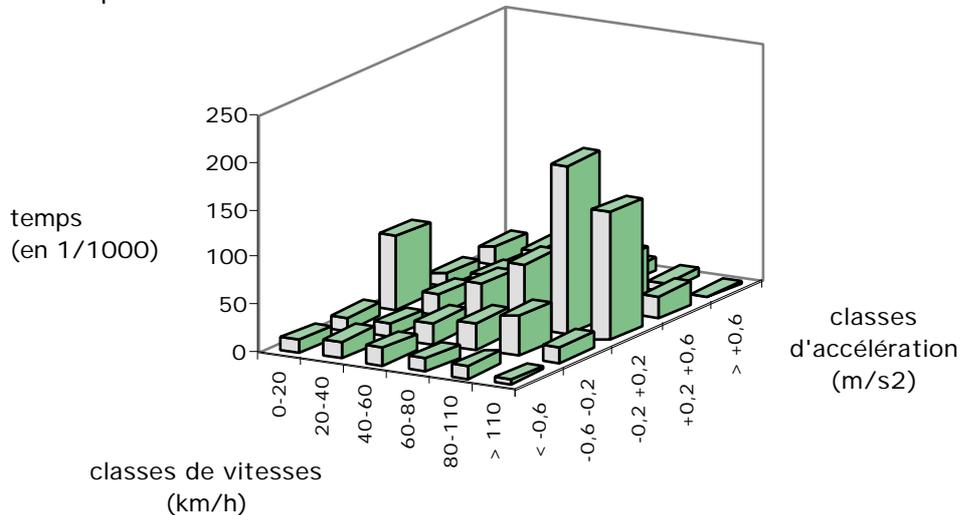


Figure 5.6 : Distributions croisées des vitesses et accélérations instantanées en fonction de la durée de route, pour 2 groupes contrastés de trajets

5.3.2.2 - Niveau d'analyse

Plusieurs travaux antérieurs se sont appuyés sur un découpage entre arrêts successifs du véhicule (aux intersections ou lors d'un encombrement). On définit ainsi des séquences cinématiques pour lesquelles les conditions de trafic sont plus homogènes qu'au cours d'un trajet entier qui résulte d'une succession de séquences variées. On envisage d'autres niveaux d'analyse par un découpage plus fin car ce concept de séquence entre arrêts ne permet finalement pas de rendre compte de conditions locales de circulation: d'une part, ce concept autorise des séquences très longues (qui peuvent atteindre plusieurs centaines de kilomètres en circulation autoroutière), d'autre part les conditions de circulation peuvent changer de "nature" au sein d'une séquence parce que l'arrêt n'est pas obligatoire entre deux types de circulation : on peut quitter la ville ou l'autoroute sans obligatoirement s'arrêter à une intersection.

1 - Séquences cinématiques entre arrêts

De nombreux travaux antérieurs ([Kruse, 1973], [Klingenberg, 1977], [Crauser, 1989], [André, 1995]) se sont appuyés sur le concept de séquence entre arrêts successifs, avec des variantes de définition de la séquence (ordre des phases de roulage et d'arrêt) et de leur détermination (définition d'un arrêt).

On repère les arrêts à partir du suivi chronologique de la vitesse en fonction du temps, par détection d'un seuil limite bas de la vitesse et d'une durée minimale de l'arrêt (figure 5.7). De la même manière, on identifie une nouvelle phase de roulage par un niveau minimum de la vitesse pour une durée minimale. Cette nécessité de seuils est justifiée par l'imprécision relative de la mesure de vitesse. Lors des expérimentations ayant abouti à la création des cycles INRETS [Crauser, 1989], les critères de détermination d'un arrêt avaient impliqué une tolérance assez large sur le zéro de la vitesse compte tenu de conversions analogique - numérique (cf. tableau 5.2). Les nouveaux systèmes d'acquisition ont permis de limiter l'imprécision sur la vitesse hormis la résolution du capteur lui-même (de l'ordre de 1 km/h dans ce cadre). Cependant, diminuer les

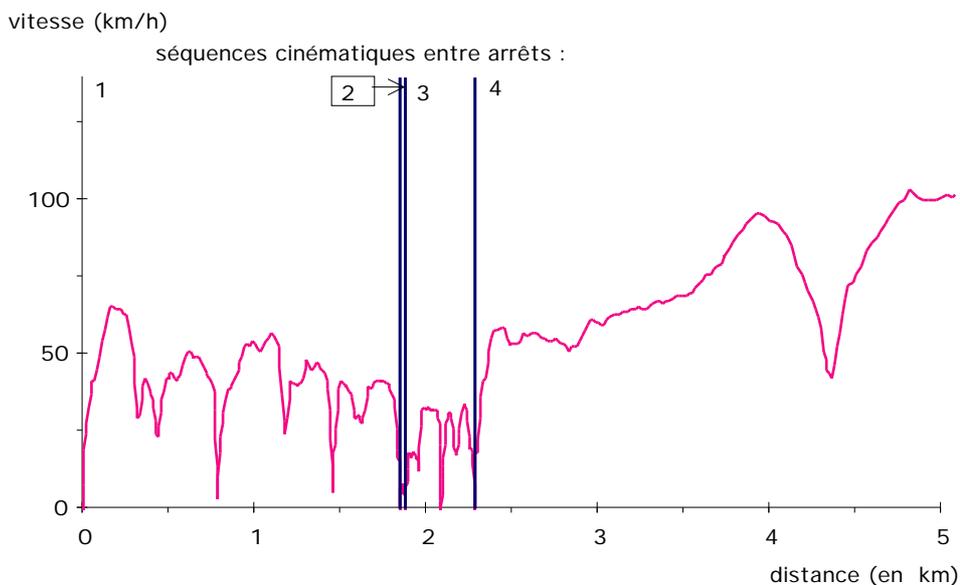


Figure 5.7 : Exemple de découpage d'une courbe de vitesse en séquences cinématiques entre arrêts successifs du véhicule au cours d'un trajet (4 séquences matérialisées par les droites verticales, la séquence 2 est très courte, la 4 n'est pas terminée)

	EUREV 83-85 [André, 1987]	proposition pour nos travaux
- un arrêt est identifié, dès lors que la vitesse est inférieure à :	5 km/h	1 km/h
pendant une durée d'au moins :	5 secondes	3 secondes
- la fin de l'arrêt est détectée lorsque la vitesse est supérieure à :	7 km/h	2 km/h
pendant une durée d'au moins :	3 secondes	3 secondes
- distance minimale d'une phase de roulage		5 mètres

Tableau 5.2 : Définition d'un arrêt

seuils précédents pour la définition des arrêts (0 km/h, 1 seconde) conduirait à augmenter le nombre de séquences entre arrêts et en particulier à scinder les séquences les plus courtes et à très faible vitesse. En conséquence, nous avons adopté une définition plus précise des arrêts tout en conservant une durée minimale des phases d'arrêt et de roulage (cf. tableau 5.2).

Par construction, une séquence se compose d'une phase d'arrêt du véhicule, moteur au ralenti, suivie d'une phase de mouvement ou roulage (figure 5.8). Les séquences éventuelles de fin de trajet (composées uniquement d'une phase de ralenti) peuvent être considérées comme de nature différente des autres séquences et être l'objet d'analyses séparées : en effet, elles n'ont pas de "produit" en terme de distance parcourue et la phase de ralenti n'est pas une "contrainte" d'attente avant un déplacement comme pour les autres séquences.

En s'appuyant sur la définition ci-dessus, la décomposition de 9600 trajets enregistrés lors des expérimentations (cf. chapitre 6) conduit à constituer un ensemble d'environ 66 000 séquences entre arrêts parmi lesquelles 7500 sont des séquences de fin de trajet sans déplacement.

2 - Nécessité d'un autre niveau d'analyse

Les considérations suivantes (confortées par les analyses ultérieures) nous ont conduit à rechercher un autre niveau d'analyse :

- les séquences peuvent être très longues et ne représentent pas dans ce cas des conditions locales de circulation. Les variables décrivant la taille de ces séquences sont très dissymétriques.
- les conditions extra-urbaines et autoroutières en particulier sont décrites par un nombre très faible de séquences très longues (quelques centaines). L'identification de ce groupe est sensible au paramétrage d'une classification en vue de caractériser les conditions de circulation.
- pour la même raison, il y a une forte inégalité de représentation et de description entre les conditions autoroutières et urbaines. Les séquences urbaines courtes sont en nombre très

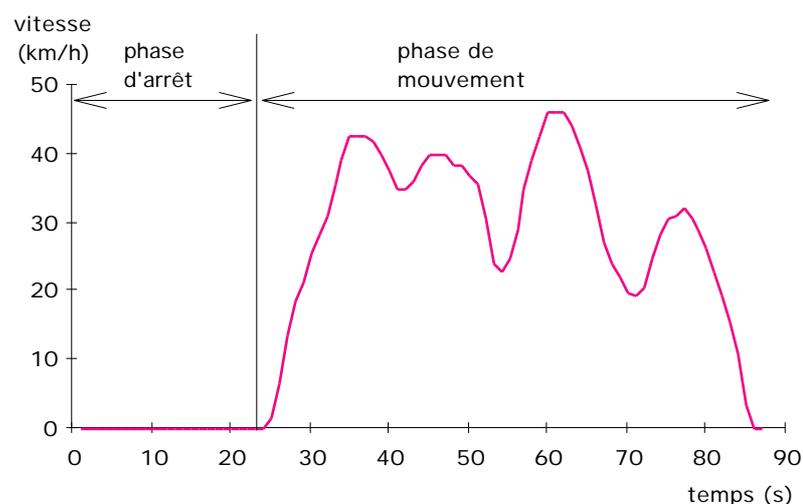


Figure 5.8 : Une séquence cinématique entre deux arrêts du véhicule : phase de ralenti ou d'arrêt suivie d'une phase de mouvement

important mais ne représentent qu'une faible partie des kilométrages (plus de 35% du nombre pour seulement 3% du kilométrage). Elles ont de ce fait un poids démesuré dans les analyses qu'elles infléchissent fortement.

Ces constats conduisent à envisager les solutions - au moins partielles - suivantes.

3 - Pondération par la durée de route

L'insuffisance de représentation des séquences "autoroutières" peut être résolue par une pondération en durée ou distance, si celle-ci a un sens par rapport aux variables considérées. La pondération par la distance d'une vitesse, d'une durée à l'arrêt, d'un nombre d'accélération, n'a pas de sens physique. Par contre les variables vitesse moyenne hors arrêts, accélérations moyennes, nombres d'événements par unité de temps (de route) et puissances peuvent être pondérées par la durée de route. La pondération des coefficients de dispersion, d'asymétrie et aplatissement est moins évidente. On n'envisagera une pondération que si les variables s'y prêtent.

4- Recherche d'un autre niveau de découpage

On tente d'améliorer la description locale des conditions de circulation en utilisant un autre niveau de découpage du trajet. Plusieurs solutions sont envisagées.

a) segments de distance ou de durée équivalente

Le découpage en segments de distance ou de durée équivalente permet de résoudre la plupart des problèmes mentionnés. Les différentes conditions de circulation sont équitablement représentées (en kilométrage) par les nombres de segments correspondants. Les variables calculées sur ces segments se rapportent à la même unité de distance ou de durée et présentent des distributions beaucoup moins asymétriques.

Trois inconvénients sont à noter :

- par ce découpage arbitraire après une distance ou durée donnée, on ne se réfère pas à un "événement" particulier pour débiter un segment (comme l'arrêt pour le début et la fin d'une séquence). Au sein d'un segment, les conditions de circulation peuvent donc être hétérogènes. Ceci peut rendre plus difficile l'identification d'une éventuelle structure de l'espace des segments.

- la distance ou durée de référence doit être définie. Si l'on considère une distance de 1 km, l'analyse des données enregistrées conduirait à un ensemble de plus de 90 000 segments (là où on n'avait que 66 000 séquences, d'environ 1,5 km en moyenne). On alourdirait considérablement l'analyse avec un niveau de définition qui ne serait cependant pas satisfaisant : 1 km en zone urbaine représente une relativement longue distance. A l'inverse, un segment de plusieurs kilomètres peut être suffisant pour décrire les conditions autoroutières très stables. Étant donnée la taille des trajets (longueur moyenne de l'ordre de 8 km), un cycle sera construit à partir d'un nombre limité de segments. Ceci rend plus difficile la prise en compte de la diversité des conditions de conduite.

- ce découpage complique la construction de cycles par juxtaposition de segments. La sélection d'un segment devra tenir compte du niveau de vitesse final du segment précédent avec

des fins de trajets, par leur intégration au segment précédent.

Plus précisément, on propose la définition des segments selon les critères suivants :

- la longueur de référence des segments est proportionnelle au niveau de vitesse moyenne calculée sur le segment ; elle est de 500 mètres lorsque la vitesse moyenne calculée sur le segment est inférieure à 20 km/h et atteint 4 km si la vitesse est supérieure à 160 km/h.

- la taille du segment est modulée si un arrêt est identifié à proximité de la fin du segment (entre 60% et 150% de la longueur de référence).

De cette manière, les segments à haute vitesse ont le plus souvent une distance de 4 km, qui peut varier entre 3 et 6 km si un arrêt intervient. Les segments à basse vitesse varient entre 300 et 700 mètres.

Une règle complémentaire d'interruption du segment en cas de changement important du niveau de vitesse (par exemple si la vitesse moyenne calculée sur 500 mètres varie de plus de 30 km/h) n'a pas été retenue, car elle privilégie un découpage selon les modes : accélération, croisière, décélération. On analyserait alors les modes de fonctionnement des véhicules plutôt que les conditions de circulation.

On note que l'application d'autres critères est possible : on peut par exemple calculer la distance de référence sur la vitesse hors arrêts plutôt que sur la vitesse moyenne, considérer des distances plus faibles pour obtenir une meilleure description, ou encore s'appuyer sur les durées de route.

La définition proposée ici conduit à une quasi constance en durée (sauf en cas d'arrêts et hors les limites hautes et basses de vitesse moyenne, les segments ont une durée de 90 secondes). Les enregistrements consistant en des séries de valeurs à chaque seconde, on note que favoriser une durée homogène entre les éléments cinématiques conduit à considérer des nombres de points équivalents pour le calcul des indicateurs cinématiques. Cette propriété est intéressante pour les coefficients de dispersion et de forme qui sont d'abord dépendants du nombre de points concernés.

5.3.2.3 - Outils et méthodes d'analyse

a) - Analyse de variables quantitatives hétérogènes

La sélection des variables décrivant les conditions de circulation conditionne dans une certaine mesure le choix des outils statistiques. [Crauser, 1989] applique une Analyse en Composantes Principales (A.C.P.) normée suivie de classification à l'espace des séquences cinématiques entre arrêts décrit par une sélection de variables quantitatives hétérogènes (durée, vitesse, accélération, etc.). Ce même schéma est utilisé par [André, 1991] et [Ragione, 1994] sur des sélections différentes de variables.

Les premières analyses suivant ce schéma, - par l'utilisation de variables liées par des relations complexes et dont les distributions sont extrêmement dissymétriques (durée, distance, etc.) -, posent le problème de sa pertinence. En effet, l'A.C.P. repose sur l'hypothèse de quasi-normalité

des variables. Fondée sur les corrélations entre variables, l'A.C.P. est sensible aux valeurs extrêmes [Bouroche, 1994]. Étant une méthode factorielle linéaire, elle est mal adaptée aux cas de liaisons fortes et non linéaires entre variables. Un plus grand nombre d'axes principaux serait requis pour décrire une liaison du second degré ou parabolique par exemple, alors qu'il est plus simple d'éliminer l'une des variables expliquée par cette liaison (le cas durée - distance - vitesse est typique : l'information vitesse est toujours disponible à partir des 2 autres variables ; elle n'apporte donc rien si ce n'est une complication d'interprétation d'une analyse qui inclurait ces 3 variables).

Une solution alternative utilisant l'Analyse des Correspondances Multiples (A.C.M.) est envisageable après mise en classes des variables considérées, lorsque les hypothèses d'application de l'A.C.P. ne sont pas satisfaisantes [Volle, 1985]. Elle permettrait de résoudre les problèmes liés aux variables dissymétriques et les résultats seraient alors plus robustes.

b) - Analyse de fréquences

Les considérations du paragraphe 5.3.2 quant à la pertinence des variables décrivant les conditions de circulation nous ont conduit à envisager la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées en fonction de la durée de route. Bien que l'A.C.P. puisse permettre de gérer ce type de variables (quantitatives), l'outil le plus approprié est l'Analyse des Correspondances Binaires (A.C.B.) sur des fréquences toutes homogènes en durée.

c) - Classification automatique

La caractérisation des séquences ou segments est envisagée par classification automatique sur les coordonnées principales issues des analyses. Le nombre important d'individus (60 à 70 000 séquences ou segments) justifie la mise en oeuvre d'une classification mixte : on réalise plusieurs partitions autour de centres mobiles sélectionnés aléatoirement. Le croisement de ces partitions permet d'obtenir un ensemble plus restreint de classes stables. On réalise alors une classification ascendante hiérarchique sur ces groupes. Après sélection d'un niveau de coupure, c'est à dire du nombre de classes que l'on souhaite conserver pour décrire l'ensemble des données initiales, on réalise des itérations de consolidation de la partition choisie, ou réaffectations qui optimisent la partition (on augmente l'inertie entre les classes).

d) - Pondération des analyses

On a évoqué précédemment l'éventualité d'une pondération des données soit pour redresser les échantillons, soit pour rétablir une égalité de représentation entre des séquences courtes et nombreuses (ne représentant qu'une part minime du kilométrage) et les séquences longues et rares (représentant une proportion importante des distances). L'A.C.P. autorise sans difficulté une pondération directe des données, pourvu que celle-ci ait un sens pour les variables considérées.

Dans le cas d'une analyse de fréquences temporelles, les séquences ou segments cinématiques sont automatiquement pondérés par leur durée totale. Un redressement de l'échantillon peut se faire en affectant à cette durée un coefficient de pondération lié au poids de l'individu (ici calculé à partir des durées de suivi des véhicule par exemple, cf. paragraphe 5.2.5.1).

e) - Autres outils

D'autres méthodes et outils tels que les techniques avancées de l'A.C.P. appliquée à l'étude de "processus" pourraient permettre l'analyse des courbes de vitesse en fonction du temps. Cependant, comme nous l'avons souligné, il ne s'agit pas ici d'une analyse chronologique du profil de vitesse, mais d'une caractérisation d'une tranche de déplacement en tant que mesure des conditions de circulation d'un lieu.

5.3.2.4 - Description des variables cinématiques selon le niveau d'analyse

Avant d'évaluer de manière plus concrète différents schémas d'analyse fondés soit sur les séquences cinématiques entre arrêts successifs, soit sur les segments cinématiques, on décrit ces éléments. L'annexe 4 compare les principales variables envisagées au travers de leurs caractéristiques selon qu'elles sont calculées au niveau des séquences ou des segments. On donne également la forme des histogrammes et les coefficients de forme et de dispersion de ces variables dans les deux cas.

a) Description des séquences entre arrêts

Le découpage des 9600 trajets conduit à la formation de 66000 séquences entre 2 arrêts successifs, dont 7500 séquences de fin de trajet. Le nombre moyen de séquences par trajet est de 6,5 (séquence de ralenti de fin de trajet incluse).

Nous n'analyserons pas ici en détail les différentes variables décrivant ces séquences, mais nous nous limiterons au constat des fortes dissymétries des distributions des variables décrivant la taille de la séquence (durée, distance, nombres d'événements tels qu'accélération, etc.), illustrées par le cas de la distance en figure 5.10 et tableau 5.3. Ainsi, la longueur moyenne des séquences (hors séquences de fin) est de 1,4 km, mais 45% des séquences font moins de 250 mètres et 77% moins de 1 km, alors que 2,3% dépassent 10 km. De même, leur durée moyenne est de 2 minutes, mais 20% durent moins de 30 sec., 24% durent entre 30 sec. et 1 mn, et 56% font plus de 1 mn (2.4% plus de 10 mn).

La durée des phases d'arrêt est de 0.4 mn en moyenne par séquence ; elle est inférieure à 15 s pour 53% des séquences, et inférieure à 30 s dans 78% des cas.

Les variables vitesses moyennes et écart-types des vitesses et accélérations sont moins dissymétriques. Les variables températures sont quasi normales, mais les températures du moteur présentent une valeur limite supérieure correspondant au fonctionnement thermique stabilisé du moteur.

b) cas des segments cinématiques

La décomposition des 9600 trajets en segments cinématiques tels que définis au paragraphe 5.3.2.2 - 4 conduit à la création de 69000 segments. Ce découpage en segments permet de compenser dans une large mesure les dissymétries des variables de taille constatées au niveau des séquences cinématiques entre arrêts. On obtient des segments plus homogènes : leur taille varie entre 0 et 5 km contre une étendue de plus de 200 km pour les séquences. La durée de route est

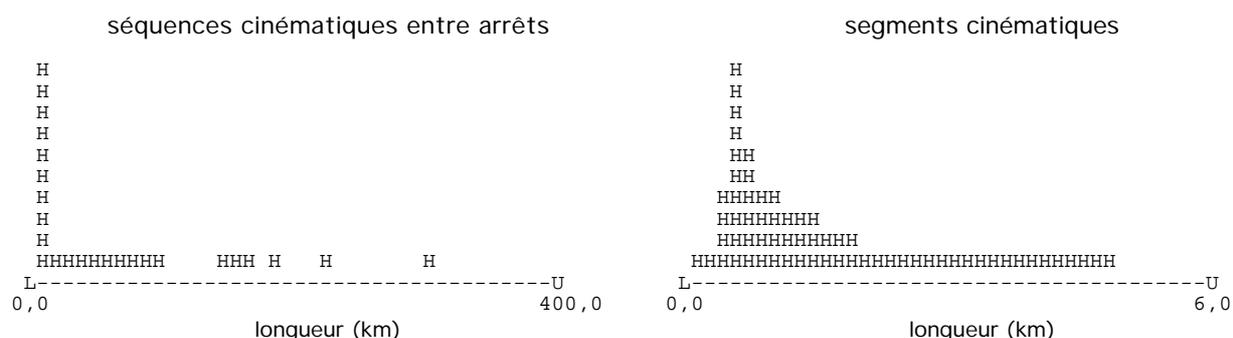


Figure 5.10 : Comparaison de la forme des histogrammes des longueurs selon le niveau d'analyse : séquences cinématiques entre arrêts (gauche), segments cinématiques (droite)

	séquences cinématiques entre arrêts	segments cinématiques de longueur variable
moyenne	1.4	1.2
médiane	0.3	0.9
écart-type (Q3-Q1)/2	6.6 0.4	0.8 0.5
maximum	306.	4.8
minimum	0.01	0.02
quartile Q1 (25%)	0.08	0.53
quartile Q3 (75%)	0.92	1.56
coefficient d'asymétrie	23	1.3
coefficient d'aplatissement	766	1.1

Tableau 5.3 : Comparaison des caractéristiques de la variable longueur ou distance parcourue, selon le niveau d'analyse : séquences cinématiques entre arrêts et segments cinématiques

inférieure à 5 mn alors qu'elle atteint 2 heures dans le cas des séquences. La longueur des segments présente une distribution beaucoup moins dissymétrique (cf. figure 5.10 et tableau 5.3).

5.3.2.5- Récapitulatif

Parmi les nombreux descripteurs utilisés ou envisagés, nous constatons qu'il est souhaitable de s'assurer de certaines précautions pour leur sélection : éviter les relations, privilégier des variables homogènes et de même nature, séparer la phase du mouvement de l'arrêt et également éviter les variables redondantes ou instables.

Le plus souvent, on a considéré la description des vitesses et des accélérations au travers de valeurs moyennes, maximales et de coefficients décrivant la dispersion et la forme de la distribution. On peut également de décrire les vitesses et accélérations sous forme d'une distribution croisée en fréquences.

Deux niveaux d'analyse de la courbe de vitesse ont été envisagés : la séquence cinématique entre 2 arrêts et un segment de taille plus homogène. Les outils d'analyse et de caractérisation des conditions de circulation sont liés à la sélection des variables et du niveau d'analyse.

5.3.3 - Analyse des conditions de circulation fondée sur les séquences cinématiques entre arrêts

Les paragraphes précédents ont permis d'envisager un grand nombre de variables décrivant les conditions de circulation, des niveaux d'analyse des courbes de vitesse au cours des trajets et des outils. Dans le prolongement, on évalue différents schémas d'analyse définis par un niveau d'analyse (séquences, segments), un ensemble de variables descriptives et les outils d'analyses correspondants. Dans une perspective de continuité des travaux menés, on évalue d'abord le schéma proposé antérieurement par [Crauser, 1989] et fondé sur les séquences cinématiques entre arrêts et l'Analyse en Composantes Principales normée (variables centrées et réduites). On utilisera successivement les jeux de variables proposés par l'auteur puis par [André, 1995]. On n'analyse pas dans ce cas les séquences de fin de trajets (qui nécessitent cependant d'être traitées séparément).

La non pertinence de l'utilisation de variables décrivant la taille des séquences et leur distribution très dissymétrique nous conduisent à considérer des variables décrivant spécifiquement le profil cinématique (à l'exclusion de variables décrivant la taille des séquences).

La forte inégalité de représentation des différentes conditions de circulation au travers des séquences cinématiques entre arrêts peut être redressée par une pondération de l'analyse par la durée de route.

On considère un échantillon correspondant à un tirage aléatoire de 20% soit environ 1950 des trajets enregistrés lors des expérimentations décrites au chapitre 6. On obtient 12700 séquences entre arrêts (dont 1400 séquences de fin de trajet). Cet échantillon représente 17000 km parcourus à 41 km/h et 420 heures d'enregistrements.

5.3.3.1 - Évaluation de l'approche antérieure : A.C.P., séquences entre arrêts

a) - A.C.P. sur séquences entre arrêts - variables [Crauser, 1989]

On applique le schéma d'analyse : A.C.P. normée aux séquences cinématiques entre arrêts décrites par les variables proposées par les auteurs [Crauser, 1989] : durée, distance, vitesses moyenne et maximale, histogramme en 4 classes des vitesses, nombre de mini-maxi (tableau 5.4).

L'A.C.P. permet d'identifier un premier axe très fort (44% de l'inertie) qui décrit le niveau de

Éléments cinématiques	Variables actives calculées sur l'élément cinématique		Pondération
Séquences entre arrêts	<ul style="list-style-type: none"> • durée totale • durée à l'arrêt • distance 	<ul style="list-style-type: none"> • vitesse moyenne • vitesse maximale • distribution des vitesses 	pas de pondération
au cours des trajets effectués par les différents véhicules	<ul style="list-style-type: none"> • nombre de mini - maxi de la courbe Vitesse (temps) 	<ul style="list-style-type: none"> instantanées en 4 classes 	

Tableau 5.4 : Tableau analysé, approche séquences entre arrêts, A.C.P., variables [Crauser, 1989]

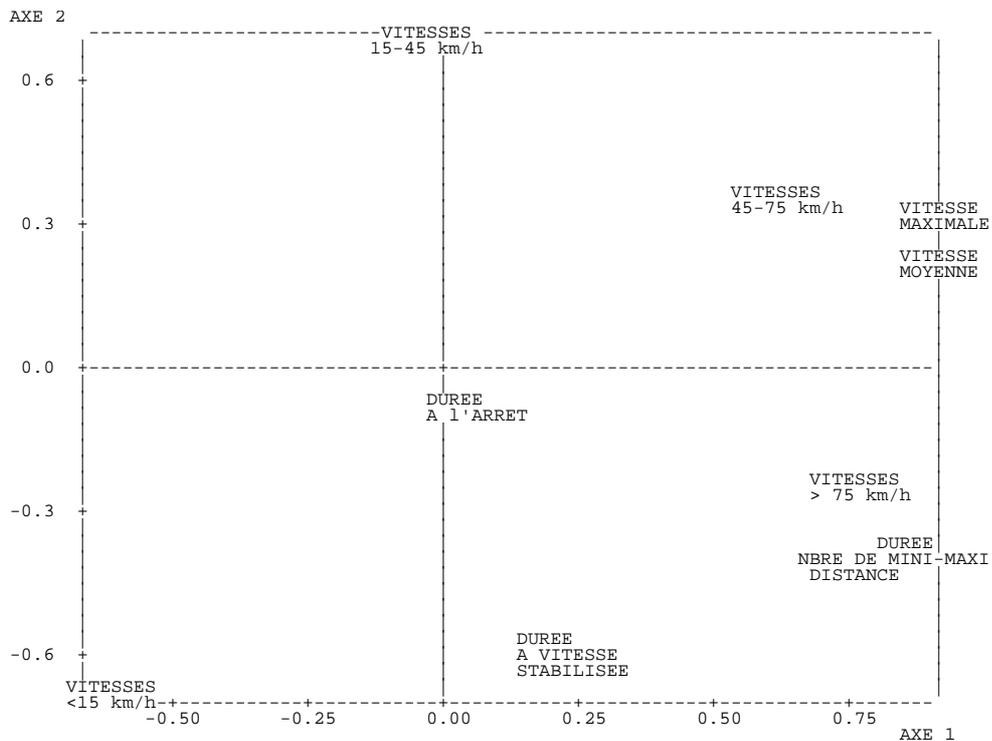


Figure 5.11 : Représentation des variables dans le premier plan principal (approche A.C.P., séquences cinématiques, variables: [Crauser, 1989])

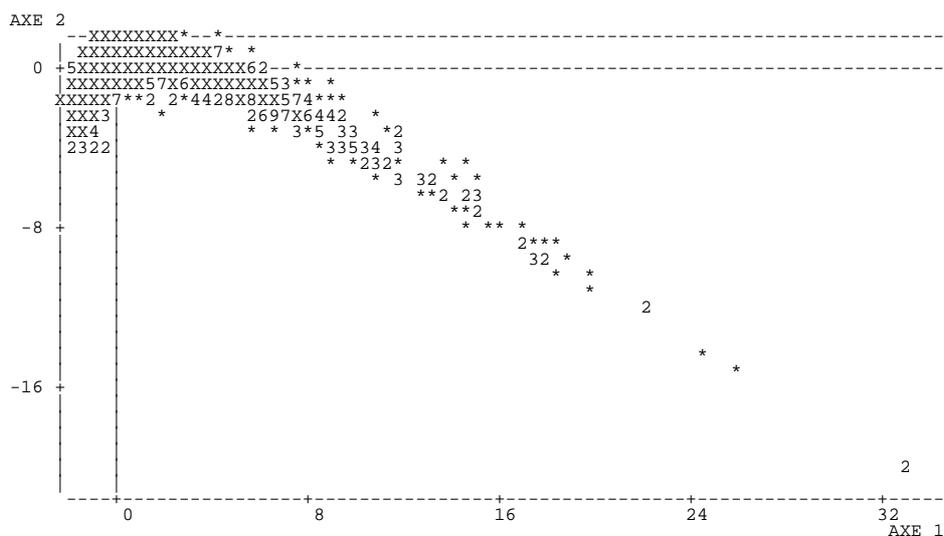


Figure 5.12 : Représentation du nuage des séquences cinématiques dans le premier plan principal (approche A.C.P., séquences cinématiques, variables: [Crauser, 1989])

vitesse des séquences (la corrélation des vitesses moyenne et maximale avec cet axe est de 0,9) et sur lequel sont bien représentées leur durée et la distance (corrélations avec l'axe de 0,84 et 0,80). Nous l'interprétons comme un axe vitesse - taille, qui oppose les séquences longues à haute vitesse aux séquences courtes à basse vitesse (cf. figure 5.11).

Les axes suivants affinent cette opposition et décrivent la distribution en 4 classes des vitesses : opposition entre les fréquences des vitesses basses (< 15 km/h mais non nulles) et des vitesses intermédiaires (15-45 km/h) sur l'axe 2 (20% de l'inertie), opposition entre les vitesses intermédiaires (15-45 km/h) et les vitesses plus élevées (45-75 km/h) sur l'axe 3 (12% de l'inertie), les fréquences des vitesses élevées étant décrites sur les axes 1 et 5. L'axe 4 décrit la durée à l'arrêt

(9% de l'inertie). Ces résultats sont conformes à ceux publiés sur les données françaises analysées en [Crauser, 1989].

La forte corrélation entre durée, distance et vitesse sur le premier axe est principalement due à la forme particulière du nuage des séquences : un très grand nombre de séquences courtes détermine le centre de gravité, tandis que qu'un nombre limité de séquences extrêmes (longues durées et distances, haute vitesse) très éloignées du centre de gravité (cf. figure 5.12) déterminent la corrélation et forment l'axe 1. Cette forte distorsion masque la relative indépendance entre durée et distance pour les séquences courtes.

On conclut que l'A.C.P. est mal adaptée au cas de variables dont les distributions sont très dissymétriques.

On note que le modèle linéaire (décrit par un axe principal fort) qui lie le niveau de vitesse et la taille de la séquence (durée, distance, nombre de minis-maxis) ne traduit pas la proportionnalité inverse entre vitesse et durée. On note également que la description de la distribution des vitesses en 4 classes est assez grossière.

b) - ACP - séquences entre arrêts - variables [André, 1991]

Le même schéma est appliqué aux variables utilisées lors de la construction de cycles urbains [André, 1991] : durées de route et à l'arrêt, distance, vitesse hors arrêts et maximale, nombres d'accélération, et pour décrire les distributions des vitesses et des accélérations : les écart-types, coefficients d'asymétrie et aplatissement et percentiles 25 et 75%.

Comme précédemment et pour les mêmes raisons de dissymétrie forte des variables décrivant la taille (ici la durée de route, la distance et les nombres d'événements), l'A.C.P. conduit à l'identification d'un axe de forte inertie (46%) qui lie taille de la séquence et niveau de vitesse. On note une configuration comparable du nuage des séquences dans le premier plan principal.

Les niveaux d'accélérations (décrits notamment par l'écart-type, corrélation avec l'axe: 0,90) sont portés par le second axe qui représente 15% de l'inertie. Ceci montre l'importance de ce paramètre dans la description des conditions de circulation. Les autres descripteurs des accélérations (accélération et décélération moyennes notamment) sont bien décrits sur cet axe.

L'axe 3 décrit la distribution des vitesses au travers des coefficients de forme (12% de l'inertie). Il oppose des séquences à distributions concentrées vers des hautes vitesses (coefficients

Éléments cinématiques	Variables actives calculées sur l'élément cinématique		Pondération
Séquences entre arrêts au cours des trajets effectués par les différents véhicules en différentes villes	<ul style="list-style-type: none"> • durée de route • durée à l'arrêt • distance • nombre d'accélération • nombre de décélération • vitesse hors arrêts • vitesse maximale 	<ul style="list-style-type: none"> • écart-type, coefficients aplatissement et asymétrie et quartiles de la distribution des vitesses instantanées • idem pour accélérations instantanées 	pas de pondération

Tableau 5.5 : Tableau analysé, approche séquences entre arrêts, A.C.P., variables [André, 1991]

d'asymétrie négatif, et d'aplatissement fort) à celles présentant des distributions étalées sur les basses vitesses (coefficients d'asymétrie positif, et d'aplatissement faible). Sur l'axe 4 (6% de l'inertie), la distance est partiellement représentée indépendamment de la vitesse.

La durée de la phase d'arrêt définit complètement l'axe 5 (4% de l'inertie), cette variable étant totalement décorrélée des autres variables. Ceci démontre le caractère stochastique de la phase d'arrêt par rapport à la phase de roulage qui suit, et la pertinence de ne pas inclure la phase d'arrêt lors du calcul des variables décrivant le mouvement.

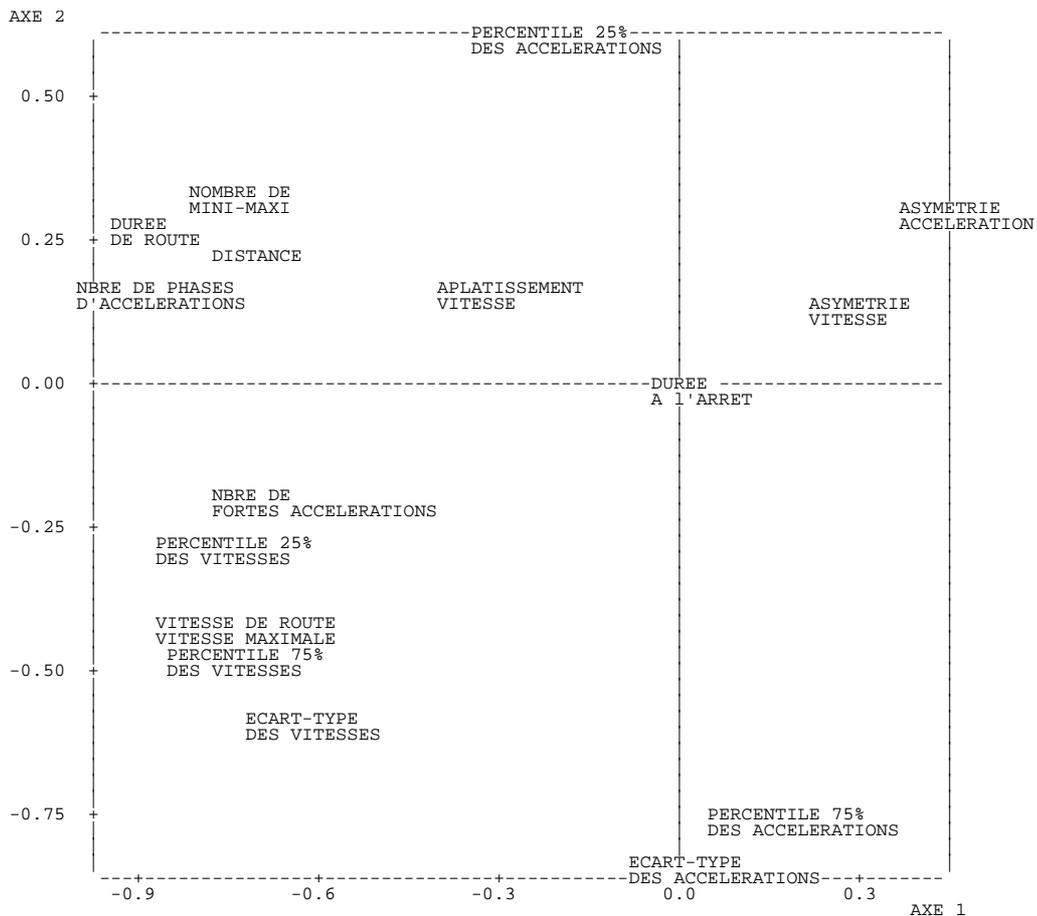


Figure 5.13 : Représentation des variables dans le premier plan principal (schéma : A.C.P., séquences cinématiques entre arrêts, variables [André, 1991])

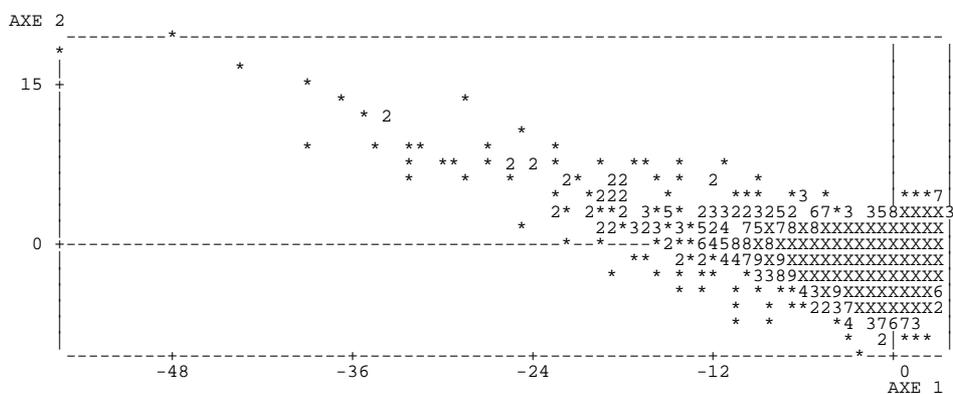


Figure 5.14 : Représentation du nuage des séquences cinématiques dans le premier plan principal (schéma : A.C.P., séquences cinématiques entre arrêts, variables [André, 1991])

L'écart-type des vitesses est bien représenté dans le plan des axes 1 et 2. Le coefficient de dissymétrie des accélérations n'intervient qu'en 7ème axe (rôle secondaire).

c) - Classification sur les coordonnées

Suite à l'analyse précédente, on effectue une classification sur les 7 premières coordonnées principales (qui sont interprétables, soit 90% de l'inertie). La nécessité d'identifier un groupe d'effectif très limité de séquences très longues (cf. ci-dessous) nous a conduit à effectuer un croisement de 5 classifications en nuées dynamiques autour de 10 centres, suivie d'une classification ascendante hiérarchique des formes fortes (d'au moins 3 séquences) et d'itérations de consolidations. Les sauts de l'histogramme des indices de niveau permettent d'envisager une partition en 3, 4, 6 ou 7 classes (cf. figure 5.15), mais on note que l'histogramme et les niveaux de coupure sont sensibles au paramétrage de la classification, en raison sans doute de la forte continuité du nuage des séquences.

On considère une partition en 4 classes par référence aux résultats publiés antérieurement et parce qu'elle conduit à identifier des classes de conditions de circulation sur autoroute, sur route, en urbain et congestionnée.

On note tout d'abord qu'un groupe d'effectif très limité (250 séquences sur 11000) de séquences extrêmes apparaît dès une partition en 2 classes. L'effectif de ce groupe est particulièrement sensible au paramétrage de la classification. Les variables les plus caractéristiques de la typologie obtenue (parmi celles qui ont participé à l'analyse et celles illustratives) sont dans l'ordre:

- la vitesse de route, la vitesse maximale,
- les durées (de route, en accélération, en décélération), la distance, les nombres d'événements (accélérations, etc.), c'est à dire globalement les variables liées à la taille de

CLASSIFICATION HIERARCHIQUE : DESCRIPTION DES NOEUDS D'INDICES LES PLUS ELEVES

Num	POIDS	INDICE	HISTOGRAMME DES INDICES DE NIVEAU
380	899	0.05656	*
381	1115	0.06080	*
382	1419	0.06487	**
383	1288	0.07224	**
384	729	0.09595	**
385	407	0.09903	**
386	1911	0.10170	**
387	1867	0.11929	**
388	205	0.16372	***
389	1776	0.20174	****
390	1465	0.21354	****
391	3494	0.24077	****
392	2364	0.26100	*****
393	696	0.29984	*****
394	1949	0.38411	*****
395	3725	0.41574	*****
396	1425	0.70071	*****
397	5150	1.10385	*****
398	250	1.18479	*****
399	7514	1.93624	*****
400	11008	3.18327	*****
401	11258	5.10520	*****

SOMME DES INDICES DE NIVEAU = 17.15899

Figure 5.15 : Histogramme des indices de niveaux lors d'une classification ascendante hiérarchique sur les classes (formes fortes) obtenues par nuées dynamiques (schéma : A.C.P., séquences cinématiques, variables [André, 1991])

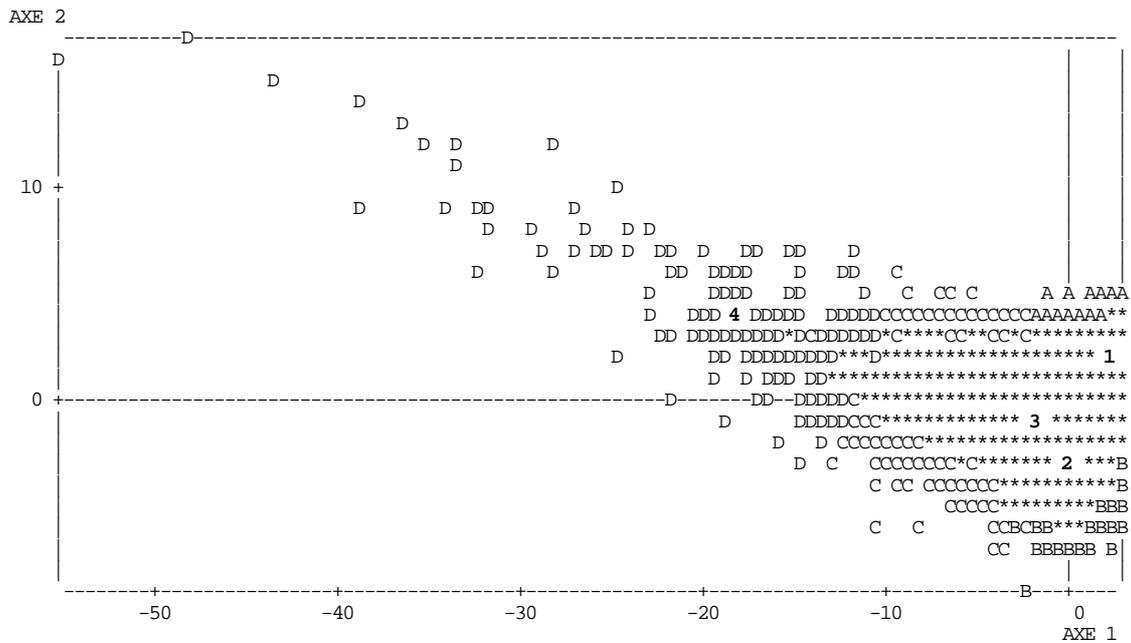


Figure 5.16 : Représentation dans le premier plan de l'affectation des séquences cinématiques en 4 classes identifiées par leur centre de gravité

la séquence,

- les niveaux d'accélération et leur écart-type.

Les variables les moins caractéristiques sont la durée à l'arrêt, les variables thermiques, les coefficients de forme de la vitesse. Ceci illustre une relative indépendance entre la durée à l'arrêt, les conditions thermiques du moteur et le type de séquences. Les coefficients de forme de la distribution des vitesses jouent également un rôle secondaire dans la caractérisation des cinématiques.

La représentation du nuage dans le premier plan montre que 3 des classes sont très proches du centre de gravité par rapport à la forte dissymétrie du nuage, en raison du nombre très important de séquences formant le noyau central. Le milieu continu rend sensible la détermination de la quatrième classe de séquences longues et à haute vitesse.

Les principales caractéristiques et les poids respectifs des classes obtenues sont donnés dans le tableau 5.6. On obtient une typologie assez contrastée en terme de niveaux de vitesse et d'accélération en accord avec les résultats obtenus lors des travaux antérieurs.

Cependant, on note la forte disproportion des poids en nombre et en kilométrage des différentes classes (73% des séquences des classes urbaines 1 et 2 représentent 13% du kilométrage, tandis que 1,2% des séquences concernent 35% des distances). Ceci traduit une forte inégalité de représentation des différents types de conditions de circulation au travers de ce schéma d'analyse.

On note également les plages à large recouvrement des vitesses moyennes de chacune des classes (de 30 à 150 km/h pour les séquences autoroutières). Ceci peut être la conséquence d'au moins deux raisons :

	1 - trafic urbain congestionné	2- trafic urbain fluide	3 - trafic routier	4 - trafic autoroutier
% nombre	38,2	34,6	26,0	1,2
% distance	4,1	9,3	52,0	34,6
longueur moyenne (km)	0,16	0,41	3,04	42,6
plage de distances (km)	0 - 3	0 - 2	0 -32	5-216
durée moyenne (min.)	1,0	1,2	4,0	29,6
vitesse hors arrêts (km/h)	15,7	29,5	49,8	87,4
plage de vitesse (km/h)	2-36	6-77	13-130	28-148
accélération positive moyenne (m/s ²)	0,67	0,92	0,75	0,61
plage d'accélération (m/s ²)	0,3-1,9	0,5-2,0	0,4-1,9	0,4-0,9
Principales caractéristiques				
distances :	0 - 150m	0,150 - 1 km	1 - 10 km	longues
vitesse :	faibles - stables	intermédiaires	élevées	élevées
accélérations :	faibles	fortes	moyennes	

Tableau 5.6 : typologie des séquences cinématiques, obtenue par A.C.P. suivie de classification des séquences cinématiques entre arrêts, variables [André, 1991], sur un échantillon de 20% des trajets

- le modèle qui lie vitesse et taille conduit à affecter des séquences longues à vitesses moyennes ou basses à la classe des séquences "autoroutières" (du fait de leur durée ou distance), et réciproquement à affecter des séquences courtes à vitesses élevées aux groupes des séquences urbaines,

- les classes de séquences routières et autoroutières, qui ne comptent qu'un nombre limité de séquences même si celles-ci sont très longues et représentent une forte proportion du kilométrage, ne se distinguent pas nettement en raison d'un nuage très continu et de la prépondérance en nombre des séquences courtes (plutôt urbaines à vitesse limitée).

Les résultats de ce schéma reposent donc essentiellement sur les séquences extrêmes caractérisées par d'abord par leur taille et par leur vitesse élevée, et la capacité du processus de

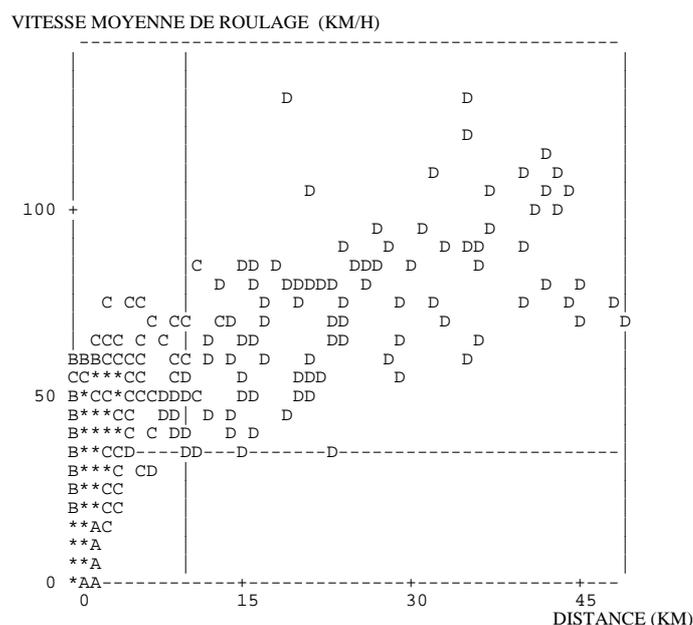


Figure 5.17 : Représentation des 4 classes de séquences cinématiques selon leur distance et vitesse moyenne hors arrêts - la classe D est principalement identifiée en distance

classification à identifier de manière précise ce groupe d'effectif très limité. On réalise essentiellement une typologie en taille des séquences, comme l'illustre la figure 5.17. Il faut également noter que la taille des séquences (et particulièrement pour les séquences longues qui atteignent plusieurs centaines de kilomètres) ne participe que peu à la description des conditions cinématiques et en particulier des conditions locales de circulation.

c) - Sensibilité de la classification

Lors de la classification précédente et des itérations de consolidations, on note des changements importants des effectifs des 4 classes qui passent :

de	3494	2364	5150	250 séquences,
à	4301	3896	2922	139 séquences.

Ces mouvements nous ont conduit à évaluer la sensibilité de la partition selon les paramètres de la classification. Sur les mêmes coordonnées mais sur un échantillon différent de 41000 séquences (qui correspond aux données disponibles après collecte dans 3 des 4 pays concernés), différents paramétrages de classification ont été utilisés. On compare leur incidence sur les partitions en 4 et 5 classes en terme d'effectifs des classes obtenues (tableaux 5.7 et 5.8). La partition en 5 classes est plus souvent justifiée par un saut dans l'histogramme des indices de niveaux. On observe une certaine stabilité des effectifs des classes 1 à 3. Les classes d'effectifs les plus faibles (4/4 et 4 et 5 /5) sont plus sensibles au nombre total de classes initiales (formes fortes) obtenues par croisement de partitions et à la taille minimale de ces classes avant ré-affectation et classification ascendante hiérarchique. La consolidation de la partition par réaffectations dépend également de cette taille minimale, qui conditionne la constitution des classes finales.

paramètres de la classification			partition en 4 classes				qualité de la partition	
nombre d'axes	nombre de centres ou croisement de :	réaffectation des classes d'effectif mini :	1/4	2/4	3/4	4/4	inertie inter / totale	justifiée ou non
7 axes	5 partitions de 10	2	14593	15239	10663	521	0,50	non
7 axes	3 partitions de 50	4	14382	17299	8862	473	0,50	justifiée
7 axes	3 partitions de 50	20	17652	20445	2765	154	0,495	non
5 axes	5 partitions de 10	2	14556	15682	10271	507	0,545	non
5 axes	1000 centres aléatoires	2	14883	20076	5728	329	0,545	

Tableau 5.7 : Incidence des paramètres de classification sur une partition en 4 classes

paramètres de la classification			partition en 5 classes					qualité de la partition	
nombre d'axes	nombre de centres ou croisement de :	réaffectation des classes d'effectif mini :	1/5	2/5	3/5	4/5	5/5	inertie inter / totale	justifiée ou non
7 axes	5 partitions de 10	2	14682	13486	11106	1615	127	0,56	justifiée
7 axes	3 partitions de 50	4	14275	14940	10561	1149	91	0,56	
7 axes	3 partitions de 50	20	14432	13105	11594	1746	139	0,56	justifiée
5 axes	5 partitions de 10	2	14918	12833	11654	1489	122	0,61	justifiée
5 axes	1000 centres aléatoires	2	14179	14079	9749	2761	248	0,61	

Tableau 5.8 : Incidence des paramètres de classification sur une partition en 5 classes

La continuité du nuage nous conduit en conséquence à privilégier un paramétrage de la classification qui permette d'identifier des groupes d'effectifs restreints (grand nombre de centres ou de formes fortes avant réaffectations).

d) - Évaluation globale du schéma précédent

Les principaux enseignements que l'on peut tirer de l'utilisation du schéma d'analyse : A.C.P. - Classification - séquences entre arrêts et variables précédentes sont les suivants :

- le schéma repose sur des variables décrivant la taille des séquences et qui présentent des distributions très dissymétriques : un grand nombre de séquences sont très courtes (quelques centaines de mètres) et forment le centre du nuage, tandis qu'un nombre limité de séquences extrêmes (plusieurs centaines de kilomètres) à vitesse élevée déterminent la corrélation entre taille de la séquence et niveau de vitesse sur un premier axe principal fort. Le modèle obtenu lie d'abord le niveau de vitesse à la taille de la séquence.

- une classification sur les coordonnées principales conduit à construire une typologie dont les plages de vitesse présentent un large recouvrement : des séquences à faible vitesse sont affectées à des classes extra-urbaines et réciproquement. On conclut à une capacité insuffisante de discernement des conditions de circulation. On réalise plutôt une typologie en taille des séquences.

- le milieu continu du nuage des séquences et surtout le nombre très faible de séquences autoroutières rendent l'identification de ce groupe difficile et sensible au paramétrage de la classification.

- la description repose sur une forte inégalité de représentation des différents types de conditions de circulation au travers des séquences dans les analyses, qui se traduit par une disproportion des poids des classes en nombre et kilométrage (73% des séquences urbaines ne représentent que 13% du kilométrage, tandis que 1,2% des séquences concernent 35% des distances).

Les résultats reposent donc essentiellement sur les séquences extrêmes caractérisées par leur taille et leur vitesse élevée, et sur la capacité du processus de classification à identifier assez précisément un groupe d'effectif très limité de ces séquences.

On conclut donc que l'A.C.P. normée est mal adaptée à ce cas incluant des variables très dissymétriques. Les variables décrivant la "taille" de la séquence ne constituent pas des indicateurs pertinents des conditions cinématiques et, plus généralement, les séquences elles-mêmes qui peuvent être très longues ne sont pas une bonne représentation des conditions locales de circulation.

Deux autres résultats sont à souligner : le rôle des accélérations dans la caractérisation des conditions de circulation (seconde composante principale et variable caractéristique de la partition), et l'indépendance de la durée de la phase d'arrêt par rapport aux autres variables et par rapport à la typologie obtenue.

5.3.3.2- A.C.P., séquences entre arrêts et variables cinématiques

On a souligné précédemment le rôle des variables liées à la taille de la séquence, qui conduit finalement à réaliser une typologie selon la taille. Ceci nous conduit à ne retenir que des variables décrivant spécifiquement les conditions cinématiques (vitesses et accélérations) ou réduites par la taille de la séquence :

- la vitesse moyenne hors arrêts
- l'intervalle interquartiles des vitesses (on aurait pu retenir l'écart-type de la vitesse),
- les coefficients de forme (asymétrie et aplatissement) de la distribution de la vitesse,
- le percentile 75% de la vitesse exprimant le niveau atteint (plus robuste que la vitesse maximale),
- les puissances moyennes en accélération et en décélération,
- les valeurs moyennes d'accélérations positive et négative.

Dans un second temps, nous envisagerons une analyse pondérée par la durée des séquences cinématiques entre arrêts.

Éléments cinématiques	Variables actives calculées sur l'élément cinématique	Pondération
Séquences entre arrêts	<ul style="list-style-type: none"> • vitesse hors arrêts • intervalle interquartile des vitesses instantanées • coefficients aplatissement et d'asymétrie et percentile 75% de la distribution des vitesses instantanées 	<ul style="list-style-type: none"> • pas de pondération
au cours des trajets effectués par les différents véhicules en différentes villes	<ul style="list-style-type: none"> • puissances moyennes en accélération et décélération • accélération et décélération moyennes 	<ul style="list-style-type: none"> • pondération par la durée

Tableau 5.9 : Tableau analysé, approche séquences entre arrêts, A.C.P., variables décrivant spécifiquement les cinématiques

a) - A.C.P. - sur les variables cinématiques locales

Cette sélection de variables est utilisée avec les mêmes données que précédemment et analysée par l'A.C.P. Le premier axe décrit le niveau de vitesse (53% de l'inertie, corrélations des vitesses avec l'axe de 0,9) ; les puissances moyennes et les variations de la vitesses sont également bien représentées sur cet axe. Les axes 2 et 5 décrivent la distribution des vitesses au travers des coefficients de forme (19% et 5% de l'inertie). Les axes 3 et 4 décrivent les niveaux d'accélération (positives et négatives, respectivement 11 et 6% de l'inertie). Les autres axes sont mineurs (moins de 3% d'inertie) et semblent difficilement interprétables.

On obtient un nuage beaucoup moins dissymétrique que précédemment (cf. figure 5.19), qui repose sur des variables elles-mêmes moins dissymétriques que les celles liées à la taille des séquences.

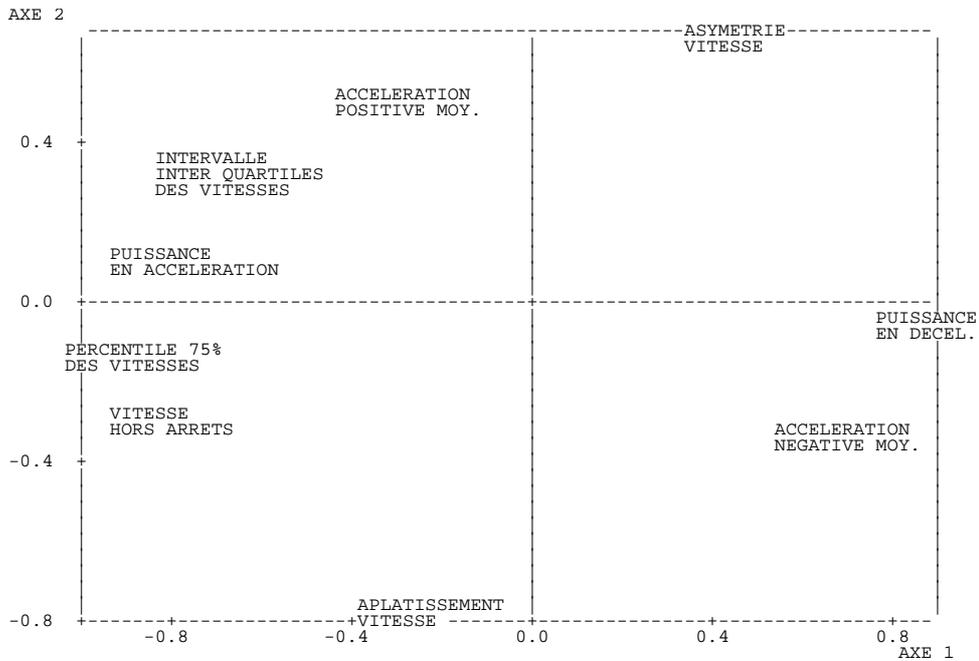


Figure 5.18 : Représentation des variables cinématiques dans le premier plan principal - schéma d'analyse : A.C.P., séquences entre arrêts, variables cinématiques

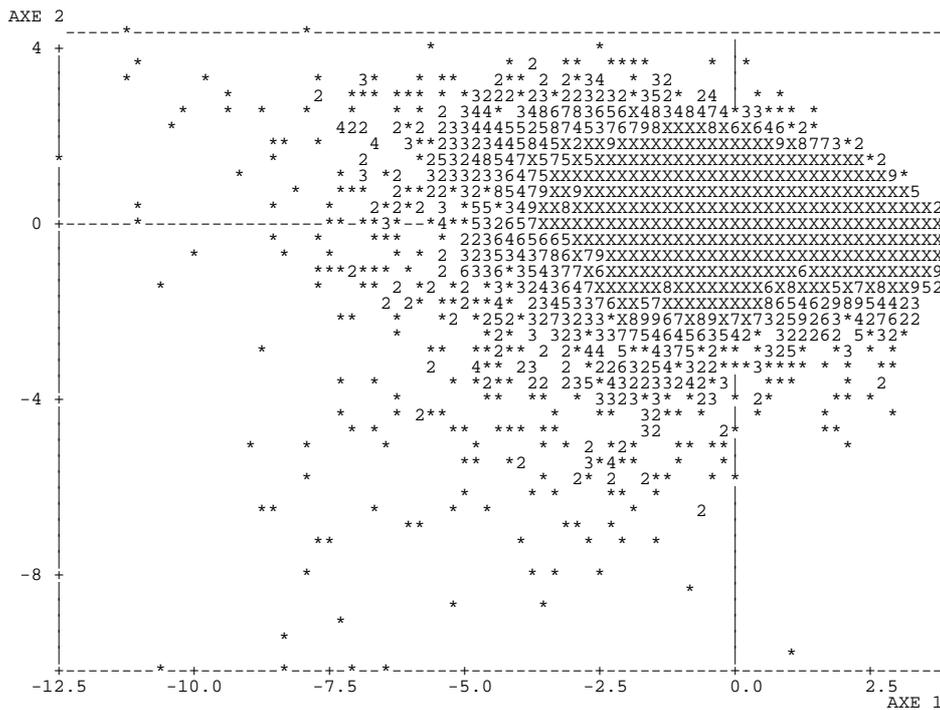


Figure 5.19 : Représentation du nuage des séquences cinématiques dans les 2 premiers axes principaux - schéma d'analyse : A.C.P., séquences entre arrêts, variables cinématiques

On effectue une classification sur les 5 premiers axes soit 96% de l'inertie. Une partition en quatre classes semble pertinente selon l'histogramme des indices de niveau. Comme précédemment, les itérations de consolidation s'accompagnent de mouvements importants, le nuage des séquences étant très continu (cf. figure 5.19). Les variables les plus caractéristiques d'une partition en 4 classes sont successivement les variations des vitesses, la vitesse moyenne, les accélérations, puis la forme de la distribution des vitesses et la taille (durée, distance). Cette

	1 - trafic urbain congestionné	2- trafic rapide	3 - trafic intermédiaire	4 - urbain fluide
% nombre	39,5	11,1	10,5	38,9
% distance	4,9	40,4	32,4	22,3
vitesse hors arrêts (km/h)	16,5	71,7	66,3	33,5
plage de vitesse (km/h)	2-37	24-147	2-148	6-60
accélération positive moyenne (m/s ²)	0,66	0,90	0,74	0,87
plage d'accélération (m/s ²)	0,3-1,3	0,5-2,0	0,4-1,9	0,4-1,9
Principales caractéristiques				
distances :	0 - 150m	1 - 10 km	1 - 10 km	0,3 - 1 km
vitesse :	faibles	40 - 80 km/h	30 - 60 km/h	faibles 20 - 30
accélérations :	faibles	fortes	moyennes	fortes

Tableau 5.10 : typologie des séquences cinématiques utilisant les variables cinématiques réduites sur un échantillon de 20% des trajets

partition est beaucoup moins contrastée (en particulier en niveaux de vitesse, cf. tableau 5.10) que la précédente. En effet, le fait d'avoir éliminé les variables de taille (durée, distance, etc.) de l'analyse, le nuage des séquences est beaucoup moins dissymétrique (cf. les échelles des axes principaux figures 5.14 et 5.19). On réalise une partition fortement influencée par le très grand nombre de séquences à faible vitesse, en classes d'effectifs beaucoup plus homogènes que précédemment et dont les centres de gravité sont proches. On n'identifie plus un petit nombre de séquences extrêmes qui émergeaient auparavant par leur taille.

On retrouve le fort déséquilibre de représentation dans les analyses, puisque 40% des séquences de la classe 1 ne représentent que 5% du kilométrage.

b) - Pondération par la durée de route

L'inégalité de représentation lors des précédentes approches peut-être résolue par une pondération des séquences selon leur taille. Une A.C.P. normée avec pondération par la durée de route a été appliquée aux séquences cinématiques entre arrêts décrites par les variables

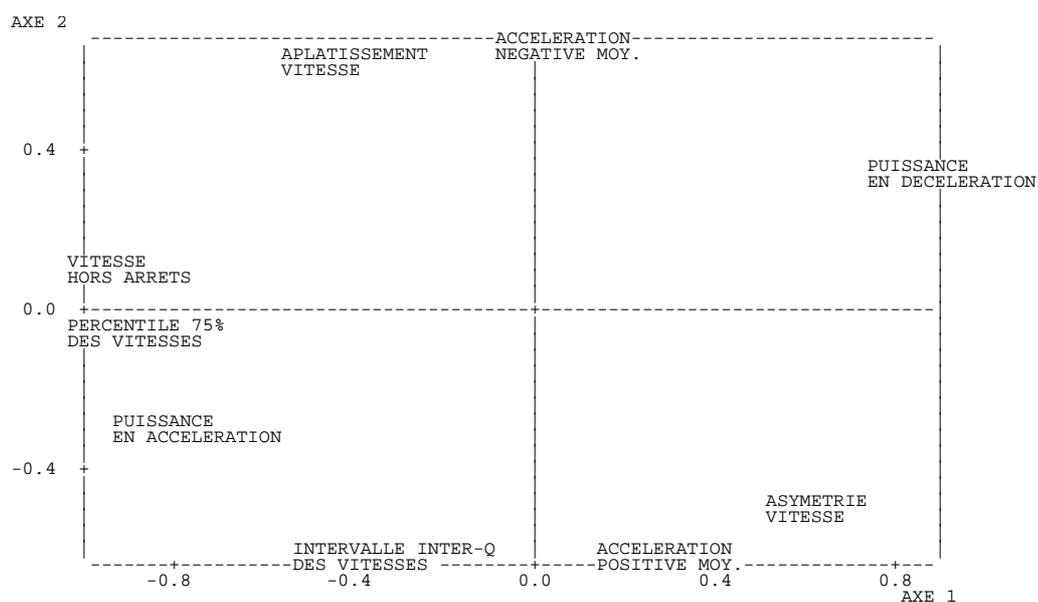


Figure 5.20 : Représentation des variables dans le premier plan - schéma d'analyse : A.C.P. pondérée, séquences entre arrêts, variables cinématiques

cinématiques locales précédentes. On identifie typiquement un axe principal de niveau des vitesses (48% de l'inertie). Les second et troisième axes décrivent les niveaux d'accélération (24% et 14%). Malgré la similitude des axes principaux avec le cas précédent, la pondération engendre une forte distorsion du nuage (cf. figures 5.19 et 5.21).

Une classification sur les 5 premiers axes accorde beaucoup plus de poids aux séquences longues et à haute vitesse, puisque dès une partition en 4 classes, on identifie 2 groupes distincts de séquences à haute vitesse (cf. tableau 5.11). A l'inverse, cela signifie qu'on décrit moins bien les conditions de circulation urbaines. On obtient de cette manière une typologie contrastée tant en niveaux de vitesse que d'accélération. On doit noter qu'on obtient au travers de ce schéma une autre "vision" des conditions de circulation, puisque celle-ci accorde une importance plus forte aux conditions extra-urbaines. On devra considérer des nombres de classes plus importants pour obtenir une description détaillée des conditions urbaines.

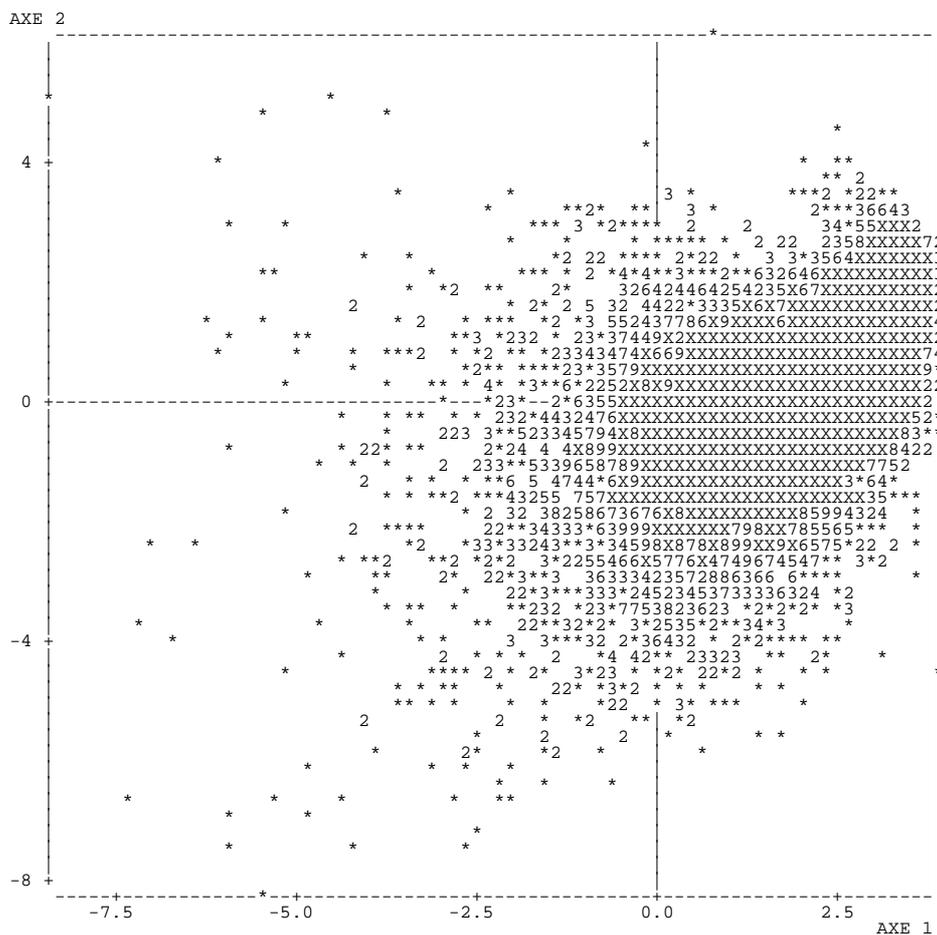


Figure 5.21 : Représentation du nuage des séquences cinématiques dans le premier plan principal - schéma d'analyse : A.C.P. pondérée, séquences entre arrêts, variables cinématiques

	1 - trafic rapide	2- trafic très rapide	3 - trafic intermédiaire	4 - urbain fluide
% nombre	4,5	1,1	37,7	56,7
% distance	33,6	19,4	24,2	22,8
vitesse hors arrêts (km/h)	76	100	40	29
plage de vitesse (km/h)	35-125	34-148	5-76	2-65
accélération positive moyenne (m/s ²)	0,73	0,66	0,93	0,68
plage d'accélération (m/s ²)	0,5-1,5	0,4-1,1	0,5-2,0	0,3-1,3
Principales caractéristiques				
distances :	3 - 10 km	3 - 10 km	0,3 - 3 km	0 - 150 m
vitesses :	40 - 80 km/h	60 - 80 km/h	20 - 40 km/h	faibles 0 - 20
accélérations :	fortes	moyennes	fortes	faibles

Tableau 5.11 : typologie des séquences cinématiques obtenue par ACP pondérée par la durée de route sur les variables cinématiques réduites et sur un échantillon de 20% des trajets

c) - Conclusion

L'utilisation de variables décrivant spécifiquement les vitesses et accélérations à l'exclusion des variables de taille souligne les principaux problèmes sous-tendus par l'approche antérieure qui reposait sur les variables de taille à distribution très dissymétriques. On obtient une partition peu contrastée, fortement influencée par le très grand nombre de séquences à faible vitesse, en classes d'effectifs homogènes. Le nuage des séquences étant beaucoup moins étiré, il devient impossible d'identifier un très faible nombre de séquences extrêmes qui émergeraient d'abord par leur taille.

Le fort déséquilibre de représentation et l'identification de ces séquences peuvent être résolus par la pondération par la durée de route. On obtient alors une typologie contrastée en niveaux de vitesse et d'accélération qui ne repose pas sur les variables de taille. Cette nouvelle approche donne un autre éclairage de la description des conditions de circulation, puisqu'elle donne une importance plus grande aux conditions extra-urbaines (ou à vitesses élevées).

Compte tenu de l'espace très continu des séquences, l'identification de groupes d'effectif très restreint (séquences autoroutières) reste sensible au paramétrage de la classification, comme lors des approches précédentes.

Enfin, il demeure que les séquences dont la distance peut être très longue ne sont pas une bonne représentation de conditions locales et que les variables cinématiques envisagées donnent une description limitée des profils de vitesse.

5.3.4 - Analyse des conditions de circulation fondée sur les segments cinématiques

Les paragraphes précédents appellent principalement à une remise en question du concept de séquences cinématiques entre arrêts et à la recherche d'une meilleure description des cinématiques. Comme précédemment, on considère un échantillon de 1950 des trajets, soit 17000 km parcourus et 420 heures d'enregistrements.

5.3.4.1 - Segments cinématiques de longueur variable

Afin de lever l'insuffisance des séquences entre arrêts à décrire des conditions locales et la forte inégalité de représentation des conditions de circulation, on envisage un découpage en segments de tailles plus homogènes. Leur taille est cependant variable selon les conditions de circulation afin d'obtenir une description assez précise des conditions urbaines tout en n'augmentant pas considérablement le nombre de segments. On analyse un ensemble de 14400 segments (20% des trajets enregistrés) dont la longueur varie entre quelques centaines de mètres à basse vitesse et 6 km à haute vitesse, selon les règles de construction proposées au paragraphe 5.3.2.2.4.

5.3.4.2 - Description plus fine des cinématiques

Comme évoqué antérieurement (paragraphe 5.3.2.1), nous proposons une description du profil de vitesse au travers de la distribution croisée des vitesses et accélérations. Les fréquences en durée de route sont calculées sur les phase de mouvement (hors arrêt). Six classes de vitesses (<20 km/h, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 et +) et 5 classes d'accélérations instantanées (<-0.6 m/s², -0.6 à -0.2, -0.2 à +0.2, 0.2 à +0,6 et +) sont considérées. Avec la durée à l'arrêt, variable homogène aux précédentes, on obtient une description complète de la séquence ou du segment considéré. D'autres variables sont utilisées pour illustrer l'analyse (durées par classes de vitesse et d'accélération, durées en accélération, etc.). L'analyse de ces fréquences nécessite l'analyse des correspondances binaires (A.C.B.). Les étapes ultérieures de classification et de description des

Éléments cinématiques	Variables actives calculées sur l'élément cinématique (fréquences en fonction du temps)	Pondération
Segments cinématiques (0 à 6 km selon le niveau de vitesse) au cours des trajets effectués par les différents véhicules en différentes villes	<ul style="list-style-type: none"> • durée à l'arrêt • fréquences en durée des classes de la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées <p>- classes de vitesse: <20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 et + en km/h</p> <p>- classes d'accélération: <-0.6, -0.6 à -0.2, -0.2 à +0.2, 0.2 à +0,6 et + en m/s²</p>	<ul style="list-style-type: none"> • pondération implicite par la durée totale du segment
	Variables illustratives (fréquences) : <ul style="list-style-type: none"> • durées en stabilisé, en accélération, en décélération • durées par classes de vitesse (6 classes), durées par classes d'accélération (7 classes) 	

Tableau 5.12 : Tableau analysé, approche segments cinématiques homogènes, A.C.B., distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées

partitions sont comparables.

Le profil marginal en ligne du tableau analysé décrit la distribution mesurée sur l'ensemble des données (et sur l'ensemble des trajets enregistrés) et l'importance relative des variables. Ainsi, la durée à l'arrêt représente 18% de la durée totale, et chacune des classes résultant du croisement des classes de vitesse et d'accélération représente entre 0,2 % (vitesses élevées, fortes accélérations) et 7 % (vitesses intermédiaires stables, cf. figure 5.22). Globalement, les classes de vitesse représentent entre 6 et 20% de la durée totale (figure 5.23). Les faibles effectifs observés pour les classes extrêmes de l'histogramme des accélérations justifient le regroupement de ces classes pour la distribution croisée des vitesses et accélérations.

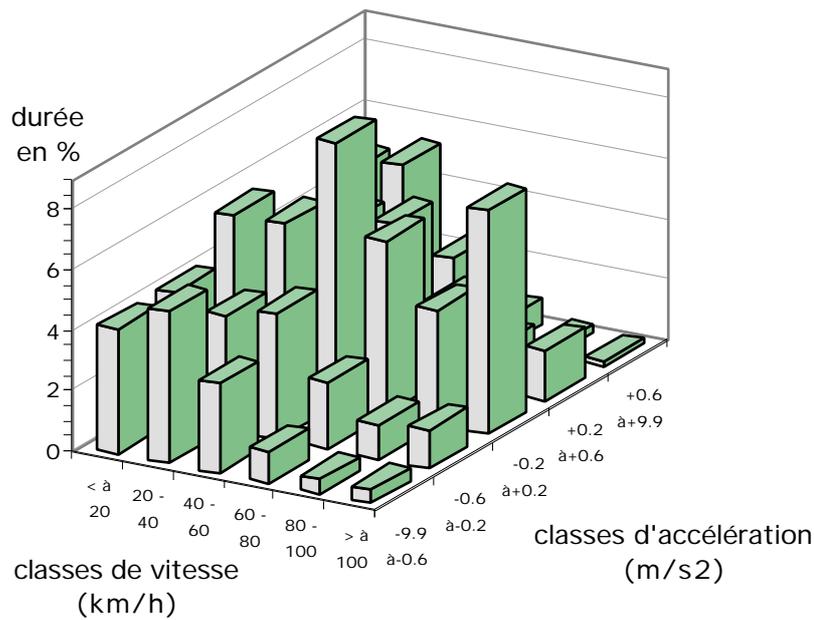


Figure 5.22 : Distribution marginale des vitesses et accélérations instantanées (hors arrêts)

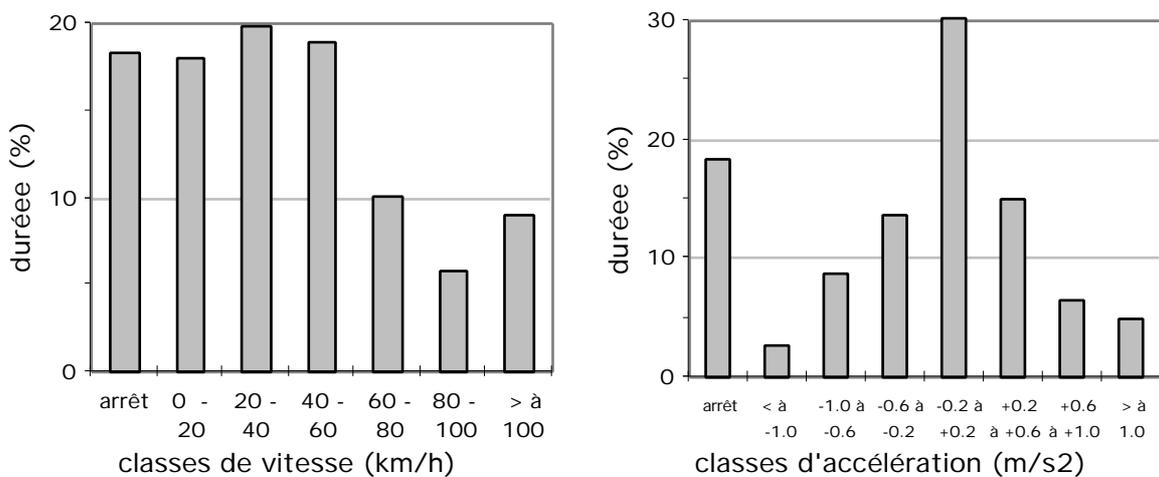


Figure 5.23 : Histogrammes des vitesses et accélérations instantanées

5.3.4.3 - Analyse des Correspondances Binaires appliquée aux segments cinématiques

On trouvera en annexe 7, les principaux résultats de l'analyse, appliquée à l'ensemble des données (soit 69000 segments). Ces résultats diffèrent peu de ceux établis à partir de l'échantillon de 20% des trajets considéré ici.

Appliquée aux segments cinématiques, l'A.C.B. identifie un premier axe qui représente 24% de l'inertie et est caractérisé par les fréquences à vitesses élevées (100 km/h et +) et stables (fortes contributions et corrélations des classes de vitesses sur cet axe). L'axe 2 est caractérisé par les fréquences de vitesses intermédiaires (60 à 100 km/h). Il représente 16% de l'inertie. Les fortes fréquences de ces classes de vitesse sont opposées à de fortes fréquences à l'arrêt.

L'axe 3 (11% d'inertie) oppose des segments caractérisés par des vitesses moyennes (40 - 60 km/h), aux segments associant simultanément des vitesses plus élevées (80 - 100 km/h) et une durée à l'arrêt plus forte. Cet axe oppose donc des segments relativement stables et à vitesses intermédiaires à des segments à profil plus perturbé. Sur l'axe 4 (8% d'inertie) s'opposent des segments caractérisés par les fréquences de vitesses intermédiaires (60 - 80 km/h) liées à une forte durée à l'arrêt, et des segments parcourus à des vitesses moyennes ou faibles (20 - 60 km/h). Comme l'axe 3, cet axe oppose des segments stables à ceux alternant arrêt et vitesses plus élevées.

L'axe 5 est caractérisé par les vitesses faibles (0 à 40 km/h), opposées aux vitesses moyennes 40-60 km/h ou plus élevées en accélération ou décélération. L'axe 7 représente les vitesses très faibles stables (0 - 20 km/h et 40 - 60 km/h dans une moindre mesure).

Les axes 3 à 5 et 7 opposent donc principalement des classes de vitesses. La durée à l'arrêt est représentée sur les axes 2 à 5.

Les axes 6, 8 et 9 sont des axes décrivant les accélérations. Ils opposent des conditions stabilisées (faibles accélérations) aux conditions instables ou transitoires. L'axe 6 est caractérisé par les vitesses élevées (> 100 km/h) en accélération ou décélération. Les axes 8 et 9 concernent respectivement les vitesses intermédiaires (40 à 100 km/h) ou les vitesses faibles (20 - 40 km/h).

Les axes 10 et suivants expriment des dissymétries des d'accélérations : ils opposent pour différentes classes de vitesse, des classes d'accélération. Ces axes représentent des valeurs propres faibles (inférieures à 2%).

En résumé, on obtient une description riche des profils de vitesse au travers d'axes opposant des classes de vitesse (axes 1 à 5 et 7, soit 70% de l'inertie), puis d'axes traduisant des oppositions entre vitesses stabilisées et fonctionnement transitoire (axes 6, 8 et 9, soit 12% d'inertie), et d'axes qui opposent des classes d'accélérations.

On note l'échelonnement selon un arc des niveaux de vitesse dans le premier plan (depuis l'arrêt vers les vitesses élevées, cf. figure 5.24). Les accélérations sont graduées quasi-orthogonalement à cet arc. Les classes d'accélérations sont généralement proches (et donc associées) aux classes de décélérations correspondantes.

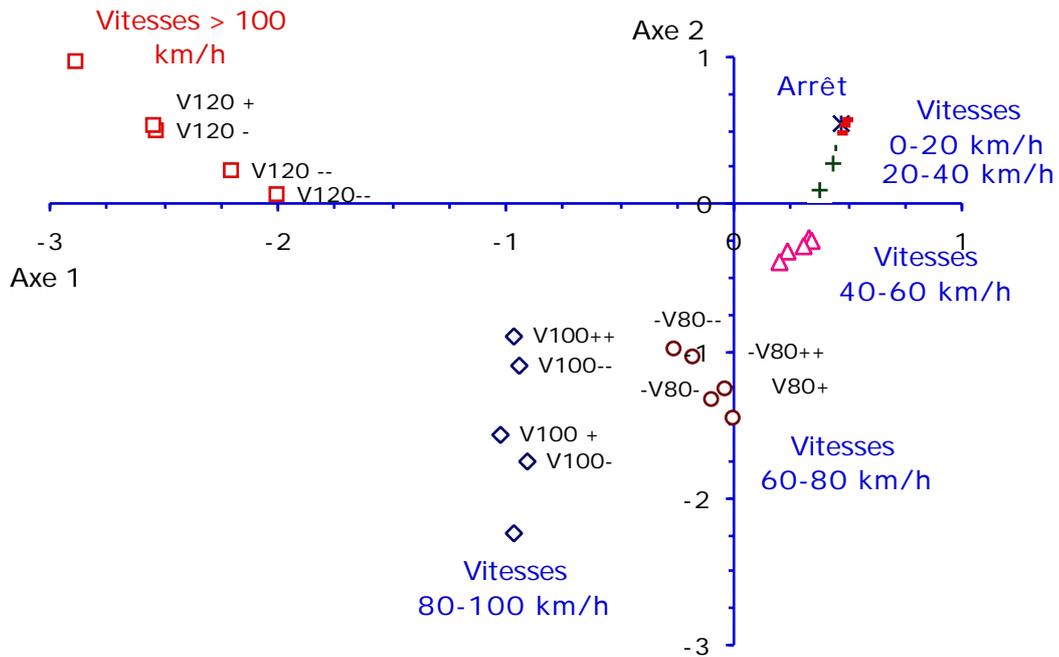


Figure 5.24 : Représentation des fréquences de la distribution croisée des vitesses et accélérations dans le premier plan (40% d'inertie) obtenu par Analyse des Correspondances Binaires sur les segments cinématiques (convention : V80++ : vitesses 60-80 en km/h, fortes accélérations)

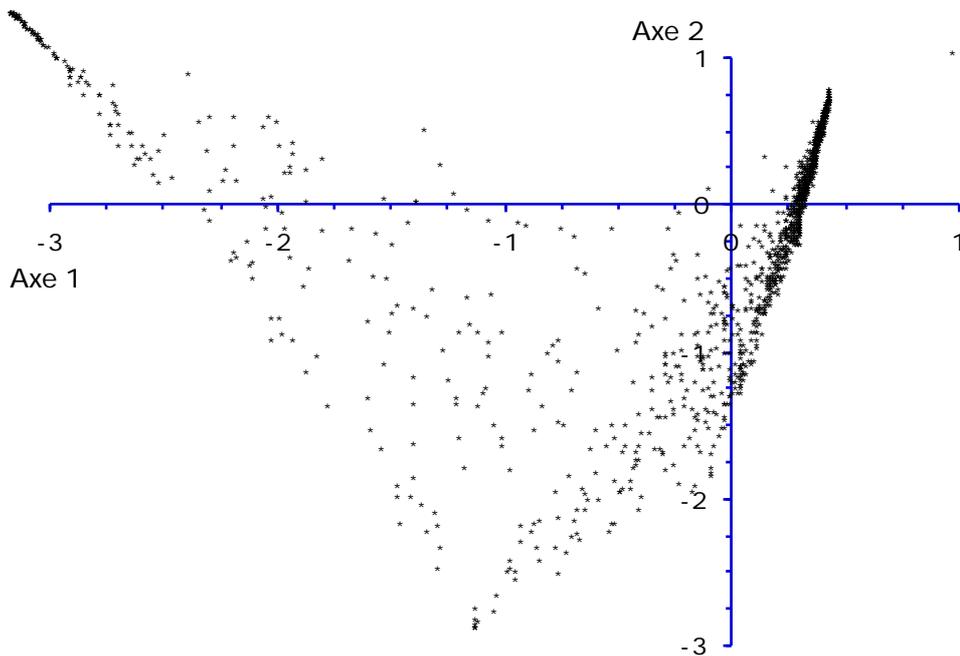


Figure 5.25 : Représentation du nuage des segments cinématiques dans le premier plan

5.3.4.4 - Classification et typologie des segments cinématiques

Une classification des segments a été réalisée en considérant les 8 premiers axes (80% de l'inertie), par croisement de 5 partitions autour de 10 centres (nuées dynamiques), suivie d'une classification ascendante hiérarchique sur les groupes d'au moins 5 individus. Cette classification

permet d'envisager des partitions en 4, 6 ou 9 classes (cf. annexe 7). On donne ci-après les caractéristiques de la partition en 4 classes (tableau 5.13).

	1 - trafic rapide	2- trafic moyen	3 - trafic intermédiaire	4 - urbain
% nombre	9,8	9,0	37,1	44,2
% distance	24,8	15,8	38,0	21,5
fréquence d'arrêts /km	0,02	0,08	0,39	2,30
durée relative à l'arrêt (%)	0,2	1,0	4,3	31,6
vitesse hors arrêts (km/h)	119	82	50	25
plage de vitesse (km/h)	77-182	49-116	28-101	2-103
accélération positive moyenne (m/s ²)	0,46	0,55	0,69	0,77
plage d'accélération (m/s ²)	0,3-1,5	0,3-1,5	0,3-1,7	0,3-2,0
Principales caractéristiques				
vitesse :	80 - 120 km/h	60 - 100 km/h	40 - 80 km/h	0 - 40 km/h
accélérations :	faibles	faibles	moyennes	moy. et fortes
arrêts :	peu d'arrêts	peu d'arrêts	peu d'arrêts	nombreux

Tableau 5.13 : Typologie des segments cinématiques obtenue par A.C.B. et classification sur la distribution croisée des vitesses et accélérations et sur un échantillon de 14000 segments (20% des trajets)

On obtient une première classe de segments à forte fréquence des vitesses élevées stables (100 km/h et plus), caractéristique d'une circulation de type autoroutière. Cette classe représente de l'ordre de 10% des segments et 25% du kilométrage. La seconde classe est caractérisée par les vitesses élevées stables comprises entre 60 et 100 km/h. Elle représente de l'ordre de 16% du kilométrage et est typique des conditions de voies rapides (vitesse moyenne de 82 km/h). On note ensuite une classe couvrant 38% des distances, parcourues à des vitesses intermédiaires (fortes fréquences des vitesses comprises entre 40 et 80 km/h, peu d'arrêts), puis une classe englobant les conditions urbaines (22% des kilométrages, arrêts nombreux).

Cette typologie en 4 classes décrit de manière fine le trafic rapide. On obtiendra une description plus détaillée des conditions urbaines en augmentant le nombre de classes de la partition. On observe une amélioration du discernement des niveaux de vitesse par des plages de variation plus contrastées.

5.3.4.5 - Incidence des données nouvelles et de la pondération des phases expérimentales

En utilisant le schéma défini précédemment, nous examinons l'incidence de la prise en compte de l'ensemble des données issues des projets de recherche DRIVE-modem et HYZEM, soit quelques 9600 trajets. D'autre part, on applique les règles de pondération (redressement) entre les véhicules et les phases d'expérimentation (cf. chapitre 6).

La pondération est moins aisée lors d'une A.C.B. que lors des A.C.P. précédentes. Dans ce cas particulier, les fréquences temporelles de la distribution croisée des vitesses et accélérations (et la durée d'arrêt) peuvent être pondérées en corrigeant simultanément la durée de route et la durée d'arrêt par le coefficient de pondération. De cette manière, on corrige la fréquence relative totale de chacun des segments et par là sa contribution à l'analyse.

On n'observe pas de différence fondamentale au niveau de l'analyse des correspondances ou de la classification. Tout au plus, on note quelques inversions dans l'ordre d'axes de rang élevés et à faible inertie, et des différences faibles sur les caractéristiques moyennes et les poids des différentes classes. Le tableau 5.14 permet de comparer les résultats obtenus au niveau de la typologie en 4 classes.

L'élargissement à l'ensemble données modifie très peu la répartition des classes. Les paramètres cinématiques moyens calculés par classe sont quasiment inchangés par rapport aux résultats obtenus sur l'échantillon de 20% des trajets.

	répartition en % kilométrage		vitesse moyenne hors arrêts (km/h)	
	échantillon de 20% des trajets	ensemble des données avec pondération	échantillon de 20% des trajets	ensemble des données avec pondération
conditions autoroutière	24,8	25,3	119	121
conditions routières	15,8	16,4	82	82
trafic intermédiaire	38,0	39,1	50	48
conditions urbaines	21,5	19,3	25	24

Tableau 5.14 : Incidence de l'élargissement à l'ensemble des trajets et de la pondération entre les phases expérimentales, sur la typologie des conditions de circulation

5.3.4.6 - Conclusion

Le schéma d'analyse proposé permet une amélioration sensible de la méthode de caractérisation des conditions de circulation, par l'analyse de segments plus homogènes en taille et par une description plus détaillée des profils de vitesse au travers de la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées.

Les segments cinématiques de longueur ajustée selon le niveau de vitesse permettent une meilleure description des conditions de circulation à un niveau local, et représentation équitable des différents types de circulation au niveau des analyses. La distribution en temps assure la pondération des segments.

Le schéma : segments cinématiques - distribution croisée des vitesses et accélérations - Analyse des Correspondances et classification sera retenu pour la suite des travaux.

5.3.5 - Amélioration de la caractérisation des conditions cinématiques

L'annexe 5 offre une illustration de l'amélioration de la caractérisation des cinématiques par l'utilisation de la distribution des vitesses et accélérations. Dans les systèmes d'axes: accélération positive et vitesse moyennes d'une part, et vitesse moyenne et longueur d'autre part, on a représenté les séquences cinématiques entre arrêts, identifiées par leur affectation lors des 2 schémas globaux : (1) A.C.P. - classification sur les indicateurs globaux incluant la taille de la séquence (durée, distance, valeurs moyennes et coefficients de forme des vitesses et accélérations) et (2) A.C.B. - classification sur la distribution croisée des vitesses et accélérations. La typologie

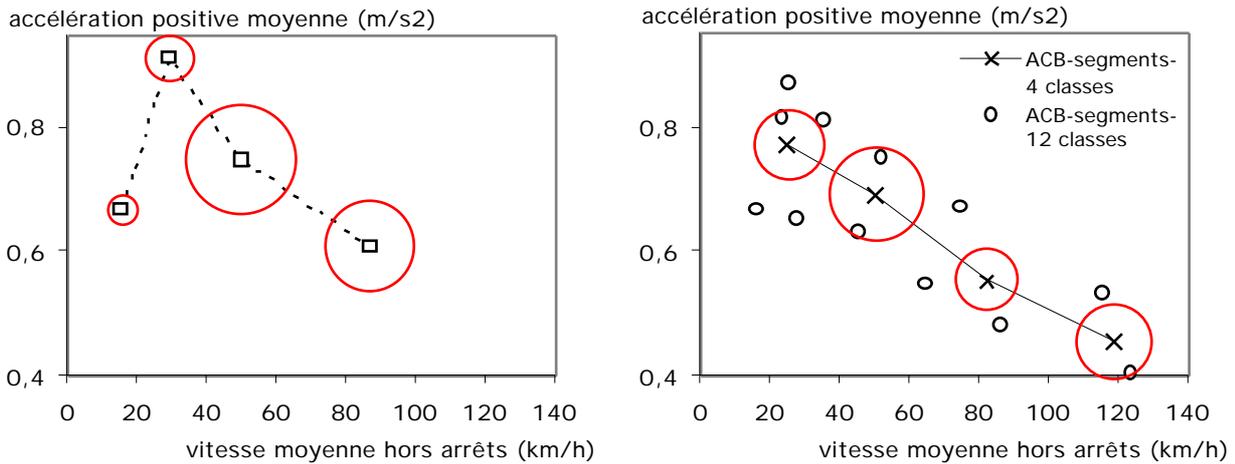


Figure 5.26 : Représentation des centres des classes et de leur poids en terme de kilométrage par :
 - Analyse en Composantes Principales des séquences entre arrêts et partition en 4 classes (à gauche)
 - Analyse des Correspondances Binaires des segments décrits par la distribution vitesses x accélérations instantanées et partition en 4 puis en 12 classes (à droite)

fondée essentiellement sur la taille (distance) dans le cas (1), se traduit par l'affectation de séquences à faibles vitesses à la classe autoroutière (D), tandis que le cas (2) caractérise plus nettement cette classe de séquences par un niveau de vitesse. Il n'est pas possible de comparer de cette manière les résultats obtenus sur les séquences et sur les segments.

On peut également comparer les schémas précédents en positionnant les centres des classes obtenues dans les axes : vitesse moyenne hors arrêts et accélération moyenne. L'analyse en composantes principales des séquences entre arrêts conduit à la constitution d'une classe de séquences longues dont la vitesse moyenne est de l'ordre de 80 km/h et conduit à une description plus précise des basses vitesses : on obtient deux classes urbaines contrastées en terme d'accélération (figure 5.26), mais de poids assez faibles. Cette précision est due au poids important accordé aux conditions urbaines au travers d'un très grand nombre de séquences mais aussi au rôle des variables d'accélération dans l'A.C.P.. Cette précision de description des conditions urbaines est obtenue au détriment de celles des conditions extra-urbaines.

L'analyse par la méthode des correspondances de segments cinématiques homogènes en taille et décrits par la distribution des vitesses et accélérations conduit à différencier plus radicalement les classes selon la vitesse et à obtenir une description moins centrée sur les conditions urbaines . On observe (figure 5.26, à droite) comment l'augmentation du nombre de classes (de 4 à 12) conduit à différencier les accélérations pour un même niveau de vitesse.

5.3.6 - Conclusions

La modélisation des conditions de circulation repose sur l'identification de variables les décrivant au travers du profil de vitesse. Une analyse systématique des variables utilisées antérieurement, de leur nature et pertinence permet de lister certaines précautions pour leur sélection: éviter les relations entre variables, privilégier des variables homogènes (en temps ou en

distance), calculées hors la phase d'arrêt si elles doivent décrire le mouvement, préférer des distributions détaillées plutôt que des indicateurs globaux, éviter les variables redondantes et instables (valeur maximale), et surtout garder à l'esprit ce qui doit être décrit : des conditions locales de circulation au travers de vitesses locales.

Le niveau d'analyse est la seconde composante de l'approche de modélisation des conditions de circulation. La séquence entre arrêts utilisée antérieurement n'est pas totalement satisfaisante : les séquences peuvent être très longues et ne décrivent pas dans ce cas les conditions locales.

Les résultats du schéma antérieur "A.C.P. - Classification - Séquences entre arrêts" reposent d'abord sur des variables décrivant la taille des séquences et dont les distributions sont très dissymétriques. On obtient un modèle liant vitesse et taille (durée, distance). La classification permet d'identifier un groupe très restreint de séquences longues. On réalise une typologie fondée d'abord sur la distance. Ce schéma conduit à affecter des séquences longues à vitesse moyenne ou basse à des conditions autoroutières et réciproquement. La caractérisation des conditions cinématiques n'est donc pas totalement satisfaisante.

Par ailleurs la séquence entre arrêts n'est pas une bonne représentation des conditions locales de circulation (sauf pour les séquences courtes). Enfin, la méthode implique une forte inégalité de représentation des différentes conditions de circulation : les conditions urbaines sont largement sur-représentées au travers d'un très grand nombre de séquences courtes (plus de 70% du nombre des séquences pour seulement 13% du kilométrage). Ceci conduit à une distorsion de la description en faveur de ces dernières.

La sélection de variables décrivant spécifiquement les vitesses et accélérations illustre les principaux problèmes précédents liés au concept de séquence entre arrêts. Une A.C.P. pondérée par la durée de route permet de compenser l'inégalité de représentation des conditions de circulation. On obtient alors une typologie contrastée en niveaux de vitesse et d'accélération accordant une importance plus grande aux conditions extra-urbaines.

Des segments cinématiques de taille homogène et leur description par la distribution croisée des vitesses et accélération (au lieu d'indicateurs globaux) améliorent la représentation et la finesse de description des conditions locales de circulation.

La caractérisation par Analyse des Correspondances Binaires suivie d'une classification de ces segments décrit de manière plus fine le trafic rapide : les conditions extra-urbaines sont mieux représentées par les segments et l'analyse oppose d'abord les classes de vitesses avant d'opposer les classes d'accélérations. Une description plus contrastée en accélération sera obtenue en augmentant le nombre de classes de la partition.

Les segments cinématiques de longueur ajustée selon le niveau de vitesse constituent une alternative satisfaisante à la représentation des conditions de circulation locales. Le schéma d'analyse : segments cinématiques - distribution croisée des vitesses et accélérations - Analyse des correspondances et classification sera retenu pour la suite des travaux.

5.4 - Modélisation des trajets - développements méthodologiques

On rappelle que la construction de cycles d'essai est envisagée à partir d'une part de la description des conditions de circulation comme élément déterminant des émissions de polluants, et d'autre part de la connaissance des usages et en particulier des trajets, correspondants au "profil de mission" d'un véhicule.

On analyse d'abord les différentes approches retenues antérieurement pour décrire et caractériser les trajets. On note que le principe du cycle correspondant à un trajet type n'a pas toujours été retenu.

Plusieurs approches peuvent être envisagées selon la description des trajets par :

- des paramètres macroscopiques (distance, durée, vitesse moyenne, etc.) ;
- la connaissance précise de la courbe de vitesse au travers de la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées, dont l'intérêt a été démontré au chapitre précédent ;
- les différents types de conditions de circulation identifiés lors de l'approche de modélisation précédente.

Le schéma d'analyse suit approximativement la même démarche que précédemment, c'est-à-dire que l'ensemble des trajets décrits par les variables est soumis à une analyse suivie de classification en vue d'établir une typologie.

On note que les usages peuvent être décrits à un niveau plus large que le trajet (description d'une journée d'utilisation, etc.). Ceci doit conduire à généraliser l'approche "trajet" retenue dans ce cadre, schématisée figure 5.27.

5.4.1 - Approches antérieures

Lors du développement du cycle réglementaire américain [Kruse, 1973], on identifie un trajet type par un "motif de déplacement" et sa responsabilité dans la dégradation de l'environnement à cause des circonstances météorologiques particulières à son occurrence (trajet domicile - travail, heure de pointe du matin, région de Los Angeles). Parallèlement on considère la longueur moyenne des trajets, sans doute mesurée par enquête, afin de déterminer la taille du cycle.

[Kenworthy, 1992] s'appuient plus largement sur la caractérisation de la ville et des modes de transports pour définir des itinéraires types sans référence à une notion de trajet ou de déplacement.

D'autres approches ne considèrent pas les trajets, mais des segments de voirie ou des itinéraires [Hughes, 1988] selon leur type. Ces segments sont éventuellement sélectionnés en fonction du volume de trafic ou selon leur représentativité par rapport au réseau national [Meier, 1986]. Dans ce dernier cas, les résultats unitaires (rapportés au kilomètre parcouru) sont utilisés conjointement avec les poids respectifs (en kilomètre ou en kilomètre x véhicule) des différents types de voiries.

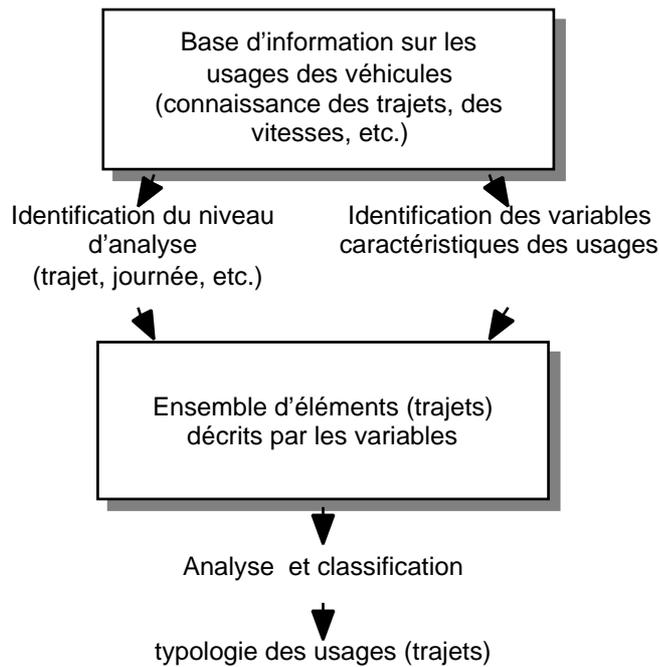


Figure 5.27 : Schéma de principe de la modélisation des usages des véhicules (et cas particulier des trajets)

Cette notion de représentativité est mal définie. [Effa, 1993] s'appuie également sur une notion de segments de voirie, définis entre intersections ou selon des changements de densité de circulation.

A la suite de l'identification de conditions types de circulation au travers de l'analyse des séquences entre arrêts, [Crauser, 1989] envisage l'analyse des trajets en tant que successions de séquences. En vue d'analyser l'enchaînement des types de conditions au sein d'un trajet, Crauser conclut à la non validité d'une approche de type probabiliste. Il propose une typologie à partir de l'analyse des fréquences des successions des différents types. Toutefois cette approche ne sera pas utilisée lors du développement des cycles de conduite.

A partir de ces développements méthodologiques, nous avons établi une typologie des trajets au travers des fréquences des conditions types de circulation, puis utilisé une approche probabiliste pour construire des cycles correspondant à une classe de trajet (probabilités des successions des différents types de séquences cinématiques) en [André 1991 et 1995].

Enfin, certains travaux ont porté particulièrement sur les conditions de démarrage [Kruse, 1973, Lansen, 1983], et de fin de trajet [Austin, 1993, EPA, 1993], notions qui suggèrent implicitement la caractérisation des usages par les trajets et également sur les autres "conditions" du trajet (période de la journée, durée de parking préalable, conditions climatiques).

Globalement, les approches précédentes se sont appuyées sur 5 éléments :

- l'identification préalable d'une catégorie de trajet, d'un motif de déplacement, des conditions externes, etc. :

- l'identification préalable de segments de voiries types (autoroute, voies urbaines, etc.) sélectionnés et décrits en particulier par le volume de circulation qu'ils représentent ;
- la taille des déplacements (distance parcourue) ;
- divers autres paramètres de description des trajets ;
- les conditions de circulation rencontrées.

5.4.2 - Propositions pour nos travaux

Les travaux de caractérisation des conditions de circulation nous conduisent naturellement à considérer plusieurs approches d'analyse des trajets :

1 - les trajets sont décrits par les fréquences des successions des différents types de conditions de circulation qui le composent. On dénombre les fréquences des transitions des segments du type 1 vers le type 2, du type 2 vers le type 3, etc. Cette solution permet de rendre compte de la chronologie des événements, dont on a évoqué l'importance par rapport aux émissions de polluants au chapitre 1. Par contre cette approche ne rend qu'imparfaitement compte de la taille des trajets par le nombre total de successions. Elle ne rend également pas compte de la nature précise des segments constitutifs, en terme de distribution des vitesses et accélérations par exemple. L'application de cette solution montre que l'analyse des seuls nombres des différents types de séquences, indépendamment des règles de successions, donne des résultats très similaires.

2 - les trajets sont décrits par la distribution des vitesses et accélérations instantanées. Cette solution présente l'avantage de suivre le même schéma que l'analyse des segments cinématiques.

3 - les trajets sont décrits par les fréquences temporelles (ou en nombres) des types de conditions de circulation. Cette solution ne rend pas compte de la chronologie des événements, mais elle décrit mieux la taille des trajets et des segments constitutifs. De plus cette solution s'appuie sur les résultats de caractérisation des types de conditions de circulation au travers de leur profil de vitesse.

Par ailleurs, il apparaît important de considérer la taille des trajets (la distance parcourue qui est l'objet du transport ou la durée qui en est une contrepartie) et la description du profil de vitesse. On remarquera qu'une approche basée sur les distributions temporelles (des vitesses et accélérations ou des types de conditions de circulation) intègre la prise en compte de la taille des trajets (au travers la durée).

Les 3 approches ci-dessus reposent sur l'analyse de fréquences (nombres ou durées). On utilise donc l'Analyse des Correspondances Binaires suivie d'une classification.

Les analyses qui suivent concernent l'ensemble des 9600 trajets enregistrés. Elles font suite à une double caractérisation des conditions de circulation en 4 et 12 classes décrite au chapitre 6 et utilisant la méthode développée du chapitre précédent (5.3), c'est à dire l'analyse suivie d'une classification des segments cinématiques de longueur variable, décrits par la distribution croisée

des vitesses et accélérations instantanées. On se référera au chapitre 6.2 et à l'annexe 4 pour une description des trajets analysés.

5.4.3 - Analyse des successions des types de segments

Le principal intérêt de l'analyse des successions des différents types de segments cinématiques (ou conditions de circulation) réside dans la prise en compte de la chronologie des différentes conditions de circulation au sein du trajet. Cette analyse dépend largement de la typologie de ces segments et du nombre de classes qui en résultent. Avec une description en 4 classes (urbain, suburbain, routier et autoroutier) et pour prendre en compte le début et la fin du trajet de manière à décrire chronologiquement l'ordre des segments, on considère 24 types de successions (cf. tableau 5.15).

Le nombre de successions croît considérablement avec le nombre de classes (168 cas pour une typologie en 12 classes). D'autre part, les effectifs de certaines successions sont souvent très faibles voire nuls. Ceci signifie qu'une description fine des conditions de circulation s'accommode mal de ce type d'analyse des trajets. Dans ce qui suit, la description en 4 classes est utilisée.

situation ou segment initial	situation ou segment final				
	urbain	suburbain	routier	autoroutier	fin du trajet
• début du trajet	01	02	03	04	-
• segment urbain	11	12	13	14	10
• suburbain	21	22	23	24	20
• routier	31	32	33	34	30
• autoroutier	41	42	43	44	40

Tableau 5.15 : Définition des successions des types de conditions de circulation pour une typologie initiale en 4 classes . Par convention de notation, le statut: 0 définit le début ou la fin de trajet.

On constate d'abord que la méthode ne permet que partiellement de rendre compte de la chronologie des successions. Les définitions ci-dessus permettent d'identifier les types du premier et du dernier segment. L'ordre des segments intermédiaires ne peut être identifié de manière sûre. Ainsi les enchaînements :

2 - 3 - 2 - 2 et 2 - 2 - 3 - 2

ne sont pas différenciés lorsque l'on dénombre les successions (2-2 = 1, 2-3 = 1, 3-2 = 1).

Pour des trajets impliquant un nombre important de segments, la description de la chronologie des conditions de circulation n'est donc pas correcte.

Les 9600 trajets sont décrits au travers de leur composition en 4 types de segments par les nombres des 24 successions possibles. Les nombres totaux des 4 types sont utilisés comme variables illustratives.

Éléments	Variables actives calculées sur l'élément (fréquences)	Pondération
trajets effectués par les différents véhicules en différentes villes	<ul style="list-style-type: none"> • nombres de successions d'un segment type i vers un segment type j 4 classes de segments types 24 successions possibles 	<ul style="list-style-type: none"> • pondération implicite par le nombre de segments du trajet
	Variables illustratives : <ul style="list-style-type: none"> • nombres de segments de type i (4 variables) • durées par classes de vitesse et par classes d'accélération 	

Tableau 5.16 : Tableau analysé - trajets décrits par les nombres de successions des différents types de segments cinématiques (ou conditions de circulation)

Lors d'une analyse des correspondances sur ces nombres de successions, les trois premiers axes, soit 41% de l'inertie, décrivent les nombres des types de segments bien que ceux-ci ne participent pas à la détermination des axes : l'axe 1 représente 20% de l'inertie. Il oppose les fortes fréquences des segments de type 4 (autoroutier) aux fréquences des segments de type 1 (urbain). Les corrélations de ces fréquences avec l'axe sont fortes (0,8 et 0,6). Les axes 2 et 3 sont respectivement caractéristiques des fortes fréquences des segments de type 2 et de type 3 (13 et 8% de l'inertie).

On observe bien dans le plan des axes 1-2 (figure 5.28) la proximité des fréquences de successions impliquant un type donné de segments (par exemple : 04, 40, 44, 43). On voit par là que les successions elles-mêmes jouent un rôle secondaire dans la description des trajets. Ceux-ci

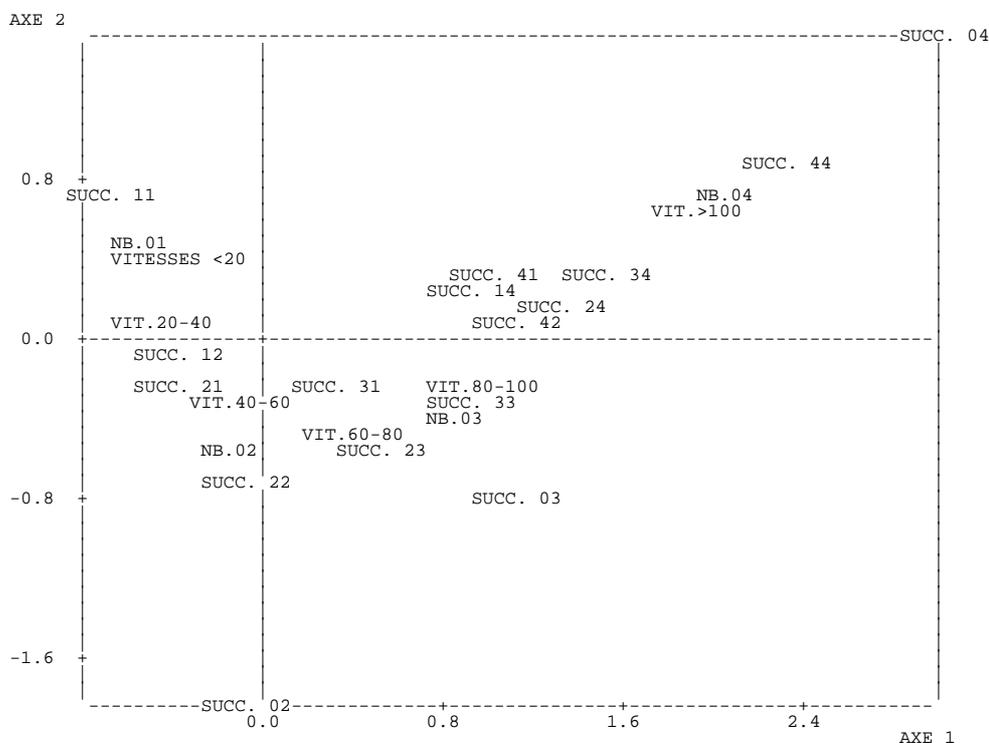


Figure 5.28 : Position des fréquences de successions des types de segments dans le plan principal (SUCC. ij: succession du type i vers le type j), des fréquences des types (NB0i) et des classes de vitesse VIT.: <20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 et + en km/h

sont structurés principalement par la fréquence des différents types de segments. On observe également un échelonnement en niveaux de vitesses suivant un arc.

Les trajets sont représentés par le nombre de successions de segments. Le taille des segments étant variable, la représentation des différents types de trajets n'est pas absolument équitable en terme de kilométrage : les trajets urbains qui comptent une forte proportion de segments urbains en moyenne plus courts sont de fait sur-représentés. D'autre part le dénombrement de la succession : dernier segment - fin de trajet fausse également cette représentation. Un trajet de 2 segments voit son poids porté à 3, tandis que les trajets longs sont moins sensibles à ce fait.

On note que cette représentation est encore plus déséquilibrée si les trajets sont analysés en nombre de séquences cinématiques entre arrêts, beaucoup plus hétérogènes en taille. Un trajet urbain compte alors un nombre très élevé de successions de séquences, tandis qu'un trajet autoroutier n'en compte que quelques unes.

On conclut donc que ce schéma ne satisfait qu'imparfaitement l'objectif de description de la chronologie. Il ne permet sans doute pas de considérer une description fine des conditions de circulation par un nombre élevé de classes et enfin les différents types de trajets ne sont pas également représentés lors des analyses.

5.4.4 - Analyse du profil de vitesse

En raison de l'hétérogénéité des trajets en terme de conditions de circulation, il semble peu pertinent d'analyser les trajets par la description de la distribution croisée des vitesses et accélérations. Ceci conduit à "moyenner" les résultats obtenus au niveau des segments cinématiques. Il est cependant possible qu'une structure de l'espace des trajets ressorte d'une analyse fondée sur cette description.

Une A.C.B. sur les trajets décrits par les fréquences en durée d'arrêt et de la distribution des vitesses et accélérations permet d'identifier les axes principaux comme suit :

- le premier axe est caractérisé par les fréquences des vitesses élevées (42% de l'inertie) ; la

Éléments	Variables actives calculées sur l'élément (fréquences en fonction du temps)	Pondération
trajets effectués par les différents véhicules en différentes villes	<ul style="list-style-type: none"> • durée à l'arrêt • fréquences en durée des classes de la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées <ul style="list-style-type: none"> - classes de vitesse: <20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 et + en km/h - classes d'accélération: <-0.6, -0.6 à -0.2, -0.2 à +0.2, 0.2 à +0,6 et + en m/s² 	<ul style="list-style-type: none"> • pondération implicite par la durée totale du trajet
	Variables illustratives : <ul style="list-style-type: none"> • durées par classes de vitesse et par classes d'accélération • durées par segments types (4) 	

Tableau 5.17 : Tableau analysé - trajets décrits par la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées

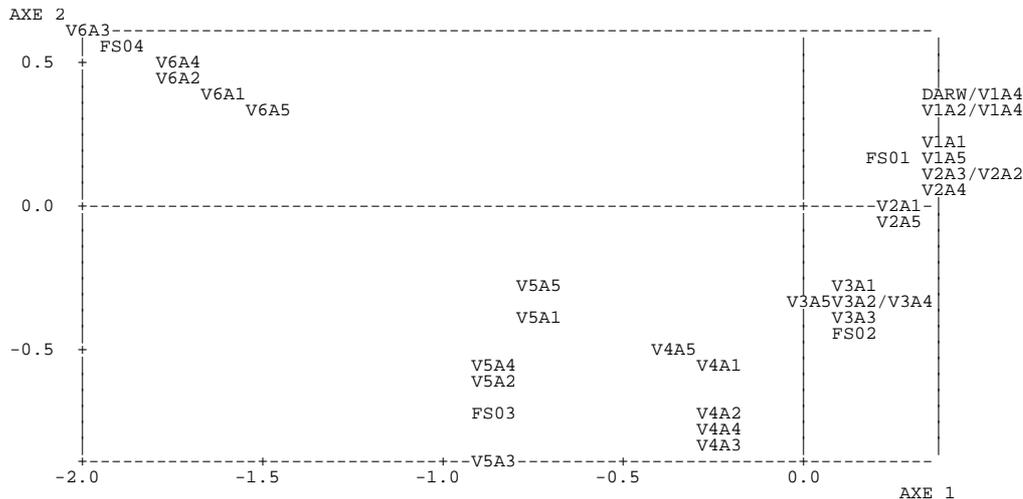


Figure 5.29 : Position des fréquences de la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées (6 classes de vitesses 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100 et +, 5 classes d'accélérations <-0.6, -0.6 à -0.2, -0.2 à +0.2, 0.2 à 0.6, 0.6 et +, numérotées ViAj) et des fréquences des types de segments en 4 classes (FS0k)

fréquence des segments de type 4 (autoroutiers) est bien représentée sur cet axe.

- le second axe est caractérisé par les fréquences des vitesses intermédiaires (60-80 km/h) et représente 17% de l'inertie. On note sur cet axe une forte probabilité de segments de type 3 (routiers)
- l'axe 3 porte les fréquences des vitesses plus faibles (40-60 km/h) et représente 9% de l'inertie,
- l'axe 6 traduit l'occurrence simultanée de très faibles vitesses (mais sans arrêt) et de vitesses intermédiaires (4% de l'inertie),
- les axes 4, 5 et 7 traduisent occurrence d'accélérations élevées pour une tranche de vitesse donnée (7, 6 et 3% d'inertie).

Dans le plan principal constitué par les 2 premiers axes (figure 5.29), on note l'échelonnement des niveaux de vitesses de la droite vers la gauche et la proximité des fréquences correspondant à une même classe de vitesse (indépendamment des classes d'accélérations). Ceci montre le rôle secondaire des accélérations dans ce plan. Le positionnement dans ce plan des fréquences des 4 principaux types de segments (FS0i, exprimées ici en fréquences temporelles) présente une similitude avec l'analyse des successions.

Cette approche conduit à des résultats similaires à ceux obtenus sur la même distribution des vitesses et accélérations au niveau des segments cinématiques.

5.4.5 - Analyse des fréquences des types de segments

On a vu précédemment que l'analyse des successions est compliquée par une description fine des cinématiques (grand nombre de classes). Or il apparaît nécessaire d'envisager une description fine des cinématiques au travers d'un nombre de classes supérieur à 4, ne serait ce que pour accéder à une description des conditions urbaines au moins aussi détaillée qu'avec l'approche basée sur les séquences cinématiques.

Éléments	Variables actives calculées sur l'élément (fréquences en fonction du temps)	Pondération
trajets effectués par les différents véhicules en différentes villes	fréquences en durée des 12 types de conditions de circulation identifiées par l'analyse des segments cinématiques	• pondération implicite par la durée totale du trajet
	Variables illustratives : • durées par classes de vitesse et par classes d'accélération	

Tableau 5.18 : Tableau analysé - trajets décrits par leur composition selon les différents types de conditions de circulation identifiés par analyse des segments cinématiques

A la suite de la caractérisation des conditions de circulation au travers de la description des segments par la distribution des vitesses et accélérations, nous proposons d'analyser les trajets au travers des fréquences temporelles des types de segments cinématiques. Cette approche ne permet pas de prendre en compte la chronologie des événements, mais elle s'appuie sur une meilleure description des conditions de circulation. La chronologie des événements et la distribution des vitesses et accélérations seront prises en compte comme critère de construction des cycles.

L'analyse des conditions de circulation nous conduira à retenir une typologie en 12 classes (cf. chapitre 6), que nous utilisons ici pour la description des trajets, et dont on donne la définition en tableau 5.19. Chacun des types de segments représente entre 3 % (grandes routes et autoroutes) et 15 % (urbains) des durées de route.

On trouvera en annexe 8 les principaux résultats liés à l'analyse et à la caractérisation des trajets.

5.4.5.1 - Analyse des Correspondances Binaires appliquée aux trajets

On analyse les trajets décrits par les fréquences temporelles des 12 conditions-types de circulation, c'est à dire leur composition en les 12 types de segments cinématiques. L'A.C.B. identifie d'abord les conditions autoroutières, par les fréquences des segments de types 10 et 12

Classes	type de conditions de circulation	vitesses - vitesses hors arrêts	Fréquences observées en %
1/12	urbain congestionné, forte durée à l'arrêt	10-26 km/h	14,6
2/12	urbain congestionné moyen	16-24 km/h	15,1
3/12	urbain congestionné, faibles vitesses stables	13-17 km/h	7,5
4/12	urbain fluide, vitesses stables	26-28 km/h	7,8
5/12	urbain fluide, vitesses instables	32-36 km/h	15,1
6/12	routier, vitesses instables	50 km/h	9,0
7/12	routier moyen à vitesses limitées	45 km/h	8,2
8/12	routier, vitesses stables	65 km/h	4,7
9/12	grandes routes, vitesses instables	75 km/h	6,6
11/12	grandes routes	86 km/h	3,6
10/12	autoroutes, vitesses instables	115 km/h	2,9
12/12	autoroutes	124 km/h	5,1

Tableau 5.19 : Définition des classes-types de conditions de circulation

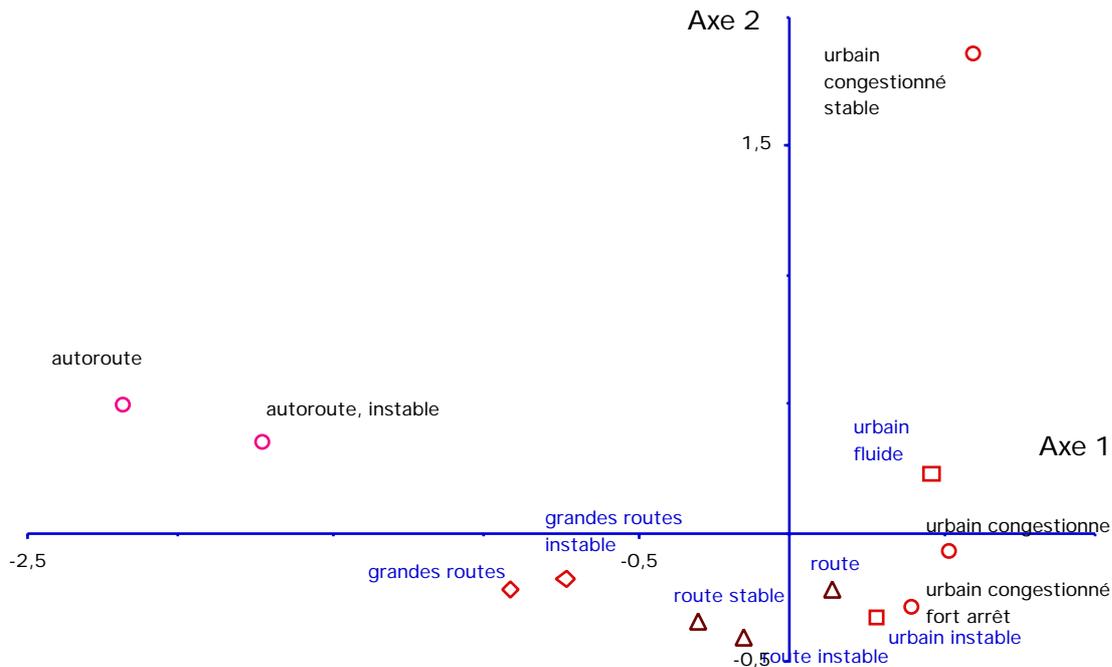


Figure 5.30 : Position dans le premier plan principal des fréquences temporelles des types de conditions de circulation, lors de l'Analyse des Correspondances Binaires des trajets

(autoroutiers) et les vitesses élevées sur l'axe 1 (21% de l'inertie, figure 5.30).

L'axe 2 porte les fréquences des segments de type 3 (urbains à faible vitesse) et des vitesses faibles (13% de l'inertie). Les fréquences des segments urbains des autres types sont portés par les axes suivants : segments de type 1 (urbains à forte durée à l'arrêt) opposés aux segments routiers sur l'axe 3 (12% d'inertie), de type 2 (urbain moyen) sur l'axe 4 (10%), de type 4 (urbain fluide) sur l'axe 5 (9%).

Les axes suivants associent ou opposent les différents types de segments : sur l'axe 6 (8% d'inertie), les segments de type 5 (urbain instable) s'opposent aux types 2 et 11 (congestionné et routier) ; sur l'axe 7, les segments des types 12 et 5 (autoroute et suburbain) sont opposés aux types 9 et 10 (routiers) ; etc.

Ce schéma présente dans le premier plan un échelonnement des vitesses tout à fait similaire à celui obtenu avec les précédents. L'histogramme des valeurs propres des axes ne présente pas de décrochement net (sauf au premier axe). Nous conserverons l'ensemble des axes pour la classification.

5.4.5.2 - Classification et caractérisation des trajets

Selon une démarche analogue à celle utilisée pour caractériser les conditions de circulation, on établit une typologie des trajets par classification automatique sur les onze axes. On croise plusieurs classifications par nuées dynamiques (ici 5) autour de 10 noyaux sélectionnés aléatoirement. On effectue une classification ascendante hiérarchique sur les classes non vides résultant de ce croisement. Les classes de poids très faibles (moins de 0,01%, soit une durée

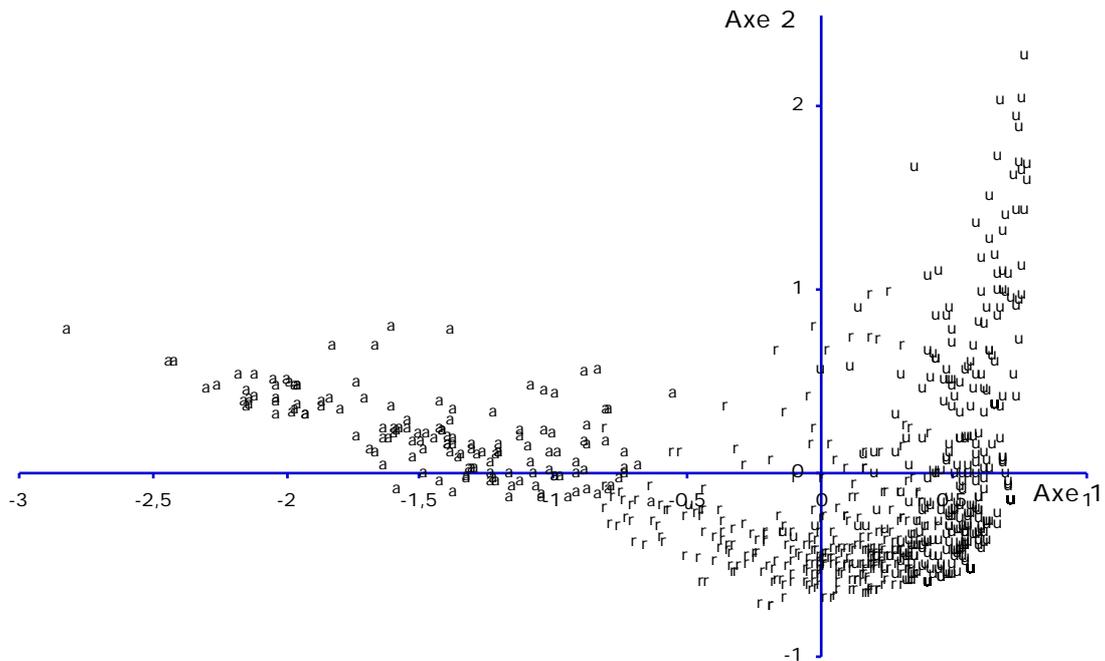


Figure 5.31 : Représentation des trajets et de la partition en 3 classes dans le plan principal 1-2 (a : trajets autoroutiers, r : trajets routiers, u : trajets urbains)

inférieure à 10 mn) sont réaffectées aux classes les plus proches. Des paramétrages différents conduisent à des histogrammes des indices de niveau qui peuvent varier, mais qui laissent envisager une typologie en trois classes puis des partitions fines aux nombres de classes variables, le nuage des trajets étant également assez continu (Figure 5.31).

La partition obtenue oppose 3 catégories de trajets correspondant aux trajets de type autoroutier de longue distance, à vitesse élevée et comptant peu d'arrêt, aux trajets routiers ou suburbains de distance intermédiaire et à vitesse plus limitée et aux trajets urbains de courte distance à faible vitesse et forte proportion et fréquence d'arrêts (cf. tableau 5.20). On donne également la

	1 - trajets "autoroutiers"	2 - trajets "routiers"	3 - trajets "urbains"	global
% nombre	2,8	27,5	69,7	100,0
% distance	27,6	44,2	27,9	100,0
longueur moyenne (km)	82,0	13,6	3,4	8,4
plage de distances (km)	5-463	0-175	0-64	0-463
durée moyenne (mn)	53,0	17,3	9,0	12,5
fréquence d'arrêts /km	0,08	0,42	1,72	0,69
durée relative à l'arrêt (%)	4,8	11,6	26,7	18,4
vitesse hors arrêts (km/h)	97,5	53,4	30,8	49,5
plage de vitesse (km/h)	59-140	28-94	2-75	2-140
accélération positive moy. (m/s ²)	0,68	0,76	0,77	0,76
plage d'accélération (m/s ²)	0,42-1,35	0,43-1,48	0,31-1,74	0,31-1,74

Tableau 5.20 : Typologie des trajets obtenue par A.C.B. sur les fréquences des différents types de segments cinématiques qui les composent

répartition en nombre et en kilométrage parcouru de ces 3 catégories.

5.4.6 - Incidence du schéma retenu sur la typologie des trajets

On a évalué précédemment 3 modes de description des trajets : le dénombrement des successions des segments types, les fréquences des vitesses et accélérations, et les fréquences des types de segments. Afin de mesurer l'incidence du choix de l'une ou l'autre de ces descriptions, on compare les résultats des typologies des trajets en 3 classes, obtenues à la suite des analyses précédentes (tableau 5.21).

On remarque que l'incidence du choix de la description est considérable : il peut conduire à des variations de plus de 50% du poids des classes 2 et 3 (en kilométrage). On note que les trajets autoroutiers sont identifiés précisément par les trois typologies.

Les typologies fondées sur les fréquences des vitesses et accélérations et sur les fréquences des types de segments sont relativement similaires : elles reposent toutes deux directement ou indirectement sur l'analyse des vitesses et accélérations. Celle obtenue à partir des successions s'écarte plus. C'est celle qui décrit le moins finement les cinématiques et pour laquelle on a une distorsion de représentation des différents types de trajets au travers des nombres de successions.

Description des trajets :	successions de 4 types de conditions cinématique	distribution croisée vitesse x accélération	fréquences temps des 12 types de conditions cinématiques "
distribution en % nombre			
trajets autoroutiers	2,8	2,5	2,8
trajets routiers	48,5	20,8	27,5
trajets urbains	48,7	76,7	69,7
distribution en % distance			
trajets autoroutiers	28,5	26,4	27,6
trajets routiers	57,9	40,5	44,2
trajets urbains	13,6	33,1	27,9
vitesses moyennes hors arrêts			
trajets autoroutiers	97	99	98
trajets routiers	48	57	53
trajets urbains	26	32	31

Tableau 5.21 : Comparaison des typologies des trajets obtenues par A.C.B. suivie de classification des trajets selon leur description

5.4.7 - Conclusion

Un schéma d'analyse sur le dénombrement des successions des types de conditions cinématiques ne permet pas simplement une description fine des conditions de circulation sauf à accroître le nombre de classes et de combinaisons entre les classes. Essentiellement justifié par l'approche chronologique des trajets, il ne satisfait qu'imparfaitement cet objectif et ne permet pas une représentation équitable des différents types de trajets.

L'analyse de la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées va à l'encontre du principe d'hétérogénéité des conditions de circulation au sein d'un trajet. Elle permet cependant

une caractérisation immédiate des trajets en terme de vitesses et accélérations, indépendamment de l'analyse des conditions cinématiques au travers des segments.

L'analyse des fréquences temporelles des types de conditions cinématiques ne reflète pas la chronologie de ces conditions, mais elle permet de prendre en compte l'hétérogénéité des trajets et d'établir une typologie correctement pondérée par la durée, et finalement assez proche de celle qui est obtenue par l'analyse de la distribution des vitesses et accélérations.

5.5 - Construction de cycles

Les étapes précédentes ont permis :

- la caractérisation en classes types des conditions de circulation, au travers de l'analyse des courbes enregistrées de vitesse et d'accélération en fonction d'une temps,
- la classification des trajets en groupes, différenciés selon la fréquence des différents types de conditions cinématiques rencontrées,
- la constitution de statistiques descriptives de ces trajets (distributions des durées et distances, probabilités de successions des séquences, etc.).

L'ensemble de ces résultats doit être mis en oeuvre pour la construction de cycles d'essais, représentatifs de chacun des groupes de trajets et de l'ensemble des conditions cinématiques.

Deux approches ont été envisagées pour cette construction de cycles, dont on décrit les grandes lignes.

5.5.1 - Approche microscopique

La première approche consiste à sélectionner chaque segment cinématique selon certains critères de représentativité, à ajouter les segments les uns aux autres jusqu'à reconstituer un trajet, lui-même satisfaisant d'autres critères d'appartenance à sa catégorie (cf. figure 5.32).

Cette approche a été mise en oeuvre lors de la construction des cycles européens DRIVE-modem [André, 1995] à partir des séquences cinématiques. Dans ce cas particulier, la juxtaposition des séquences était relativement aisée, puisque celles-ci débutent et finissent à vitesse nulle (figure 5.33).

Dans le cas des segments cinématiques, cette approche nécessite pratiquement de sélectionner un segment selon son niveau de vitesse initiale en fonction du niveau de vitesse final du segment précédent. Il peut alors être nécessaire d'opérer un ajustement des vitesses à la transition. [Cohen, 1994] propose un ajustement par interpolation, tandis que [Effa, 1993] suggère de décaler la courbe de vitesse du segment, pour ne pas introduire de conditions artificielles. On peut également minimiser la tolérance admise pour l'écart de vitesse entre les 2 segments. A l'extrême, il se peut que seul le segment ayant effectivement succédé au précédent satisfasse cette condition.

L'approche proposée et appliquée aux séquences entre arrêts est probabiliste. Pour une classe de trajets, on établit la distribution des durées et distances réellement observées. Selon le cas, durée et distance du ou des cycles à construire sont déterminées en fonction de cette distribution de valeurs probables. On peut également considérer un sous-ensemble de trajets proches du centre de la classe.

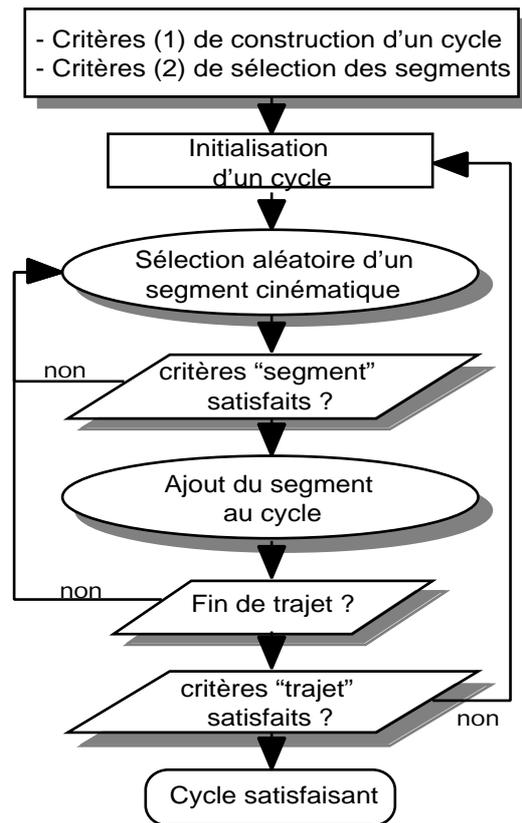


Figure 5.32 : Schéma de principe de la construction de cycles à partir des segments cinématiques

Pour cette classe de trajet, on établit également les probabilités de succession des différents types de séquences et les distributions de différents paramètres descriptifs. Initialement, on a décrit les séquences par leurs coordonnées principales.

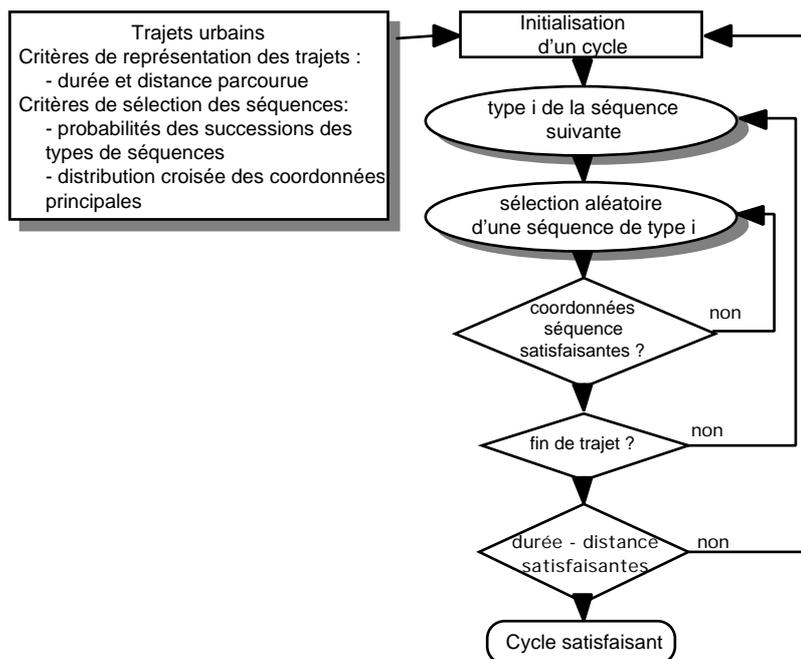


Figure 5.33 : Schéma de principe de la construction mis en oeuvre lors de la construction des cycles DRIVE-modem [André, 1991]

Le type de séquence (de 1 à N selon le nombre de classes ou fin de trajet) est déterminé aléatoirement, conformément aux probabilités des successions observées pour la catégorie de trajets. Pour un type déterminé, on sélectionne aléatoirement une séquence représentative dans le fichier d'origine : lors de l'approche initiale, on tentait de reproduire la distribution croisée des coordonnées factorielles de la classe de séquences. Plus simplement, on peut minimiser la distance de la séquence au centre de la classe correspondante.

La construction du cycle, séquence après séquence, est répétée jusqu'à ce que l'enchaînement des séquences sélectionnées satisfasse la durée et la distance du cycle déterminées précédemment.

Pour optimiser la représentativité des séquences retenues, on peut minimiser la somme des distances des séquences aux centres des classes. On peut également construire un ensemble de cycles, les positionner dans l'espace des trajets et sélectionner celui dont la distance au centre de la classe considérée est minimale.

Par cette approche, le cycle généré est une succession de séquences réellement enregistrées, non issues du même trajet et correspondant à des véhicules et comportements de conduite variés. L'approche permet donc de décrire une certaine diversité de comportements.

5.5.2 - Approche macroscopique

Techniquement réalisable, l'approche précédente est cependant relativement complexe à mettre en oeuvre, notamment lorsque les segments considérés ne débutent ou ne se finissent pas à vitesse nulle. Une approche plus simple n'impose pas la reconstitution segment après segment de cycle - trajet. Elle consiste en la sélection des trajets les plus représentatifs à tout point de vue, c'est à dire tant au niveau de leur description que de la description des segments qui les composent. Cette approche consiste finalement à minimiser une somme de critères (figure 5.34).

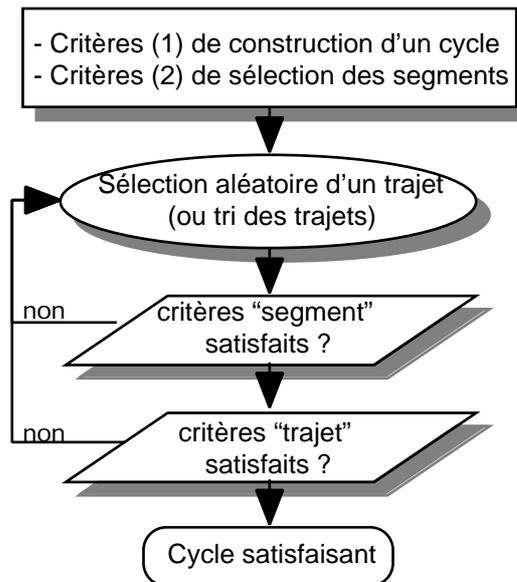


Figure 5.34 : Schéma de principe de la construction de cycles à partir des trajets

Les étapes d'analyse précédentes fournissent des indicateurs précieux pour positionner les segments et les trajets : les distances aux centres et les coordonnées selon les axes principaux.

On tente donc de minimiser simultanément la distance du trajet - cycle au centre de sa classe et la somme des distances des segments aux centres de classe respectifs. Cette somme est relativisée par le nombre de segments afin de ne pas favoriser la sélection de trajets courts comptant peu de segments.

Cette approche multi-critères permet de satisfaire d'autres aspects non considérés jusqu'ici. On calcule la distance du khi-2 entre la distribution des successions des types de conditions cinématiques au sein du trajet et celles qui sont calculées pour la classe. En minimisant cette distance, on sélectionne un trajet dont la chronologie des conditions cinématiques est proche de celle de la classe. De la même manière on calcule l'écart à la distribution des vitesses et accélérations afin d'assurer la représentativité selon ces paramètres.

Les critères de représentativité précédents n'étant pas comparables, il s'agit de les minimiser simultanément, ou en accordant une priorité à chacun.

Dans ce cas, un cycle généré est un trajet réel correspondant à un seul véhicule et un seul comportement de conduite, proche d'un comportement moyen. Cette approche ne permet donc pas de représenter une diversité de comportements en un seul cycle.

5.6 - Conclusions et autres aspects

La construction des cycles repose sur quatre phases principales : l'observation des conditions de circulation, la modélisation des conditions de circulation, la modélisation des trajets et la construction de cycles à partir des résultats des analyses précédentes. Ce schéma repose sur plusieurs hypothèses qu'il importe de garder à l'esprit : la représentativité de la base de données initiale, la vitesse d'un véhicule en tant que mesure des conditions locales de circulation, le cycle de conduite en tant que représentation des usages et dans ce cas des trajets.

Un schéma de modélisation des conditions de circulation a été défini. Il s'appuie sur l'analyse des correspondances binaires de la distribution croisée des vitesses et accélérations des segments cinématiques, suivie d'une classification. Par rapport aux autres approches, on a montré l'amélioration apportée par ce schéma en terme de qualité de caractérisation des conditions cinématiques.

Ce schéma sera appliqué à des segments cinématiques du profil de vitesse enregistré au cours d'un trajet. Ces segments sont déterminés de manière à ce que leur taille (durée, distance) soit relativement homogène, afin de décrire avec équité de représentation les différentes conditions de circulation. En raison de la grande stabilité des conditions cinématiques autoroutières et de la nécessité de décrire plus finement les conditions urbaine, on adopte une définition des segments dont la taille est dans une certaine mesure proportionnelle à la vitesse de circulation.

On s'appuie sur la typologie des conditions cinématiques pour caractériser les trajets. La méthode : analyse des correspondances binaires suivie d'une classification est appliquée aux trajets, décrits par les fréquences des différents types de segments cinématiques qui les composent. La construction de cycles d'essai résulte de la combinaison des deux analyses précédentes : on minimise la somme des critères de représentativité des segments et des trajets (distances aux centres des classes issues des typologies) et de la chronologie de succession des différents types de conditions cinématiques au sein du trajet.

On a mentionné la nécessité de prise en compte d'autres aspects des conditions de test, en particulier la définition des conditions de démarrage (caractérisation du démarrage moteur froid) et la prise en compte des capacités des véhicules. Les méthodes mises en oeuvre (analyses et classification) permettent d'étudier ces aspects. La projection sur les résultats des catégories de véhicules (véhicules fortement, moyennement ou faiblement motorisés) ou des groupes de trajets ou de segments démarrés moteur froid, tiède ou chaud doit permettre de déterminer si ces catégories présentent des différences significatives quant aux conditions de circulation.

Les bases méthodologiques ainsi définies, le chapitre 6 sera consacré à l'application de cette méthode à la construction d'un ensemble de cycles représentatifs européens.

Chapitre 6 - Construction de cycles d'essai représentatifs

6.1 - Introduction

Les expérimentations ont été menées dans le cadre de deux projets de recherche européens : le projet DRIVE³ - modem⁴ ([André, 1989], [Joumard, 1992]) dont l'objectif était la modélisation des émissions de polluants et de la consommation des voitures en circulation urbaine en fonction des paramètres instantanés de fonctionnement, et le projet HYZEM⁵, du programme de recherche BRITE / EURAM⁶ dont l'objectif est la modélisation de motorisations nouvelles associant moteurs thermique et électrique (véhicules hybrides).

6.2 - Description des expérimentations

Les expérimentations initiales ont été menées conjointement en Grande-Bretagne, Allemagne et France, respectivement par le Transport Research Laboratory (T.R.L.) à Londres, le TÜV-Rheinland à Cologne et l'INRETS en France, selon un protocole expérimental conforme aux principes énoncés au chapitre 4. Un échantillon de 60 véhicules a été constitué (20 dans chacun des trois pays). Les expérimentations ont été menées sur environ une année, au moyen de 6 systèmes d'acquisition et sur 6 villes européennes: Londres et Derby en Grande-Bretagne, Cologne et Krefeld en Allemagne, Marseille et Grenoble en France, villes retenues pour décrire une certaine variété des conditions urbaines :

- la situation géographique : Marseille (1 million d'habitants) comme ville du sud, Grenoble (600,000 habitants) pour sa situation en zone montagneuse,
- la nature des agglomérations : Londres en tant que très grosse agglomération (par sa superficie et sa population : 6 800 000), tandis que Derby est une petite ville de province.

En Allemagne, Cologne et Krefeld ont été sélectionnées comme villes caractéristiques (par leur taille, situation et topographie) de RFA. Elles sont situées en Nordrhein-Westfalen.

Les véhicules ont été choisis pour décrire les parcs en circulation dans chacun des pays selon leur popularité, leur âge, le kilométrage, la technologie (cylindrée, puissance, motorisation essence, diesel, injection, catalyseur, etc.), c'est à dire que l'échantillon respecte les distributions de ces paramètres dans les parcs respectifs de véhicules (cf. [André, 1989] et annexe 6).

La sélection des véhicules s'est faite par tirage aléatoire d'adresses dans le fichier national des immatriculations, de propriétaires des modèles retenus, dans les zones concernées, puis selon

³ DRIVE: Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe, programme de recherche de la CEE - DG XIII

⁴ modem : Modelling of Emissions and Fuel Consumption in Urban Areas - DRIVE Project V1053.- avec la participation de TRRL (UK), TÜV-Rheinland (FRG), CEDIA (B), INRETS (F)

⁵ HyZEM: European Development of Hybrid Vehicle Technology approaching efficient Zero Emission Mobility

⁶ BRITE/EURAM : programme de recherche de la CEE - DG XII

certains critères de représentativité et de diversité: âge, sexe, situations professionnelle et familiale, usages du véhicule (kilométrage annuel). Pour l'Allemagne, la sélection s'est faite par le canal de l'Association des Automobilistes Allemands.

Les voitures privées ont été équipées des capteurs et matériel d'acquisition de données puis utilisées ensuite normalement par leur propriétaire durant 1 mois. Deux des modèles allemands (Renault 21 et Audi 100) font exception, pour lesquels un seul véhicule du type a été équipé puis confié à des conducteurs privés.

En complément, vingt véhicules ont été expérimentés à Athènes en Grèce par le Laboratoire de Thermodynamique Appliquée (L.A.T.) de l'Université de Thessalonique, en s'appuyant sur les mêmes principes méthodologiques que précédemment, mais avec d'autres systèmes d'acquisition. L'échantillon de véhicules a été constitué en vue de décrire les véhicules en circulation à Athènes. Quelques enregistrements supplémentaires ont été effectués sur véhicules électriques en France par Peugeot S.A., en vue de comparer leurs vitesses et accélérations avec celles des véhicules thermiques. Deux véhicules ont été instrumentés et conduits par des techniciens de la société sur des itinéraires déterminés en centre et périphérie de La Rochelle et Paris.

6.2.1 - Bilan des Expérimentations

Les expérimentations représentent 1900 journées de suivi de 77 voitures, soit de l'ordre de 24 journées par véhicule testé. Au total, 10000 trajets et 89000 km ont été correctement enregistrés représentant et 2200 heures de conduite (soit en moyenne 130 trajets, 1200 km et 29 heures de route par voiture). Les principaux paramètres de fonctionnement des véhicules sont mesurés à chaque seconde : vitesse, régime de rotation du moteur, températures ambiante et du moteur, consommation de carburant, ainsi que l'utilisation de certains auxiliaires de conduite (freins, essuie-glaces, éclairage, etc.) pouvant apporter une information sur les conditions d'utilisation. Ceci représente une quantité considérable d'information sur les conditions de conduite et un volume non moins important de données à analyser. Ceci représente surtout une base d'information sans équivalent à ce jour en Europe sur les conditions de fonctionnement des

	nombre de véhicules	durée de suivi (jours)	nombre de trajets	durée de conduite (h)	distance (km)
DRIVE-modem					
Allemagne	19	406	3 102	639	32 800
France	21	603	3 241	670	24 600
Grande-Bretagne	18	363	1 910	385	16 000
HYZEM					
Athènes	19	564	2146	499	15 900
Ensemble	77	1 936	10 399	2 192	89 300
HYZEM					
Véhicules électriques	2	-	14	8	190
total	79	1936	10 413	2 200	89 500

Tableau 6.1 : Bilan des expérimentations DRIVE-modem et HYZEM

véhicules.

Par définition, un trajet débute et se termine avec la mise sous ou hors contact du véhicule. Une temporisation permet de ne pas comptabiliser des démarrages manqués. Les trajets sont datés.

6.2.2 - Préalables

6.2.2.1 - Pondération

Compte tenu de l'inégalité de répartition des données entre les 4 phases d'expérimentations, une pondération est appliquée pour équilibrer les nombres de véhicules entre phases (variant de 18 en Grande-Bretagne à 21 en France) et le poids des véhicules selon les durées de leur suivi (selon chapitre 5.2.). On surpondère les phases à faible nombre de véhicules et les véhicules suivis sur de plus courtes périodes. On limite cependant les effets de cette surpondération par un coefficient maximal de 2, afin de ne pas trop extrapoler des données enregistrées sur des durées trop courtes. Ces règles conduisent à limiter le poids des véhicules suivis moins d'une dizaine de jours (nombre de journées de suivi variant de 20 à 29 selon les phases). On n'applique pas d'autre redressement entre les populations de véhicules des différents pays ou les catégories de véhicules.

6.2.2.2 - Corrections

Les premières analyses ont permis d'identifier une inconsistance des accélérations des données enregistrées à Athènes, due à une précision plus faible de la mesure des vitesses (le plus souvent supérieure à 3 km/h contre 0.7 km/h environ pour les autres fichiers). Le calcul des accélérations à partir des vitesses (sur 3 secondes) conduit à des valeurs beaucoup plus élevées. Afin de tenir néanmoins compte de ces données, une correction a été effectuée, par un lissage des vitesses mesurées. Le degré de lissage pour rétablir des accélérations cohérentes a été établi à partir de la comparaison des caractéristiques de conduite (vitesses, durée et fréquence des arrêts) et des valeurs d'accélérations selon les villes d'expérimentation. La similitude d'Athènes et Marseille du point de vue des caractéristiques de circulation (les plus mauvaises, cf. annexe 6, tableaux A6.2 et A6.3) a permis d'établir la nécessité d'un lissage sur 4 points des vitesses, tandis qu'un lissage sur 5 points atténuerait beaucoup trop les accélérations.

6.2.3 - Usages des véhicules

Les paramètres de fonctionnement étant mesurés et enregistrés chronologiquement à chaque seconde, leur intégration de la mise sous contact à l'arrêt nous permet d'analyser de manière très fine les trajets effectués (longueurs, durées, vitesses, mais aussi nombre d'arrêts aux intersections, vitesses maximales atteintes, accélérations, etc.). La connaissance de la date et de l'heure de ces trajets permet d'observer la répartition temporelle de ces trajets, et nous renseigne sur les fréquences quotidiennes des usages (nombre d'usages, durées et distances journalières).

6.2.3.1 - Usages journaliers

Les utilisations de la voiture sont fréquentes pour de courtes distances. La fréquence moyenne quotidienne des usages est de l'ordre de 5, pour des durées de l'ordre de 1 heure, et 43 kilomètres parcourus. Les fréquences plus élevées mesurées pour les données allemandes pourraient s'expliquer partiellement par le biais méthodologique introduit par le prêt de véhicules équipés (modèles R21 et Audi 100), au lieu de l'équipement des véhicules des particuliers (l'extrapolation conduit à un kilométrage annuel certainement trop élevé pour l'Allemagne). Les fréquences d'utilisation mesurées sur les données françaises sont cohérentes avec celles mesurées lors des expérimentations antérieures (cf. tableau A6.4, annexe 6).

Les valeurs mesurées pour Athènes sont nettement plus faibles, et s'expliquent sans doute par les restrictions de circulation des véhicules durant la semaine, (qui conduisent souvent à l'alternance d'utilisation entre plusieurs véhicules). Les valeurs beaucoup plus homogènes obtenues par calcul sur les journées incluant au moins une utilisation du véhicule semblent confirmer cette hypothèse (cf. tableau A6.4 en annexe 6).

La voiture n'est pas utilisée également tous les jours : pour environ 20% des journées de suivi il n'y a pas eu d'utilisation. 30% des journées comptent de 1 à 4 utilisations, 31% de 5 à 8, et enfin 18% des journées ont compté plus de 8 utilisations de la voiture. La fréquence de non-utilisation est beaucoup plus élevée pour les données d'Athènes (37%).

Les distances parcourues chaque jour sont inférieures à 40 kilomètres (mais non nulles) pour 47% des journées; elles sont comprises entre 40 et 80 km pour 19%, et supérieures à 80 km pour 13% (cf. figure 6.1). Les distances journalières de plus de 100 km concernent de l'ordre de 9% des journées. Des variations très importantes sont mesurées entre les différents conducteurs.

6.2.3.2 - Caractéristiques moyennes des trajets

Les caractéristiques moyennes des trajets varient selon de nombreux facteurs et sont assez

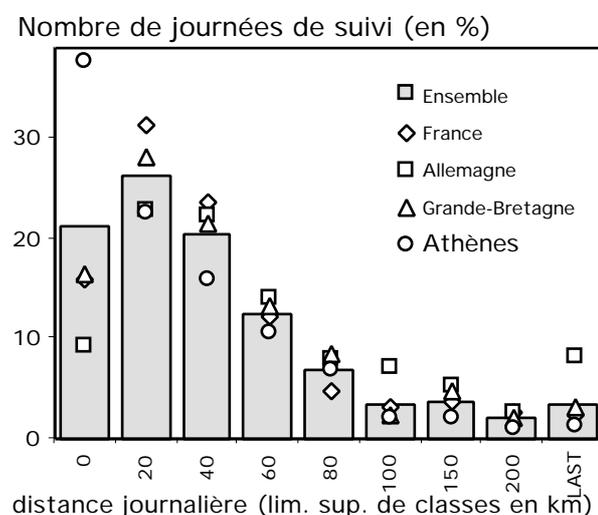


Figure 6.1 : Distribution des journées de suivi selon les distances journalières parcourues

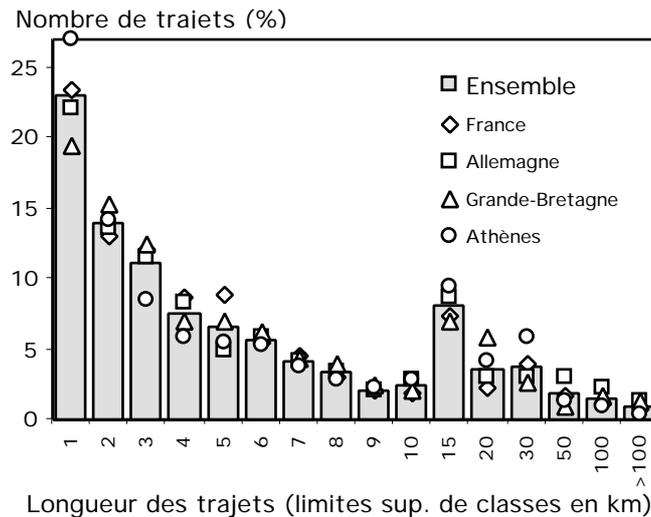


Figure 6.2 : Distribution des trajets selon leur longueur

différentes selon les différents pays (cf. tableau A6.5, annexe 6). La longueur moyenne des trajets varie de 7 à 10 km, les vitesses moyennes de 32 km/h à Athènes à 50 km/h pour l'Allemagne. Les durées moyennes des trajets sont très voisines, de l'ordre de 12 à 14 minutes. La fréquence des arrêts intermédiaires (intersections, congestion, etc.), qui rend partiellement compte de la difficulté de circulation varie de 0.5 à 1.2 arrêts au kilomètre (maximum observé à Athènes).

Les valeurs moyennes mesurées lors des expérimentations sur véhicules électriques correspondraient à un usage urbain (basse vitesse, fréquence des arrêts élevée), mais les longueurs et durées des itinéraires ne correspondent pas à des trajets réels.

On observe une grande similarité des distributions des longueurs de trajets, avec en particulier des nombres importants de trajets très courts : 23% des trajets ne dépassent pas 1 kilomètre (de 19 à 27% selon les phases expérimentales) et 13% ne dépassent pas 500 mètres. Globalement, 1 trajet sur 2 (48% en moyenne, de 47 à 50% selon les phases expérimentales) ne dépasse pas 3 km. Les trajets de plus de 10 km représentent 20% du nombre total (17 à 22% selon les pays) et 4% seulement (de 3 à 6%) dépassent 30 km.

6.2.3.3 - Autres caractéristiques

Les données enregistrées ont permis des analyses plus détaillées des conditions d'utilisation véhicules (selon les zones géographiques, les horaires et jours de la semaine et les conducteurs) et des conditions de fonctionnement des moteurs (régime moteur, utilisation des rapports de boîte de vitesse, conditions thermiques de démarrage, etc., cf. [André 1991a, et 1995] et [Kyriakis, 1997])

6.3 - Typologie des conditions de circulation

Selon les principes établis au chapitre 5, on considère l'ensemble des données enregistrées comme une image représentative des usages et conditions de circulation (moyennant un redressement entre les différents véhicules et phases d'expérimentation). On analyse les conditions de circulation au travers des courbes de vitesses, par segments cinématiques dont la taille varie avec la vitesse (les conditions de circulation étant plus stables à haute vitesse qu'à basse, cf. chapitre 5.3). On obtient un ensemble de 69 000 segments, décrits par la distribution temporelle croisée des vitesses et accélérations instantanées et la durée à l'arrêt. Ces segments sont soumis à une analyse des correspondances binaires suivie d'une classification.

6.3.1 - Analyse des correspondances et classification

On obtient (cf. chapitre 5.3.4 et annexe 7) une description des profils de vitesse au travers d'axes factoriels opposant les classes de vitesse, d'axes opposant les conditions de circulation stables aux vitesses instables et enfin des axes opposants les niveaux d'accélération (faibles, moyennes, fortes). Les 10 premiers axes représentent 85% de l'inertie.

A partir d'une classification sur ces 10 axes, on envisage une partition des segments. Une partition en 4 ou 6 classes serait justifiée par l'histogramme des indices de niveau (annexe 7.2), mais on a privilégié une partition plus fine en 12 classes, afin d'obtenir une meilleure description des cinématiques (description sur laquelle s'appuie ensuite la modélisation des trajets). Compte tenu de la réaffectation lors des itérations de consolidation (qui contribuent à améliorer la qualité de la partition en augmentant l'inertie interclasses), les partitions en 4 et 12 classes ne sont pas imbriquées (alors qu'elles le sont au niveau du dendrogramme). On n'a donc pas rigoureusement correspondance entre une classe principale et les sous-classes.

6.3.2 - Typologie des conditions de circulation

Les caractéristiques moyennes et le poids (en kilométrage) des 4 classes de la première partition sont donnés en annexe 7, tableaux A7.1 et A7.2. Compte tenu des variables les caractérisant, ces classes correspondent approximativement :

- aux conditions de circulation urbaine (classe 1) : importance des arrêts (en nombre et durée), vitesses faibles (0 - 40 km/h), fréquentes accélérations,
- aux conditions suburbaines ou routières (classe 2) : faible durée à l'arrêt, vitesses intermédiaires (40 - 80 km/h),
- aux conditions de circulation sur grandes routes (classe 3) : vitesses élevées (60 à 100 km/h) stables
- et aux conditions autoroutières (classe 4) : vitesses élevées stables (100 km/h et plus).

Une description plus détaillée des conditions de circulation est envisagée au travers d'une partition en 12 classes (annexe 7, tableaux A7.3 et A7.4).

classes		vitesses moyennes :		durée à	écart-type des	caractéristiques
		globale	hors arrêts	l'arrêt	accélérations	
		(km/h)	(km/h)	(%)	instantanées (m/s ²)	
typologie en 4 classes						
1	urbain	16	24	34	0,71	
2	routier	46	48	5	0,65	
3	grandes routes	80	82	1,4	0,46	
4	autoroutes	121	121	0,2	0,28	
typologie en 12 classes						
1		10	26	61	0,79	forte durée à l'arrêt
2	urbain congestionné	16	24	33	0,75	
3		13	17	20	0,52	vitesses faibles
4	urbain fluide	26	28	7	0,56	
5		32	36	9	0,80	vitesses instables
6		49	52	7	0,72	vitesses instables
7	routes	44	45	4	0,51	
8		64	65	2	0,41	vitesses stables
9	routes	73	75	3	0,64	vitesses instables
11	principales	86	86	0,4	0,29	
10	autoroutes	115	116	0,7	0,47	vitesses instables
12		124	124	0,1	0,18	

Tableau 6.2 : Comparaison des 4 et 12 classes types de conditions de circulation

On observe en figure 6.3 comment cette partition contribue à une déclinaison des cinématiques en niveaux d'accélération et fréquences ou durées des arrêts par rapport à la partition en 4 classes. Les classes diffèrent selon leur niveau de vitesse mais également selon leurs accélérations (cf. tableau 6.2). On obtient :

- 3 classes correspondant aux conditions de circulation en zone urbaine congestionnée ; respectivement une classe à forte durée à l'arrêt et basse vitesse moyenne, une classe intermédiaire et une classe caractérisée par des vitesses faibles stables,
- 2 classes correspondant aux conditions urbaines fluides et qui se différencient en terme de stabilité des vitesses,
- 3 classes correspondant à une circulation routière, échelonnées en niveaux de vitesse et contrastées en terme d'accélération,
- 2 classes correspondant à la circulation sur grandes routes, à vitesses stables ou instables,
- et 2 classes de circulation sur autoroutes, contrastées en terme de stabilité des vitesses.

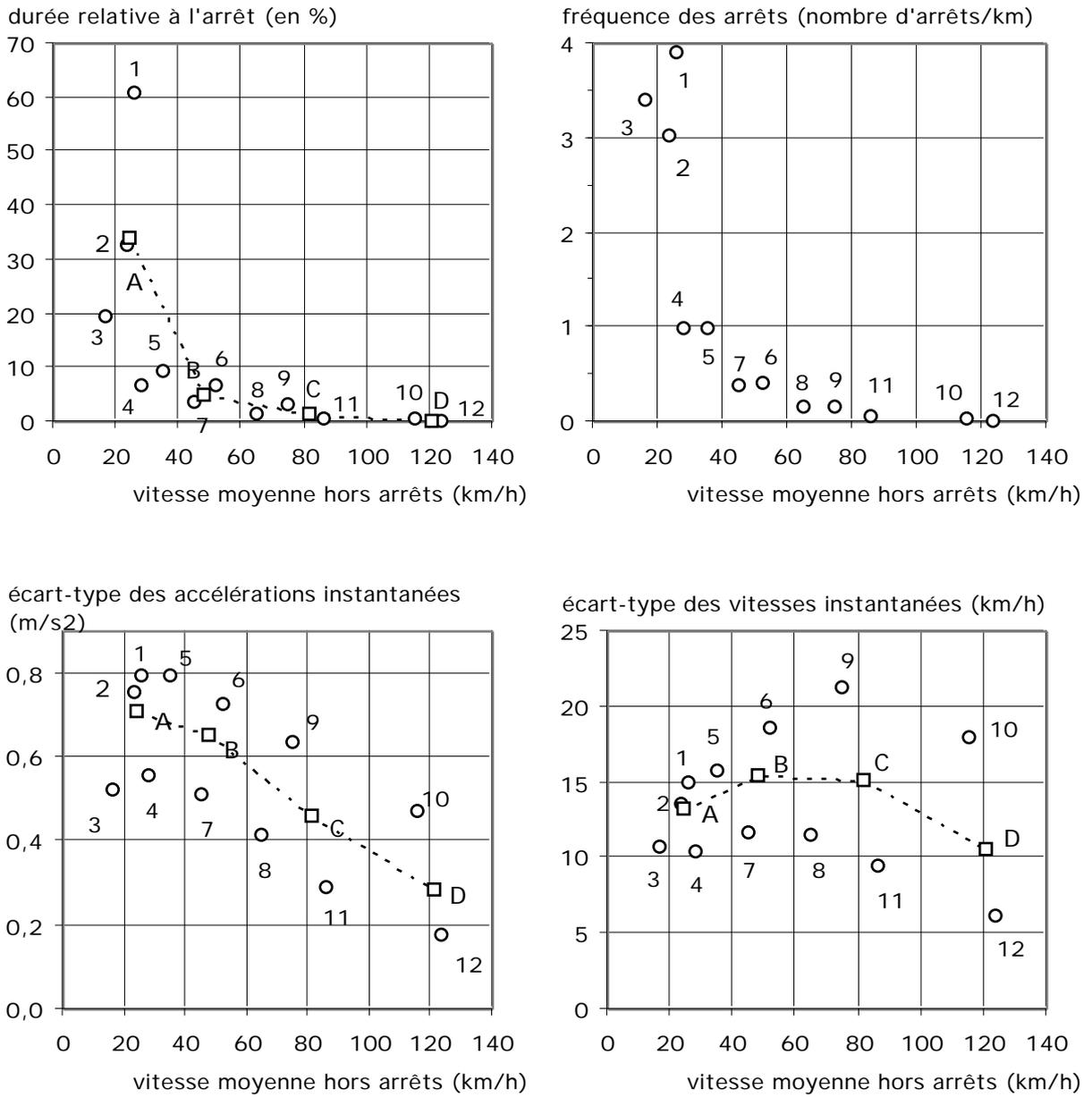


Figure 6.3 : Comparaison des centres des 4 classes principales (A à D) et des 12 sous-classes selon leur vitesses, accélérations et fréquences et durées des arrêts

6.4 - Typologie des trajets

On analyse les 9600 trajets en fonction des conditions de circulation rencontrées, au travers de leur constitution (en durée) selon les 12 différents types de segments cinématiques identifiés précédemment. Une illustration de la composition de trajets routier et autoroutier en les différentes conditions-types de circulation est donnée en figure 6.4. On utilise les méthodes et outils décrits au chapitre 5.4.5.

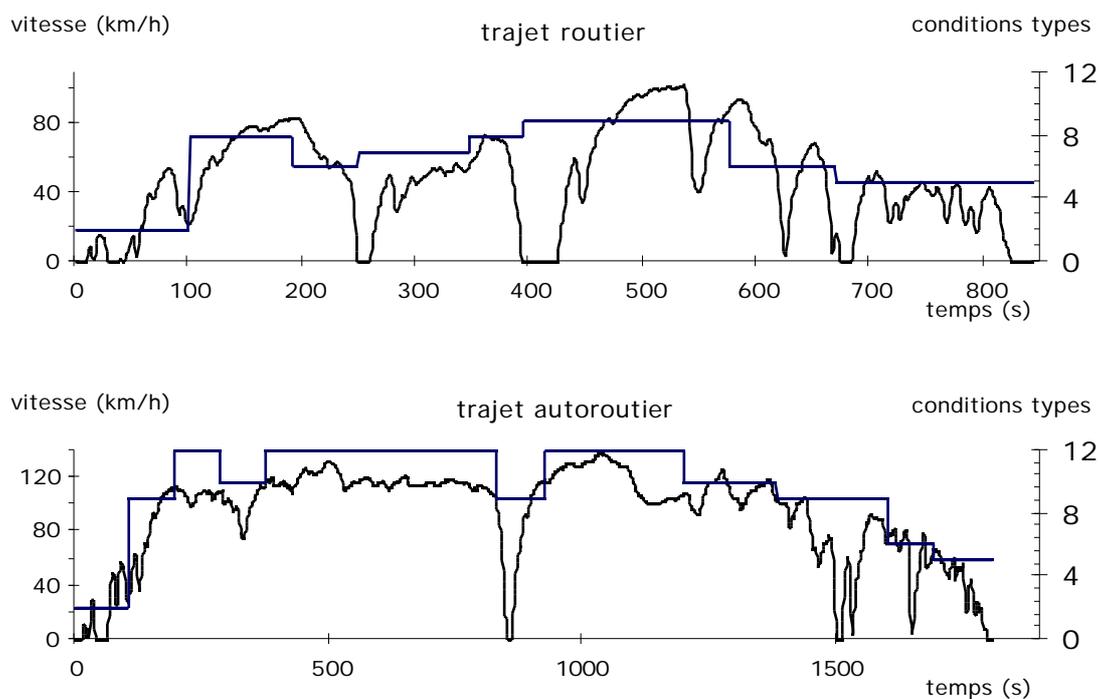


Figure 6.4 : Exemples de trajets et leur description selon les conditions de circulation types (graduées de 1 à 12)

6.4.1 - Analyse et classification

Les principaux résultats de l'Analyse et de la classification sont donnés au chapitre 5.4.5 et en annexe 8.

A l'issue de la classification, on envisage une partition principale en 3 classes. Afin d'obtenir une description en 2 niveaux de finesse, on réalise des partitions en 2 ou 3 sous-classes de chacune des classes principales. Les partitions sont de ce fait rigoureusement imbriquées.

6.4.2 - Typologie des trajets en 3 classes

Les caractéristiques des 3 classes de la partition principale sont données en tableau 6.3 et plus en détail en tableaux A.8.1 et A.8.2, annexe 8. Les classes diffèrent d'abord selon leur composition en segments cinématiques et sont également contrastées en terme de taille des trajets (les distances moyennes sont respectivement 82, 14 et 3 km), de vitesse (vitesses moyennes : 93,

	trajets autoroutiers	trajets routiers	trajets urbains	globalement
nombre de trajets (%)	3	27	70	
part du kilométrage (%)	28	44	28	
caractéristiques moyennes des trajets **				
longueur moyenne (min.)				
	82	13,7	3,4	8,4
vitesse moyenne (km/h)	93	48	23	40
durée à l'arrêt (en %)	5	12	27	18
nombre d'arrêts au km	0,1	0,4	1,7	0,7
Typologie en 3 classes obtenues à partir de l'analyse des séquences cinématiques entre arrêts				
nombre de trajets (%)	3,4	35,1	61,4	7672 trajets
part du kilométrage (%)	30	39	31	66 463 km
caractéristiques moyennes des trajets **				
durée moyenne (min.)				
	56,7	13,1	9,0	12,1
longueur moyenne(km)	75,8	9,6	4,4	8,7
vitesse moyenne (km/h)	80,2	44,0	29,3	43,1

Tableau 6.3 : Caractéristiques moyennes des 3 classes de trajets et comparaison avec celles obtenues en [André, 1995] par analyse des séquences cinématiques entre arrêts

48 et 23 km/h, vitesses hors arrêts : 98, 54 et 31 km/h) et de fréquence des arrêts. Les trajets de type autoroutier représentent 28% du kilométrage, tandis que les trajets routiers et urbains représentent respectivement 44 and 28% des distances parcourues.

Cette partition est finalement assez proche de celle obtenue avec la méthode utilisée pour le développement des cycles urbains en [André, 1995] (cf. tableau 6.3). Ceci démontre que le schéma méthodologique global : "décomposition en éléments cinématiques - typologie de ces éléments - analyse et typologie des trajets" est finalement assez robuste en ce qui concerne la description des trajets, même lorsque la caractérisation des conditions de circulation s'appuie sur les séquences cinématiques et l'analyse en composantes principales, dont les failles ont été mises en évidence au chapitre 5 .On observe cependant quelques écarts et notamment au niveau des trajets autoroutiers, dont la vitesse moyenne est plus élevée par la nouvelle approche. Ceci confirme l'amélioration de l'identification des trajets.

6.4.3 - Typologie des trajets en 8 classes

On construit des partitions en 2 ou 3 sous-classes de chacune des classes précédentes (la pertinence de la partition étant donnée par l'évolution du critère inertie interclasses / inertie totale). On obtient globalement une "partition" secondaire en 8 classes de trajets, dont les caractéristiques sont données en annexe 8, tableau A8.3 et A8.4. Les trajets autoroutiers sont éclatés en deux classes qui diffèrent principalement par leurs accélérations (cf. figure 6.4). Les trajets routiers se séparent en trois classes, dont l'une est caractérisée par des longs trajets incluant des conditions de circulation de type autoroutière. Les trajets urbains sont partagés en trois classes, l'une présentant des fortes fréquences d'arrêts (classe 1/3 avec 36% de la durée à l'arrêt), tandis que les deux autres diffèrent par leur niveau de vitesse moyenne (24 et 19 km/h) et leur taille (3.3 et 1.9 km). Ces 8 sous-classes représentent entre 3 et 20 % du kilométrage.

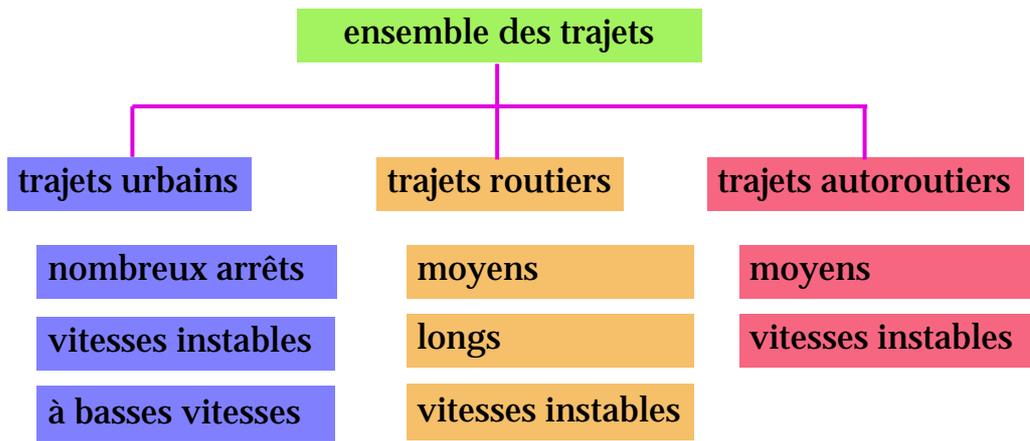


Figure 6.5 : Description des trajets en 3 classes principales et 8 classes secondaires

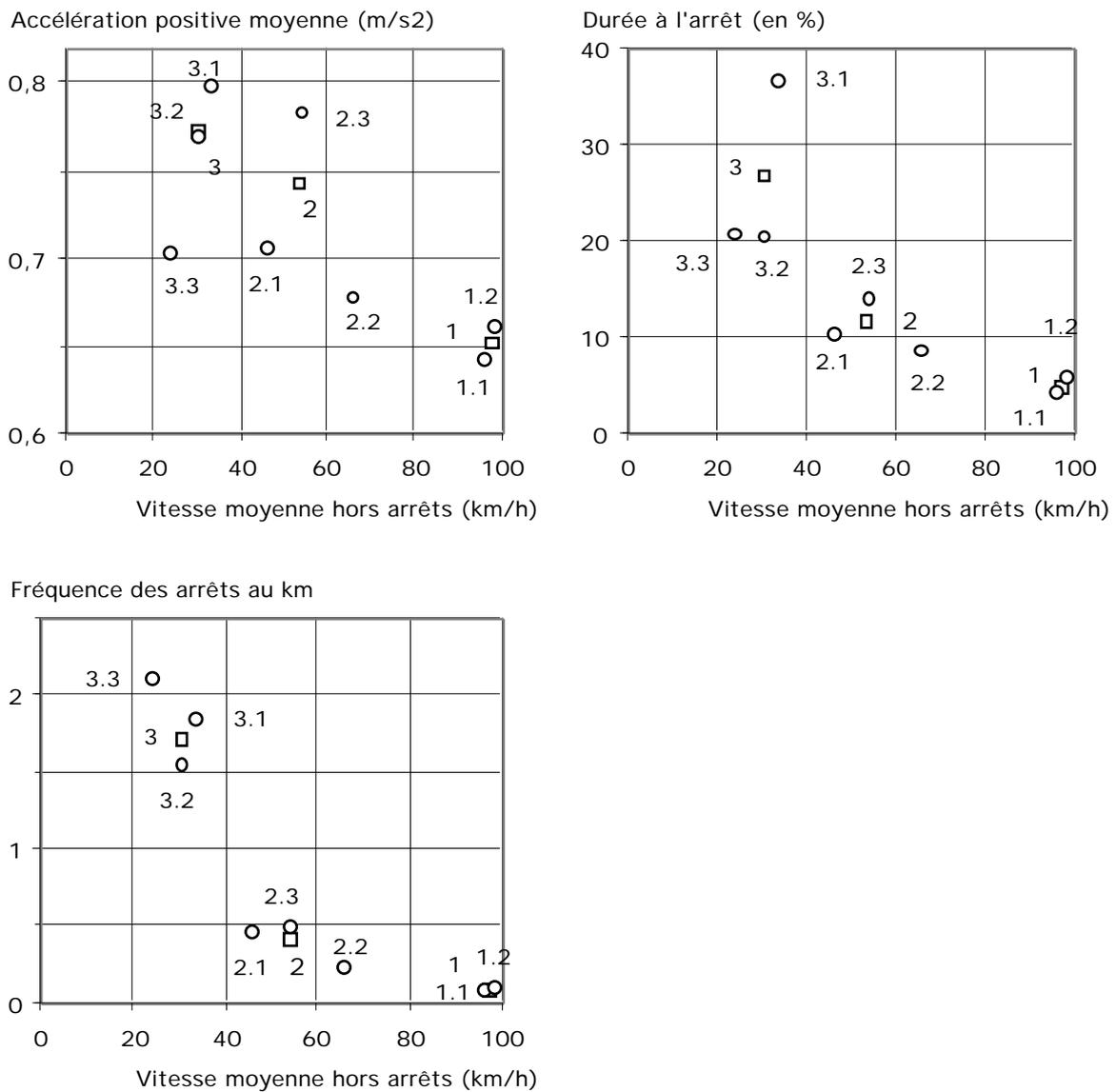


Figure 6.6 : Comparaison des classes (1, 2 et 3) et sous-classes (1.1, 1.2, 2.1, etc.) de trajets selon la vitesse moyenne, la durée et fréquence des arrêts et l'accélération moyenne

6.5 - Cycles de conduite

Des partitions des trajets précédentes, on construit 2 ensembles de cycles décrivant les trajets et les conditions de circulation rencontrées.

6.5.1 - Méthode et critères de construction

Les cycles types ont été construits par sélection de trajets minimisant les critères de représentativité des trajets et des segments cinématiques (cf. chapitre 5.5). Cette méthode est satisfaisante en raison du grand nombre de trajets composant chaque classe.

Les critères suivants ont été considérés et minimisés :

- la somme des distances aux centres des classes des segments d'un trajet rapportée au nombre de segments (minimale lorsque chacun des segments présente une distribution vitesse - accélération proche de celle obtenue pour la classe de segments à laquelle il appartient) ;

- la distance du trajet au centre de sa classe (minimale lorsque la composition du trajet en les classes de segments types est proche de la distribution de la classe de trajets correspondante),

- la distance du Khi-2 entre la distribution des vitesses et accélérations du trajet et la distribution marginale calculée sur la classe des trajets à laquelle il appartient.

Ces 3 critères permettent de trier les trajets. Un trajet est finalement sélectionné pour satisfaire les paramètres suivants calculés sur la classe de trajets : les vitesses moyennes et hors arrêts, la fréquence des arrêts, la longueur et la durée (sauf pour les cycles autoroutiers limités à 30 minutes environ compte tenu des contraintes de durée de test sur banc d'essai).

6.5.2 - Cycles

On a construit 2 partitions des trajets en 3 et 8 classes. On pourra ainsi, selon le degré souhaité de précision de description, utiliser les ensembles de trois ou de 8 cycles correspondants à ces partitions. Afin de limiter le nombre total de cycles (conditionnant la durée de test) et de permettre de considérer alternativement l'une ou l'autre des partitions, les 3 cycles principaux ont été sélectionnés pour représenter également la sous-classe secondaire à laquelle ils appartiennent. Ceci est d'autant plus justifié que ces cycles sont bien positionnés dans leur sous-classe respective. On décrit ci-après le degré d'adéquation des cycles en comparant les caractéristiques des cycles et des classes de trajets correspondantes. Les cycles sont illustrés en annexe 9.

6.5.2.1 - Partition en 3 classes

Trois cycles principaux ont été construits pour décrire les conditions d'utilisation et de circulation :

- un cycle urbain de 3,5 km, de vitesse moyenne 22 km/h, avec 26% de la durée à l'arrêt,

- un cycle routier de 11 km, à 48 km/h, avec 11% de la durée à l'arrêt,
- un cycle autoroutier, limité à 46 km parcourus à une vitesse moyenne de 92 km/h.

Les caractéristiques de ces cycles (cf. tableau 6.4) sont très proches de celles des classes correspondantes, sauf la taille du cycle autoroutier.

Les distributions des vitesses et accélérations de ces cycles et celles des classes de trajets sont comparées en annexe 9. On n'observe pas une similitude parfaite de ces distributions, car une classe de trajets - de par la quantité d'utilisation des véhicules qu'elle représente - inclut nécessairement une plus grande variété de conditions qu'un seul trajet. Il serait d'ailleurs probablement artificiel de vouloir reproduire fidèlement la distribution de la classe en la durée limitée d'un seul cycle.

6.5.2.2 - Partition en 8 classes

L'addition de 5 cycles aux précédents permet de couvrir la partition détaillée des trajets en 8 classes. Les trois cycles principaux précédents sont représentatifs des sous-classes (1 / 2) des trajets autoroutiers, (3 / 3) des trajets routiers et (2 / 3) des trajets urbains. Les cycles supplémentaires sont respectivement :

- un cycle urbain (urbain 1) de 4,2 km parcourus à 21 km/h de moyenne, avec une forte durée à l'arrêt (35%),
- un cycle urbain (urbain 3) à faible vitesse (18 km/h) et avec une fréquence d'arrêt élevée (3,4 arrêts au km),
- un cycle routier (route 1) de 8 km, parcourus à 40 km/h, avec 10% à l'arrêt, dont les conditions seraient proches d'une circulation suburbaine, mais avec une faible fréquence d'arrêts (0,4 arrêts au km, soit moins d'un arrêt pour 2 km),

	trajets autoroutiers		trajets routiers		trajets urbains	
	classe	cycle 7239	classe	cycle 7344	classe	cycle 2026
longueur (km)	82	46,2	13,7	11,2	3,4	3,46
étendue probable *	25 - 100		10 - 20		1 - 4	
durée à l'arrêt (%)	5	3,8	12	11,8	27	25,5
valeur probable *	6		12		26	
étendue probable	2 - 8		6 - 16		16 - 40	
fréquence d'arrêts / km	0,08	0,06	0,41	0,45	1,72	1,45
vitesse moyenne (km/h)	93	91,8	47,5	47,8	22,5	22,2
valeur probable	86		44		20	
étendue probable	70 - 100		30 - 50		15 - 30	
vitesse hors arrêts (km/h)	98	95,5	53,7	54,2	30,8	29,9
valeur probable	91		49		26	
étendue probable	70 - 110		33 - 55		20 - 35	
poids de la classe / coefficient de pondération du cycle (en distance)	27,6	0,047	44,5	0,314	27,9	0,638

* déterminées à partir de la distribution

Tableau 6.4 : Comparaison des caractéristiques des cycles et des 3 classes de trajets correspondantes

- un cycle routier (route 2) correspondant à des trajets de longue distance (27 km, vitesse moyenne : 66 km/h)

- un cycle autoroutier (autoroute 2), limité à 43 km, parcourus à une vitesse moyenne de 82 km/h, et qui diffère du premier par un profil de vitesse beaucoup plus perturbé (fréquentes accélérations and décélérations mêmes à hautes vitesses).

Le tableau A9.1 de l'annexe 9 récapitule les caractéristiques moyennes des classes de trajets de la partition en 8 ainsi que celles des cycles correspondants.

Les cycles et les classes de trajets dont ils sont issus sont représentés en figure 6.7. Les cycles obtenus permettent de décliner une certaine diversité des conditions de circulation rencontrées. On note un positionnement satisfaisant des 3 cycles principaux (urbain, route et autoroute) et des cycles secondaires urbains et autoroutiers (urbain 1 et 3, autoroute 1). Le cycle secondaire routier : route 1 est moins bien positionné en terme d'accélération. Ceci peut être le fait du calcul de l'accélération moyenne d'une part sur un nombre élevé de trajets hétérogènes d'une classe et d'autre part sur un seul cycle.

La figure 6.8 illustre le positionnement des cycles réglementaires par rapport aux cycles représentatifs en terme de vitesse et accélération. Comparé aux cycles représentatifs urbains, le cycle urbain européen est d'un niveau satisfaisant de vitesse, mais présente des accélérations trop faibles. Le cycle urbain américain est plutôt proche de conditions de circulation routières européennes.

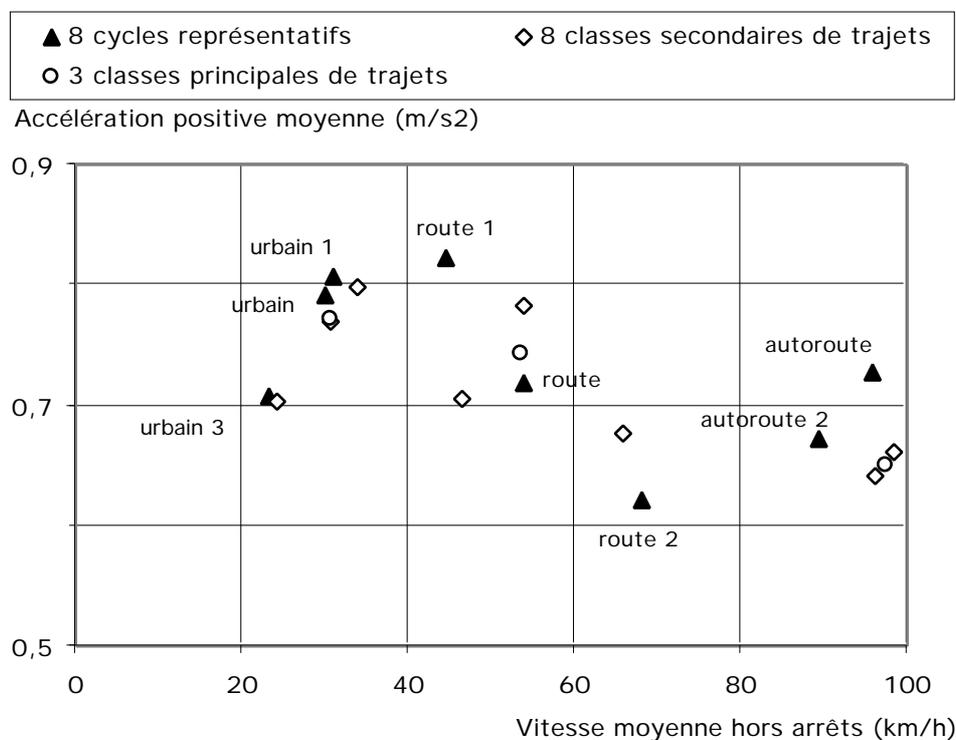


Figure 6.7 : Position des cycles par rapport aux classes de trajets correspondantes, en vitesse moyenne et accélération

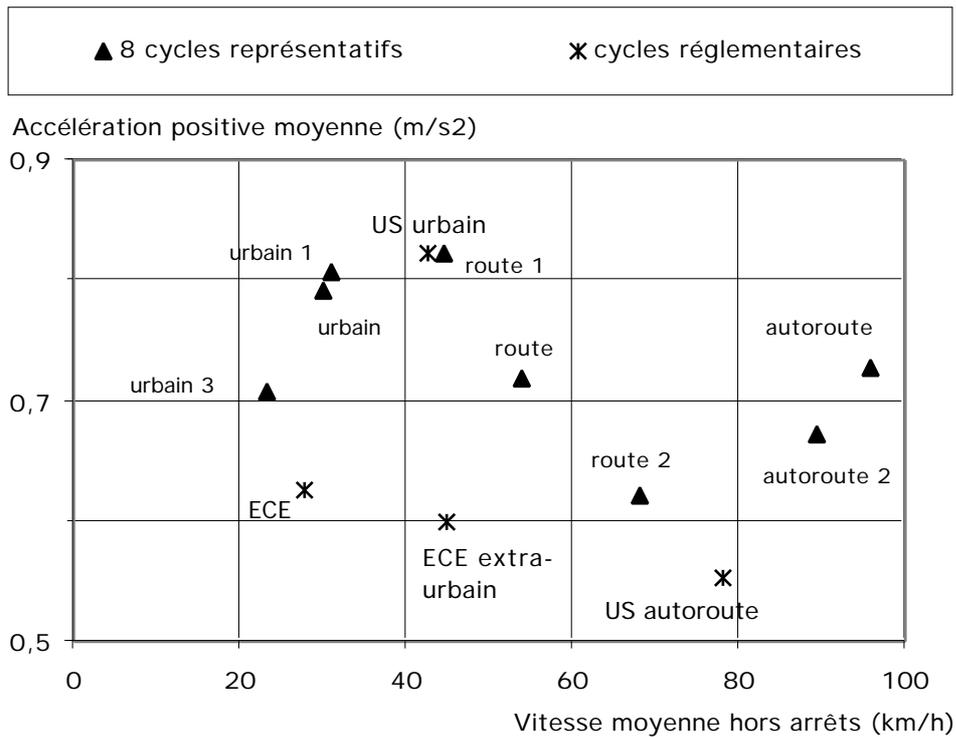


Figure 6.8 : Position des cycles réglementaires par rapport aux cycles représentatifs

6.5.3 - Utilisation des cycles et pondération

Deux modes d'utilisation des cycles précédents peuvent être envisagés selon l'objectif d'exploitation des résultats, car les cycles représentent d'une part une description des trajets, mais également une description des conditions de circulation au travers des segments qui les composent. Selon que l'on s'intéressera au résultat global sur un trajet, ou que l'on souhaitera affecter des résultats selon les différentes conditions de circulation, on utilisera différemment les cycles. On trouvera en annexe 10 la synthèse des caractéristiques des cycles développés et les règles d'utilisation.

6.5.3.1 - Résultat global sur un trajet

Un cycle d'essai est considéré comme un trajet type représentant sa classe de trajets. Ce mode d'utilisation est approprié lorsqu'on étudie le comportement d'un véhicule (mesure des émissions de polluants ou simulation de fonctionnement) sur un usage type (trajet urbain, etc.) incluant une certaine diversité de conditions de circulation, et en particulier des conditions non typiques (partie urbaine d'un trajet autoroutier, etc.). Le résultat sur un cycle est immédiat, la combinaison des différents types de trajets se fait en pondérant correctement les résultats par cycle par les coefficients données par les tableaux 6.4 et A9.1 (annexe 9). Si les résultats sont exprimés par unité de distance (g / km, litre / km), les coefficients à prendre en compte sont les poids des classes de trajet. Si les résultats sont intégrés sur le cycle (g, litres, etc.), on utilise les poids

absolus des cycles. Ces coefficients diminuent considérablement le poids des cycles autoroutiers, largement sur-représentés dans le jeu de cycle de par leur longueur nécessaire.

6.5.3.2 - Résultats affectés localement ou par type de conditions de circulation

Dans ce cas, l'objectif est par exemple d'identifier spécifiquement les conditions autoroutières au sein des cycles autoroutiers, afin d'attribuer géographiquement les émissions correspondant ces conditions, sans tenir compte des conditions urbaines intervenant en début et fin de ces mêmes cycles. Cette méthode est particulièrement utile lors des inventaires d'émission de polluants, afin d'évaluer et de différencier les émissions produites en zone urbaine ou extra-urbaine. Ce type d'exploitation nécessite de considérer spécifiquement les différentes conditions de circulation au sein des cycles et de corriger les coefficients de pondération.

Dans ce but on propose une méthode basée sur le croisement de la partition des trajets (et cycles) avec la partition des segments. Ce croisement permettra de négliger les segments cinématiques rares au sein d'une classes de trajet, d'identifier les parties de cycles représentatives des différentes conditions de circulation et de leur affecter un poids corrigé.

1 - Partition en 3 classes

Dans le cas de la partition en 3 classes (i.e. 3 principaux cycles), on observe que :

- le cycle urbain ne contient que des segments de types urbains et représente les conditions de circulation urbaine
- le cycle routier qui commence par des segments de type urbain, sera partiellement considéré (de la seconde 100 à la fin) pour représenter les conditions routières (segments de type routiers),
- le cycle autoroutier sera également partiellement utilisé (entre les secondes 100 et 1600, incluant spécifiquement les segments de types routiers et autoroutiers).

classes de trajet : types de segments	autoroutier	route	urbain	ensemble
1	(0,6)	(4,9)	13,6	19,2
2	(3,1)	23,8	12,3	39,2
3	4,0	11,1	(1,3)	16,3
4	19,8	(4,7)	(0,7)	25,2
ensemble	27,5	44,5	27,9	100,0

Tableau 6.5 : Distribution des distances selon les catégories de trajets et les types de segments cinématiques

classes de trajet : types de segments	autoroutier	route	urbain
1	(2,3)	(11,1)	48,8
2	(11,1)	53,6	44,1
3	14,6	24,8	(4,5)
4	71,9	(10,5)	(2,6)
ensemble	100,0	100,0	100,0

Tableau 6.6 : Distribution des distances selon les catégories de trajets et les types de segments cinématiques (profils en colonnes)

Ceci revient à négliger les segments rares dans les classes de trajets (cf. les distributions des distances en fonction des catégories de trajets et de segments, tableaux 6.5 et 6.6).

Ceci conduit à de nouveaux coefficients de pondération (cf. tableau 6.7) et règles d'usage des cycles, basés sur les hypothèses simplificatrices précédentes. L'usage des coefficients est identique à celui mentionné au paragraphe précédent.

2 - Partition en 8 classes

La même méthode s'applique à l'ensemble de 8 cycles, basée sur la distribution des kilométrages selon les 8 classes de trajets et les classes de segments cinématiques (tableau 6.7).

Cycles de conduite	partie à considérer	coefficient de pondération	distance (km)	durée (mn.)	vitesse moyenne (km/h)
typologie en 3 classes principales					
autoroutier	104 à 1598	28,1	42,90	24,92	103,3
routier	101 à fin	41,3	10,68	12,38	51,8
urbain	1 à fin	30,6	3,47	9,32	22,3
typologie en 8 classes secondaires					
autoroutier (principal)	104 à 1598	17,4	42,90	24,92	103,3
autoroutier 2	185 à 1465	11,8	36,94	21,35	103,8
routier 1	117 à fin	11,9	6,96	9,73	42,9
routier 2	109 à 1199	11,7	23,11	18,18	76,2
routier (principal)	101 à fin	17,9	10,68	12,38	51,8
urbain 1	1 à fin	9,8	4,19	11,98	21,0
urbain (principal)	1 à fin	16,2	3,47	9,32	22,3
urbain 3	1 à fin	3,3	2,91	9,70	18,0

Tableau 6.7 : Coefficients de pondération et règles d'utilisation des 3 principaux cycles dans le cas d'affectation des résultats localement ou selon les conditions de circulation - caractéristiques correspondant aux parties des cycles à utiliser

6.6 - Autres aspects

6.6.1 - Conditions de démarrage à froid

Nous avons conduit des analyses en vue de caractériser les conditions de démarrage (début des trajets). Globalement 25 à 30% des trajets sont démarrés moteur froid (température du moteur inférieure à 30°C) mais ces pourcentages ne sont pas significativement différents entre les 3 classes principales de trajets. Les trajets de type urbain étant les plus nombreux (6700, contre 2650 trajets routiers et 274 trajets autoroutiers) et le démarrage d'un cycle moteur froid étant très pénalisant pour les tests (on ne peut effectuer qu'un démarrage à froid par jour), on a considéré que le cycle urbain serait démarré moteur froid.

On rappelle que, selon [Joumard, 1995] (cf. chapitre 1.5.3), la distance nécessaire à la stabilisation des émissions après un démarrage à froid est de l'ordre de 6 km. Le cycle urbain sera donc répété trois fois, afin de mesurer l'effet total du démarrage à froid sur les 2 premiers tests et d'utiliser le troisième comme référence des émissions lorsque le moteur est chaud.

La comparaison des conditions de circulation (au travers des classes de segments) et des trajets par rapport aux conditions thermiques apporte un autre éclairage (cf. tableau 6.8). Si les trajets ne diffèrent pas significativement, les segments de type urbain sont plus souvent démarrés moteur froid et parcourus à froid que ceux des autres types. Corrélativement, les segments démarrés moteur froid sont parcourus à vitesse inférieure. On devra examiner par classe de trajet ces différences afin de déterminer s'il est nécessaire de différencier les conditions de circulation des débuts de cycles des conditions suivantes.

Classes	nombre de segments / trajets :		Moyenne des Températures eau moteur au départ (°C)	Moyenne des Températures air ambiant au départ (°C)
	démarrés à température d'eau du moteur < 30°C (en %)	parcourus à 80% température d'eau < 30°C (en %)		
Segments				
urbains	9,1	1,5	69	16
suburbains	3,0	0,9	76	16
grandes routes	1,4	0,3	79	18
autoroutes	0,2	0,1	83	19
Trajets				
urbains	24	16	52	15
routiers	28	4	49	15
autoroutiers	30	2	50	15

Tableau 6.8 : Comparaison des conditions thermiques selon les conditions de circulation (segments) et les catégories de trajets

6.6.2 - Prise en compte des caractéristiques des véhicules

De la même manière, nous avons tenté de déterminer dans quelle mesure les caractéristiques des véhicules ont une incidence significative sur les conditions de conduite et si en conséquence il

fallait ou non construire des cycles correspondant à des familles de véhicules (les véhicules faiblement ou fortement motorisés par exemple), même si cela augmente (très relativement) la complexité des tests. Dans ce but, on a considéré 3 groupes de véhicules différenciés selon le rapport de leur puissance à leur masse. Si les premiers résultats montrent bien des différences de conditions de circulation entre les 3 catégories, elles sont d'abord dues à des différences d'usage (plus forte fréquentation autoroutière et donc plus fortes vitesses observées pour les véhicules faiblement motorisés de l'échantillon). Il conviendrait donc si ces résultats se confirmaient de différencier les usages par catégorie de véhicules, ou de recomposer les catégories afin d'obtenir des usages comparables et d'analyser alors les différences éventuelles de conditions de fonctionnement.

Les données enregistrées sur véhicules électriques doivent également être utilisées dans ce sens, afin d'évaluer si les cinématiques de ces véhicules diffèrent de celles des véhicules conventionnels. Étant très limitées et peu représentatives d'un usage réel, elles ne permettent pas de construire un cycle spécifique.

6.6.3 - Utilisation de la boîte de vitesse

S'il n'a pas été possible jusqu'ici de tenir compte des caractéristiques des véhicules pour la définition du cycle de conduite, il est néanmoins indispensable d'en tenir compte pour l'utilisation des rapports de boîte de vitesse. Les rapports de transmission varient considérablement d'un véhicule à l'autre, et compensent d'une certaine manière les performances du véhicule (un véhicule faiblement motorisé nécessite des rapports plus courts).

Un algorithme de détermination des changements des rapports de boîte de vitesse a été mis au point dans le cadre du programme de recherche DRIVE-modem [André, 1995], et adapté aux nouveaux cycles développés. Le principe est de reproduire les conditions réelles d'utilisation des

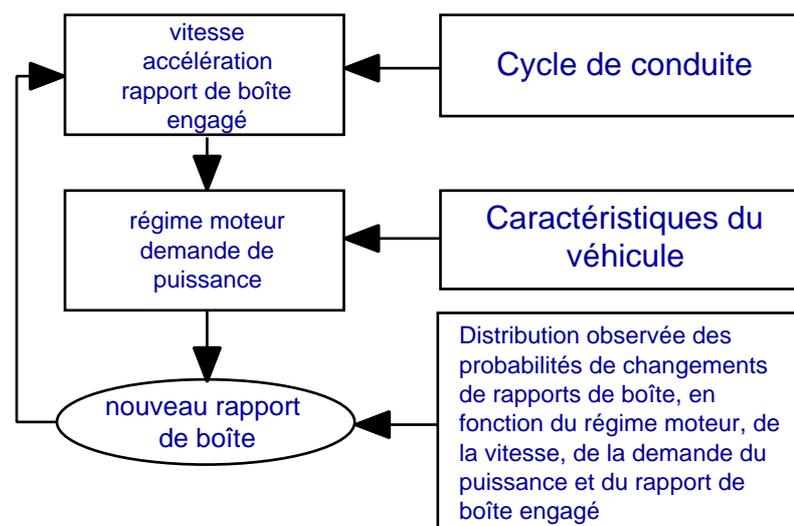


Figure 6.9 : Algorithme de détermination des rapports de boîte de vitesse à utiliser

rapports de boîte. Dans ce but, les probabilités de changement d'un rapport i vers un rapport j ont été établies en fonction des conditions initiales de régime moteur et d'accélération (déterminées par la courbe de vitesse - cycle de conduite à reproduire), à partir des données enregistrées à bord des véhicules. Afin de tenir compte des caractéristiques des véhicules, il a été nécessaire d'adimensionnaliser ces variables par le régime moteur de pleine puissance, et par la puissance massique. En fonction des caractéristiques d'un véhicule à tester, l'algorithme détermine préalablement les changements de rapports de boîte pour les différents cycles d'essai, en reproduisant les stratégies d'utilisation de la boîte de vitesse réellement observées (figure 6.9). On introduit de cette manière la diversité des comportements de conduite.

6.6.4 - Comparaison avec les cycles réglementaires

Les méthodes d'analyse permettent le positionnement d'éléments n'ayant pas participé aux analyses. On a ainsi positionné des cycles existants notamment réglementaires dans la partition obtenue et selon leur rang en terme de représentativité par rapport à la classe de trajets correspondante :

- le cycle américain autoroutier US Highway correspond à des conditions routières,
- le cycle urbain US FTP 75 - phase à chaud (secondes 1 à 1372) et la combinaison des 2 phases sont identifiés comme trajets urbains avec cependant des vitesses moyennes 34 et 42 km/h bien supérieures à la moyenne de la classe, et un rang très éloigné en terme de distance au centre de la classe des trajets urbains,
- le cycle ECE extra-urbain est identifié à un trajet urbain, de même que la combinaison cycle ECE urbain + extra-urbain, avec également de mauvais rangs.

Les mauvais rangs des cycles réglementaires sont surtout dus à l'inadéquation des distributions des vitesses et accélérations et principalement la faiblesse des accélérations.

6.7 - Conclusions

Les expérimentations menées par quatre laboratoires européens ont permis d'enregistrer près de 10000 trajets et 89000 km, au cours de 1900 journées de suivi de 77 voitures. Cette base d'information, sans équivalent à ce jour en Europe, apporte un éclairage précis sur les conditions de fonctionnement des véhicules.

Selon les méthodes définies au chapitre précédent, et par l'analyse des segments cinématiques, on établit une typologie des conditions de circulation en 12 classes. Cette typologie constitue une description détaillée des conditions de circulation et la connaissance de leur répartition.

On propose 2 partitions des trajets : en 3 classes (trajets urbains, routiers et autoroutiers) puis en 8 classes qui permettent de décrire plus finement les 3 principaux types de trajets. On construit ainsi deux ensembles imbriqués de 3 et 8 cycles représentatifs, décrivant les conditions d'utilisation et de fonctionnement des véhicules : 3 cycles urbains, 3 cycles routiers et 2 cycles autoroutiers. Chaque classes de trajets (urbains, routiers, autoroutiers) peut être représentée par un cycle principal ou par un ensemble de 2 ou 3 cycles. Ces cycles permettent de décliner une certaine diversité des conditions de circulation rencontrées.

Des analyses complémentaires montrent l'existence de liens entre les conditions cinématiques et les conditions de démarrage moteur froid d'une part, entre les conditions cinématiques et d'utilisation et les caractéristiques des véhicules d'autre part. Les conditions de circulation urbaine sont plus souvent abordées et parcourues moteur froid. Le second aspect tendrait à remettre en cause le principe de l'utilisation de cycles communs à l'ensemble des véhicules. Ces deux points nécessitent d'être approfondis.

Chapitre 7 - Cycles de conduite et émissions de polluants

Des tests ont été effectués sur banc d'essai en utilisant les nouveaux cycles d'essai. On ne donne ici que quelques résultats partiels qui illustrent la complexité d'accéder à un degré suffisant de représentativité des mesures d'émissions de polluants.

7.1 - Méthode de mesure

Dans le cadre du projet de recherche HYZEM, la structure d'un échantillon de 30 véhicules représentatifs du parc européen a été définie, en âge, technologie et gamme. Pour cela, on utilise un modèle de prédiction du parc automobile français en circulation [Bourdeau, 1997]. Afin de tenir compte d'une répartition différente des marques et modèles en Europe, on s'est appuyé sur les statistiques européennes des constructeurs automobiles.

Les véhicules sont recherchés auprès des particuliers. Ce sont des véhicules en circulation, issus du parc et testés en l'état. On ne procède pas à un réglage du véhicule.

Chaque véhicule est testé durant 2 jours sur le banc à rouleau. Le banc d'essai est un banc mono-rouleau, de diamètre 1,25m, freiné par une génératrice à courant continu. Les conditions ambiantes sont relevées (température, pression, humidité). Le véhicule est refroidi par un débit d'air proportionnel à la vitesse au cours du cycle, sur une surface frontale de 0,8 m².

Les cycles sont enchaînés selon un protocole rigoureux. A chaque série de tests, suit une analyse des polluants CO, HC, NO_x, CO₂, Particules (pour les véhicules Diesel) collectés dans les sacs de prélèvements ou sur filtre. Cette analyse nécessite 20 à 30 mn. Les cycles démarrés moteur froid sont l'objet de 2 prélèvements : l'un sur la partie froide, l'autre à chaud. Après chaque série de mesures, un préconditionnement du véhicule est effectué: après 3 mn d'arrêt du moteur, on effectue une accélération modérée jusqu'à 60 km/h, on maintient cette vitesse pendant une minute, puis on décélère. L'ensemble des tests nécessite environ 6 heures d'expérimentation par

série	cycles		durée de tests (mn)
1	urbain	démarrage à froid répété 3 fois	28
2	route		14
	autoroute.		30
3	urbain 1		14
	urbain 3		10
4	route 1		12
	route 2		25
5	autoroute 2		32
6	cycle européen	démarrage à froid	20
	urbain + extra-urbain		
	globalement		3 h
	+ 6 analyses		6 h

Tableau 7.1 : protocole de mesure des émissions des véhicules sur banc à rouleau

véhicule, réparties sur 2 jours pour les démarrages à froid. Il convient d'ajouter les durées nécessaires à la recherche des véhicules auprès des particuliers et à l'étalonnage du banc d'essai.

A part la collecte dans les sacs de prélèvements, les émissions de polluants et la vitesse du véhicule sont enregistrées en continu. Ces données doivent permettre ultérieurement une modélisation des émissions en fonction des conditions instantanées de fonctionnement.

7.2 - Résultats

7.2.1 - Généralités

On présente les tendances des résultats obtenus par catégorie de véhicules. L'échantillon de véhicules et l'ensemble des résultats de mesure sont donnés en annexe 11.

La synthèse présentée en tableau 7.2 illustre la dispersion des mesures entre les véhicules. Sur l'échantillon de 15 véhicules catalysés, l'écart-type des mesures est de l'ordre de grandeur de la moyenne des émissions, sauf pour les émissions de CO₂.

Les véhicules à essence de technologie récente (équipés de catalyseur) réalisent un progrès considérable en terme d'émissions, sauf pour le CO₂. Les émissions de CO sont 10 fois inférieures, les HC sont 15 fois plus faibles, les oxydes d'azote sont réduites d'un facteur 6. Les diesels catalysés marquent un progrès plus faible par rapport aux véhicules diesel non catalysés, mais on se gardera d'aller plus loin dans la comparaison, les échantillons étant assez limités.

7.2.2 - Cycles de conduite représentatifs et émissions à chaud

On a construit 2 ensembles imbriqués de 3 et 8 cycles représentatifs, assortis de coefficients de pondération (tableau 7.3). On dispose donc pour chacune des conditions types : urbain, route et autoroute de deux approches des facteurs d'émission : l'une à partir du cycle central seul (urbain, route, autoroute), l'autre à partir des 2 ou 3 cycles qui représentent la même catégorie de trajets. De la même manière, on établit un facteur d'émission global (intégrant tous les types de trajets) à

émissions sur cycle urbain à chaud	catégorie de véhicules : nombre de véh.:	essence catalysés 15	essence non catalysés 5	diesel catalysés 5	diesel non catalysés 5
CO g/km	moyenne	2,0	22,9	0,55	0,62
	écart-type	1,7	6,3	0,38	0,11
HC g/km	moyenne	0,21	3,37	0,09	0,12
	écart-type	0,15	0,89	0,04	0,05
NOx g/km	moyenne	0,25	1,55	0,63	0,60
	écart-type	0,15	0,62	0,23	0,14
CO ₂ g/km	moyenne	199	163	191	160
	écart-type	27	36	19	13

Tableau 7.2 : émissions de polluants des catégories de véhicules, mesurées sur le cycle représentatif urbain, moteur chaud

poids en %	urbain	route	autoroute	urbain 1	urbain 3	route 1	route 2	autoroute 2
3 cycles	27,9	44,5	27,6					
8 cycles	14,3	20,2	16,6	10,4	3,2	13,3	11,0	10,9

Tableau 7.3 : Coefficients de pondération des 3 cycles principaux ou de l'ensemble des 8 cycles

partir des trois cycles centraux ou à partir de la description plus complète en 8 cycles.

Le tableau 7.4 illustre ce calcul. Les tableaux correspondants aux autres catégories sont donnés en annexe 11. On note 3 cas d'écart importants entre les résultats à partir d'un seul cycle et ceux calculés à partir des 2 ou 3 cycles. Ces écarts concernent les véhicules essence catalysés et la circulation urbaine et autoroutière. Ils se traduisent par un écart de 40% entre les 2 évaluations globales d'émissions de CO. Pour les autres véhicules, on observe une très bonne adéquation entre les résultats mesurés à partir des 3 cycles principaux et à partir des 8 cycles et ceci sur l'ensemble des 4 polluants considérés.

Ces écarts sont illustrés en figure 7.1. D'après les mesures, les écarts mentionnés précédemment sont le fait principalement de quelques véhicules parmi les 15. Ces véhicules ne se distinguent pas particulièrement de l'échantillon sur les cycles principaux et sur le cycle européen réglementaire, mais présentent des sur-émissions considérables de CO et HC sur les cycles secondaires. Ceci est probablement dû à un dysfonctionnement du catalyseur lors de conditions plus difficiles de circulation urbaine (plus fort taux ou durée d'arrêt). En excluant l'un de ces

véhicules essence catalysés	15 véhicules			
	CO g/km	HC g/km	NOx g/km	CO ₂ g/km
urbain	1,96	0,21	0,25	199
urbain (3 cycles)	2,64	0,21	0,25	203
route	1,25	0,09	0,28	154
route (3 cycles)	1,40	0,11	0,30	147
autoroute	0,92	0,06	0,43	154
autoroute (2 cycles)	1,62	0,09	0,45	154
globalement (3 cycles)	1,36	0,12	0,31	166
globalement (8 cycles)	1,80	0,13	0,33	164
véhicules essence non catalysés	5 véhicules			
urbain	22,9	3,37	1,55	163
urbain (3 cycles)	23,7	3,33	1,53	167
route	16,7	2,24	1,98	131
route (3 cycles)	14,8	2,09	1,85	126
autoroute	11,5	1,36	3,02	138
autoroute (2 cycles)	11,5	1,42	3,04	139
globalement (3 cycles)	17,0	2,31	2,14	142
globalement (8 cycles)	16,4	2,25	2,09	141

Tableau 7.4 : Émissions moyennes de polluants mesurées sur deux échantillons de 15 voitures à essence catalysées (en haut) et de 5 voitures à essence non catalysées en utilisant les cycles représentatifs :

- urbain, route et autoroute : 3 cycles principaux ; urbain (3), route (3) et autoroute (2) : par combinaison des mesures sur les 2 ou 3 cycles correspondants
- ensemble (3 cycles) et ensemble (8 cycles) : combinaison des mesures sur les 3 ou 8 cycles

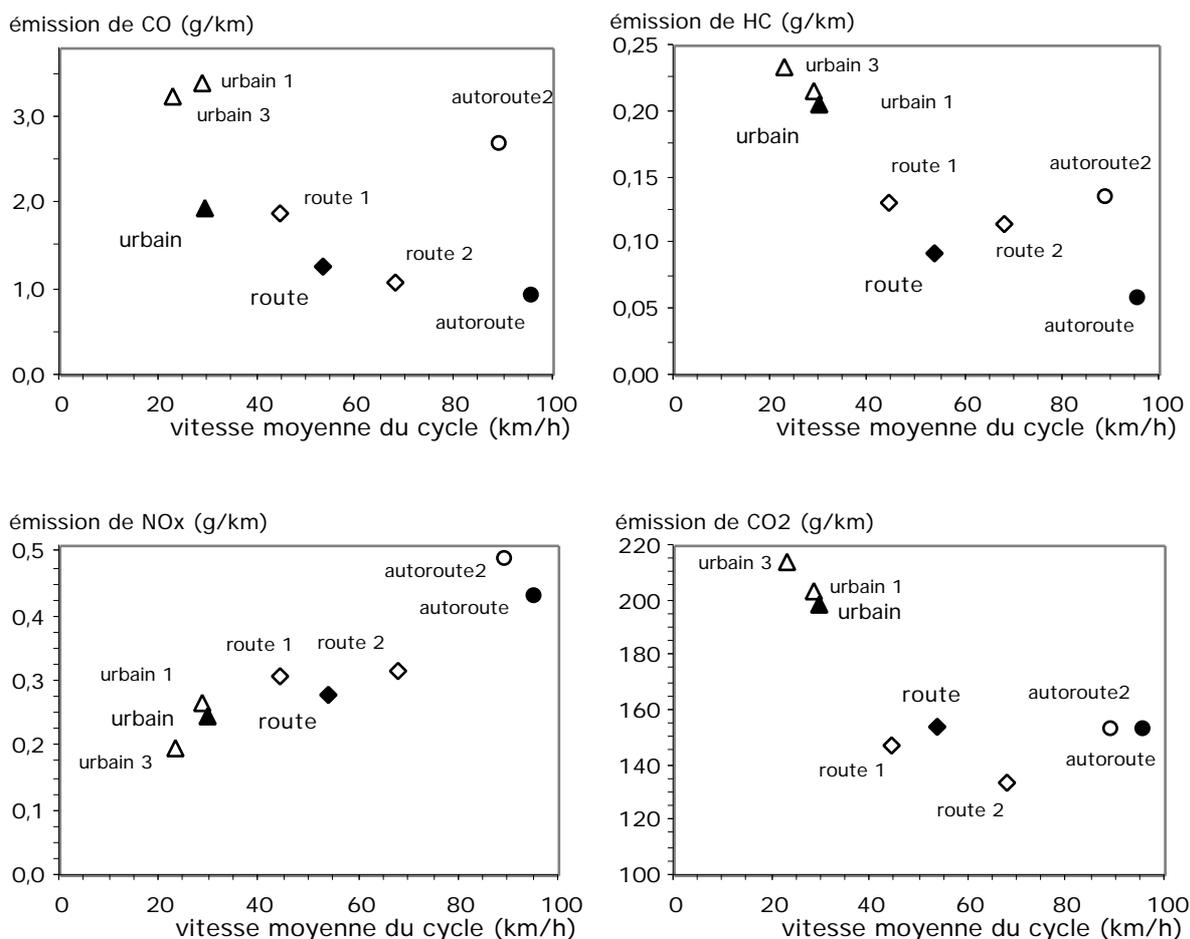


Figure 7.1 : Émissions mesurées selon les cycles de conduite, sur un échantillon de 15 véhicules à essence catalysés

véhicules par exemple, les écarts précédents diminuent considérablement (cf. tableau 7.5).

On conclut que les deux jeux de cycles conduisent des facteurs d'émission similaires dès lors que les véhicules de l'échantillon fonctionnent correctement pour les conditions décrites. On pourrait donc limiter les tests aux 3 principaux cycles. Par contre, des véhicules peuvent présenter des dysfonctionnements dont l'incidence sur les émissions de polluants n'est pas mesurée par les

véhicules essence catalysés	15	14	15	14
	véhicules CO g/km	véhicules CO g/km	véhicules HC g/km	véhicules HC g/km
urbain	1,96	1,80	0,21	0,20
urbain (3 cycles)	2,64	1,79	0,21	0,18
route	1,25	1,13	0,09	0,08
route (3 cycles)	1,40	1,16	0,11	0,10
autoroute	0,92	0,92	0,06	0,06
autoroute (2 cycles)	1,62	1,51	0,09	0,08
globalement (3 cycles)	1,36	1,26	0,12	0,11
globalement (8 cycles)	1,80	1,43	0,13	0,11

Tableau 7.5 : Incidence d'un véhicule sur les émissions moyennes de polluants mesurées en utilisant les 3 cycles principaux et 8 cycles secondaires nouvellement développés

cycles les plus centraux ni par le cycle réglementaire. Or ces véhicules font partie du parc et on ne peut établir un facteur d'émission représentatif sans en tenir compte. Il est donc nécessaire de décrire de manière détaillée les conditions de circulation au travers d'un nombre important de cycles, si on veut prétendre à une bonne représentativité des facteurs d'émissions de polluants.

7.2.3 - Démarrage à froid et émissions urbaines

On a mesuré l'incidence totale du démarrage à froid en enchaînant 3 fois le cycle urbain principal après un démarrage à froid. Les 2 premiers cycles permettent une mise en température complète du moteur. Le troisième cycle est effectué moteur chaud. Le rapport des facteurs d'émissions moyens sur les 2 premiers tests et sur le troisième mesure l'impact du démarrage à froid en urbain (tableau 7.6).

Les émissions à froid des véhicules essence catalysés sur ce cycle urbain peuvent être 2 à 3 fois plus élevées que les émissions à chaud (CO, HC) en raison du non fonctionnement à froid du catalyseur. Cependant ces émissions sont toujours bien inférieures à celles des véhicules essence non équipés de catalyseur. L'impact du démarrage à froid semble également important pour ces véhicules et pour les diesel non catalysés.

[Joumard, 1995] mesure, sur des échantillons de véhicules de taille comparable mais sur des cycles différents, des facteurs de surémission à froid encore plus élevés particulièrement pour les véhicules catalysés (facteurs de 10 à 15). Selon ces travaux, il semble par contre que la surémission absolue (quantité de polluant supplémentaire liée au démarrage à froid) soit du même ordre de grandeur pour les véhicules à essence catalysés et non catalysés.

7.2.4 - Émissions urbaines, cycles représentatifs et réglementaires

On constate des écarts très importants entre les facteurs d'émissions urbains représentatifs (cycle urbain) et les facteurs d'émissions mesurés par le cycle européen (NEDC urbain + périurbain). Si l'on rapporte les émissions réglementaires à celles mesurées sur le cycle urbain démarré moteur chaud, on observe une sous-estimation par le cycle réglementaire des émissions urbaines de l'ordre de 20 à 40%, plus faible pour le CO₂ et une surestimation pour quelques cas. Si on rapporte les émissions réglementaires (à froid) à celles du cycle urbain représentatif froid, cette sous-estimation est encore plus forte (tableau 7.7).

facteurs de surémission urbaine à froid véhicules :	nombre	CO	HC	NO _x	CO ₂
essence catalysés	15	2,33	3,18	1,46	1,07
essence non catalysés	5	1,37	1,32	1,01	1,08
diesel catalysés	5	1,24	1,20	1,01	1,05
diesel non catalysés	5	1,36	1,26	1,01	1,13

Tableau 7.6 : Facteurs de sur-émissions à froid sur cycle représentatif urbain (rapports des émissions unitaires à froid et à chaud)

On conclut que le cycle réglementaire, au delà de son rôle indéniable de contrôle des émissions des véhicules nouveaux ou en circulation, ne devrait pas être utilisé afin d'établir des facteurs représentatifs d'émissions urbaines.

ratio émissions NEDC / urbain chaud	C O	H C	N O x	C O ₂
essence catalysés	1,01	1,44	1,05	0,81
essence non catalysés	0,55	0,56	1,22	0,88
diesel catalysés	0,79	0,64	0,69	0,85
diesel non catalysés	0,76	0,63	0,75	0,79
ratio émissions NEDC / urbain froid				
essence catalysés	0,43	0,45	0,72	0,76
essence non catalysés	0,40	0,42	1,20	0,82
diesel catalysés	0,64	0,53	0,69	0,82
diesel non catalysés	0,56	0,50	0,74	0,70

Tableau 7.7 : Ratios entre les émissions mesurées sur le cycle européen réglementaire (NEDC, urbain + extension périurbaine) et les émissions mesurées à chaud ou à froid sur cycle représentatif urbain

7.3 - Conclusions

Un échantillon de 30 véhicules des 4 catégories : à essence ou diesel, avec et sans catalyseur a été testé sur banc d'essai, en utilisant les nouveaux cycles représentatifs et le cycle réglementaire européen. Lorsqu'on considère des véhicules de l'échantillon fonctionnant correctement, les facteurs d'émission par type de trajets (urbain, routier ou autoroutier) ou globaux sont tout à fait similaires, que l'on considère les mesures obtenues sur les 3 cycles principaux ou sur l'ensemble des 8 cycles. On pourrait donc limiter les tests aux 3 principaux cycles et obtenir des facteurs d'émissions représentatifs. Par contre, des véhicules peuvent présenter un dysfonctionnement, dont l'incidence sur les émissions de polluants n'est pas mesurée par les cycles les principaux ni par le cycle réglementaire. Afin d'établir des facteurs d'émissions représentatifs, c'est à dire tenant compte de l'ensemble des véhicules du parc, il est donc nécessaire de décrire de manière détaillée les conditions de circulation au travers d'un nombre important de cycles décrivant les conditions diversifiées de fonctionnement. Il n'est d'ailleurs pas certains que 8 cycles y suffisent.

L'incidence du démarrage à froid sur les émissions urbaines est considérable. Il touche relativement plus les véhicules à essence catalysés. C'est dire que cet aspect sera l'un des points importants des années à venir. Cependant les émissions à froid de ces véhicules demeurent de loin inférieures à celles des véhicules non équipés de catalyseur.

Le cycle réglementaire européen (urbain et périurbain) sous-estime largement les émissions urbaines mesurées à chaud ou à froid sur le nouveau cycle urbain représentatif. Au delà de son rôle indéniable de contrôle des émissions des véhicules nouveaux ou en circulation, ce cycle ne devrait pas être utilisé afin d'établir des facteurs représentatifs d'émissions urbaines.

Conclusions et perspectives

La forte incidence des conditions de fonctionnement des véhicules sur leurs émissions de polluants, la grande diversité de ces conditions, le rôle clé des cycles de conduite et des conditions de test dans la constitution de facteurs d'émissions représentatifs et l'utilisation de ces facteurs afin d'inventorier à grande échelle les quantités de polluants émises sont les arguments principaux qui plaident en faveur de conditions de test représentatives des conditions réelles d'utilisation des véhicules.

Le coût et la complexité des expérimentations sur banc d'essai font que, le plus souvent, on teste des échantillons limités de véhicules, sur les cycles réglementaires qui ont l'avantage d'exister et de constituer une base de référence et de comparaison.

Le développement de méthodes de mesure représentatives nécessite une connaissance des conditions d'usage et de fonctionnement. La complexité et le coût de l'instrumentation des véhicules sont le principal frein à des campagnes de mesure extensives. On se limite souvent à un ou quelques véhicules. Ceci impose d'autant plus des précautions pour la constitution d'un échantillon.

Cependant, on a construit beaucoup de cycles d'essai, fondés sur des volumes de données souvent limités et avec des méthodes d'analyse très diversifiées.

Une méthode a été élaborée, qui s'appuie sur la double modélisation des conditions de circulation et des usages. Les conditions de circulation sont décrites à partir de la distribution des vitesses et accélérations de véhicules instrumentés, les usages sont décrits par les trajets et les conditions de circulation rencontrées. Cette méthode, fondée sur les outils de l'Analyse des Données, permet de considérer d'autres aspects tels que les conditions de démarrage et les capacités des véhicules.

Une base assez large d'enregistrements à bord de véhicules privés utilisés en usage normal a été constituée dans le cadre de 2 projets de recherche européens. Des cycles de conduite ont été construits en vue de décrire les conditions de circulation européennes. Après ces travaux, la question principale concerne la représentativité de ces cycles. On ne peut que donner certains éléments de discussion :

La base de données : bien qu'actuellement elle soit sans doute la plus importante en Europe, elle est cependant limitée à 80 véhicules européens, de quatre pays et 7 zones géographiques. Malgré les précautions de constitution de l'échantillon, son extension serait un gage de meilleure représentativité. On peut envisager un redressement limité des données issues des 4 pays par les statistiques nationales (parc, kilométrage, trafic, etc.), mais il n'est pas sûr que les résultats en soient considérablement affectés et les règles de ce redressement sont complexes.

La méthode d'analyse des conditions de circulation et des trajets : la comparaison des résultats obtenus sur un échantillon représentant 20% des trajets et ceux mesurés sur l'ensemble des données montre que les résultats sont stables. Cependant, si les analyses factorielles (analyses des correspondances et classification) sont robustes, on doit considérer que les résultats finaux peuvent dépendre :

- du niveau de description, - des segments cinématiques peuvent permettre une description plus fine des conditions urbaines -,
- de la description des vitesses et accélérations : un nombre plus élevés de classes (dans la limite de la précision des capteurs) ou des classes différentes peuvent avoir un impact sur les résultats.

Des études de sensibilité doivent être menées au niveau de ces paramètres.

Les typologies ou partitions : les partitions des conditions de circulation et des trajets ne sont pas uniques. Le nombre de classes est déterminé selon des critères statistiques et des choix plus arbitraires. Par construction, une partition décrit - plus ou moins précisément - l'ensemble des données. Un nombre de classes plus élevé doit permettre une description plus précise des conditions de circulation et des trajets, mais doivent également conduire à un nombre de cycles plus important.

La construction du cycles : comme mentionné, une méthode microscopique d'addition de segments aurait sans doute permis de mieux représenter la diversité des comportements. D'un autre côté, à cette méthode est associé le risque d'introduire une part d'artificiel dans le cycle de conduite (par les transitions entre segments). De la même manière, il peut être artificiel de reproduire rigoureusement au cours d'un cycle de durée limitée, la distribution des vitesses et accélérations instantanées mesurée sur un grand nombre de trajets diversifiés.

Les autres conditions de tests : on a montré l'existence de liens entre les conditions thermiques et les conditions cinématiques d'une part, entre les caractéristiques des véhicules et les conditions d'utilisation d'autre part. L'incidence importante du démarrage à froid sur les émissions de polluants, mesurées sur le cycle représentatif des conditions urbaines, montre la nécessité d'approfondir ce aspect. Le second point, qui tend à remettre en cause le principe de l'utilisation de cycles communs à l'ensemble des véhicules, doit être également l'objet de recherches complémentaires.

Les premiers tests sur banc à rouleau en utilisant les nouveaux cycles représentatifs montrent la nécessité d'une description détaillée les conditions de circulation au travers d'un nombre important de cycles. On observe en effet que les cycles représentatifs principaux et le cycle réglementaire ne permettent pas de mesurer des sur-émissions liées à un dysfonctionnement de véhicules lors de conditions de circulation plus sévères. On analysera le degré nécessaire de finesse de cette description (en nombre de cycles) et son incidence sur l'évaluation des facteurs d'émissions. Compte tenu de leur caractère nécessairement simplifié et au delà de leur rôle indéniable de contrôle des émissions des véhicules, les cycles réglementaires ne devraient pas être utilisés pour établir des facteurs représentatifs d'émissions.

Références bibliographiques

- [André, 1987] ANDRE, M., ROUMÉGOUX, J.P., DELSEY, J., GUITTON, J.P., VIDON, R. *Etude expérimentale sur les utilisations réelles des véhicules (E.U.R.E.V.)*. Bron (France) : INRETS, 1987. 125 p. Rapport INRETS N° 48. ISBN 2-85782-202-2
- [André, 1989] ANDRE, M., HICKMAN, A.J., BARLOW, T.J., HASSEL, D., JOUMARD, R. *Modelling of emissions and consumption in urban areas: Measurements of the Driving Behaviour and the Vehicle Operations in Actual Uses, Method*. Bron (France) : INRETS, 1989. 129p. INRETS report NNE 8905
- [André, 1991a] ANDRE, M. *In Actual Use Car Testing: 70,000 Kilometers and 10,000 Trips by 55 French Cars under Real Conditions*. Warrendale (PA, USA): SAE, 1991. 10p. Technical Paper Series N°910039
- [André, 1991b] ANDRÉ, M., JOUMARD, R., HICKMAN, A.J., HASSEL, D. *Realistic driving cycles for passenger cars*. Bron (France) : INRETS, 1991. 29p. Rapport N° LEN9105.
- [André, 1994a] ANDRE, M., ROUMÉGOUX, J.P., VIDON, V., PRUVOST, C., TASSEL, P. *Usages et Conditions de Fonctionnement, des Petits Véhicules Utilitaires, Méthode de mesure au moyen de capteurs embarqués, (EUREV - PVU)*. Bron (France) : INRETS, 1994. 71p. Rapport INRETS-LEN N° 9408
- [André, 1994b] ANDRE, M. *The Inspection of In-Use cars in order to attain minimum emissions of pollutants and optimum energy efficiency, Short Driving Cycle based on the European real Driving*. Bron (France) : INRETS, 1994. 26p. INRETS report LEN9436
- [André, 1995] ANDRE, M., HICKMAN, A.J., HASSEL, D., JOUMARD, R. Driving cycles for emissions measurements under European Conditions, SAE 950926. In : *Global Emission Experiences: Processes, Measurements, and Substrates (SP-1094)*. Warrendale (USA): SAE, 1995. p. 193-205
- [André, 1996a] ANDRE, M. Vehicles Uses and Operating Conditions : On-Board Measurements. In : *Understanding Travel Behaviour in an Era of Change*. Oxford: Elsevier Science, Pergamon. 1996. p. 469-481. ISBN 0-08-042390-6
- [André, 1996b] ANDRÉ, M., VIDON, R., TASSEL, P., OLIVIER, D., PRUVOST, C. A method for assessing energetic and environmental impact of traffic changes in urban areas using instrumented vehicles. In : *World Transport Research - Proceedings of the 7th World Conference on Transport Research*. Oxford: Elsevier Science, Pergamon. 1996, Vol. 2, p. 287-299. ISBN 008-0427790
- [Austin, 1993] AUSTIN, C.T., DiGENOVA, F.J., CARLSON, T.R., JOY, R.W., GIANOLI, K.A., LEE, J.M. *Characterization of Driving Patterns and Emissions from Light-Duty Vehicles in California*. Sacramento (Californie, USA): California Air Resources Board, 1993. 290p. Final Report N° A932-185.
- [Barth, 1995] BARTH, M., NORBECK, J., YOUNGLOVE, T. *A Program to Collect Massive Activity Data in Northern California : Preliminary Instrumented Vehicle Study*. Riverside (CA, USA): Bourns College of Engineering, Cent. for Environmental Res. and Technology, University of California, 1995. 160 p.
- [Beckley, 1969] BECKLEY, S. F., MEYER, J. and W.A.P., AYRES, R.U. *A statistical Approach to Describing Vehicular Driving Cycles*. New York (USA) : Society of Automotive Engineers, 1969. 13p. SAE paper 690212.
- [Berry, 1977] BERRY, B.J.L., KASARDA, J.D. *Contemporary Urban Ecology*. New York: Macmillan Publishing Co. Inc. 497 p. 1977
- [Beta, 1994] BETA, R., YACOUB, Y., WANG, W., LYONS, D., GAMBINO, M., RIDEOUT, G. Heavy Duty Testing Cycles : Survey and Comparison, SAE942263, In : *Heavy Duty Vehicles and Alternatives Fuels : Choice in Future Transportation (SP-1060)*. Warrendale (USA): SAE, 1994. p. 29-41
- [BMDP, 1990] BMDP. *BMDP Statistical Software Manual, 1990 software release*. Los Angeles (USA) : University of California Press. 1990. Volumes 1 et 2. 1385 p.

- [Borbely, 1989] BORBELY, G., BEKEFI, Z., KERESZTES, A. Statistical evaluation of operation data of city buses. In : *Nauka i Motorna Vozila 89, (Science & Motor vehicles 89)* JU.M.V. Proceedings, Belgrad. Budapest (Hongrie) : Techn. Univ. of Budapest. 1989. p. 8913101.1-8913101.5
- [Bourdeau, 1997] BOURDEAU, B. *Modélisation du parc automobile français entre 1970 et 2020*. Thèse de l'Université de Chambéry. Bron (France): INRETS, 1997. 350p. à paraître
- [Bouroche, 1994] BOUROCHE, J.M., SAPORTA, G. *L'analyse des données*. Paris: Presses Universitaires de France. 1994. 127p.
- [BUWAL, 1993] BUWAL. *Zusammensetzung des Verkehrs nach Fahrzeug-Typen Gewichtsmässiger Beladungsgrad*. Berne (Suisse) : BUWAL, 1993. 45p. Report Nr 14 (B+S)
- [CCMC, 1977] C.C.M.C. *Proposals for a new Test Procedure for the Measurement of Exterior Noise of Passenger Cars*. C.C.M.C., Committee of Common Market Automobile Constructors. Février 1977. 141 p. Report N° N/17/77
- [CEE, 1990] Proposition de directive du Conseil modifiant la directive 70/220/CEE concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur. *Journal Officiel des Communautés européennes*, 1990. N° C81/1, 110p. ISSN 0378-7052
- [Chou, 1996] CHOU, D.C., LONG, J. *Comparison of the exhaust Emissions from California Phase 1 (without oxygenates) Fuel and Phase 2 (with oxygenates) Fuel : A Case Study of 11 Passenger Vehicles*. Warrendale (USA): Society of Automotive Engineers, 1996. 13p. SAE Technical Paper Series 96122.
- [Clark, 1995] CLARK, N.N., MESSER, J.T., McKAIN, D.L., WANG, W., BETA, R., et al. *Use of the West Virginia University Truck Test Cycle to Evaluate Emissions from Class 8 Trucks*. Warrendale (USA): Society of Automotive Engineers, 1995. 13p. SAE Technical Paper N° 951016
- [Cohen, 1993] COHEN, J.P., JIMENEZ, M., TUNGGAL, H.H., LOOKER, R.E., SHEPHARD, S., NODA, A. *Method for Driving cycle development and validation*. San Rafael (California, USA) : Systems Applications International, 1993. 47 p. Ref. SYSAPP-93194
- [Cohen, 1994] COHEN, J.P., SHEPHARD, S.B., IWAMIYA, R.K., TUNGGAL, H.H., LOOKER, R.E., KLEINHESSELINK, D.J. *Analyses of in-service data to calculate engine driving cycles*. San Rafael (California, USA) : Systems Applications International, 1994. 104 p. Ref. SYSAPP-94040
- [Crauser, 1989] CRAUSER, J.P., MAURIN, M. *Méthodologie statistique pour l'étude des cinématiques et des consommations de véhicules légers*. Thèse de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Arcueil (France): INRETS, 1989. 140p. ISSN 0768-9756, ISBN 2-85782-251-0
- [Degobert, 1992] DEGOBERT, P. *Automobile et pollution*. Paris : Editions Technip, 1992. 516 p. ISBN 2-7108-062-2.
- [Effa, 1993] EFFA, R.C., LARSEN, L.C. Development of Real-World Driving Cycles for Estimating Facility-Specific Emissions from Light-Duty Vehicles. Présenté à : *Air and Waste Management Association Specialty Conference on the Emission Inventory, Perception and Reality - Pasadena, California, 18-20 Octobre, 1993*. 20 p.
- [Eggleston, 1991] EGGLESTON, H.S., GAUDIOSO, D. GORISSEN, N. JOUMARD, R. RIJKEBOER, R.C., SAMARAS, Z., ZIEROCK, K.H. *CORINAIR working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic - vol. 1: methodology and emission factors*. Bruxelles : CEC, 1991. 116p. report: B4-3045(91) 10PH
- [Enns, 1993] ENNS, P., GERMAN, J., MARKEY, J. EPA's Survey of In-Use Driving Patterns: Implications for Mobile Source Emission Inventories. Communication au congrès: *AWMA/CARB: Specialty Conference on Emission Inventory: Perception and Reality, Pasadena, Californie, Octobre 1993*. Ann Arbor (MI, USA) : U.S. Environmental Protection Agency, Office of Mobile Sources, Certification Division, 1993. 18p.
- [E.P.A., 1989] E.P.A. (Environmental Protection Agency). *User's guide to MOBILE 4, (mobile source emission factor model)*. Ann Arbor (MI, USA) : U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Mobile Sources, Emission Control Technology Division, Test and Evaluation Branch, 1989. 70 p. Report ref. EPA-AA-TEB-89-01.
- [E.P.A., 1993] E.P.A. (Environmental Protection Agency). *Federal Test Procedure Review Project : Preliminary Technical Report*. Washington : U.S. EPA, Office of Air and Radiation, 1993. 224 p. Report EPA420-R-93-007

- [Ericsson, 1996] ERICSSON, E. *Att mäta bilars körmönster. En metodstudie (How to measure driving patterns. A study of methodology)*. Lund (Suède): University of Lund, Lund Inst. of Technology, Depart. of Traffic Planning and Engineering, 1996. 119p. Bulletin 137
- [Evans, 1978] EVANS, L., HERMAN, R. Automobile Fuel Economy on Fixed Urban Driving Schedules. *Transportation Science*, 1978, Vol. 12, N° 2. p. 137-152
- [German, 1995] GERMAN, J. Observations Concerning Current Motor Vehicle Emissions. In : *Applications and Developments in New Engine Design and Components (SP-1071)*. Warrendale (USA): Society of Automotive Engineers, 1995. p. 145-155. SAE Technical Paper Series 950812.
- [Gandhi, 1983] GANDHI, K.K., ZVONOW, V.A., SINGH, A. Development of a driving cycle for fuel economy in a developing country. *Transportation Research A*, 1983, Vol. 17A, N°1. p. 1-11
- [Garshelis, 1995] GARSHELIS, I.J., CONTO, C.R., FIEGEL, W.S. A single transducer for non-contact measurement of the power, torque and speed of a rotating shaft. In : *Sensors and Actuators (SP-1066)*. Warrendale (USA): Society of Automotive Engineers Inc., 1995. p. 57-65
- [GVF, 1991] GVF. *Verkehrsverhalten in der Schweiz 1989*. Berne (Suisse): GVF, 1991. 152 p. Report N° 6/91
- [GVF, 1993] GVF. *Pilotehebung Fahrleistungen 1991 (PIFA)*. Berne (Suisse): GVF, 1993. 58p. GVF report Nr 202
- [GVF, 1994] GVF. *Fahrverhalten von Personenwagen in der Schweiz*. (BUWAL Report Nr 10). Berne (Suisse): GVF, 1991. 44p. GVF Bericht 6/91
- [Hansen, 1995] HANSEN, J.Q., WINTHER, M., SORENSEN, S.C. The influence of driving patterns on petrol passenger car emissions. In : *The Science of the Total Environment, special issue : Transport and Air Pollution*, 1995, N° 169. p. 129-139.
- [Herrikson, 1993] HERRIKSON, P. *Personbilsresors längder och fördelningar i tid och rum*. Linköping (Suède): VTI, 1993. 70 p. VTI Meddelande report 717
- [Hughes, 1988] HUGHES, M.T.G., SHAVE, D., LAKER, I.B. *A set of driving cycles to assess private car fuel efficiency*. Crowthorne, Berkshire (Great-Britain): Transport and Road Research Laboratory, 1988. 46p. Contractor Report 81. ISSN 0266-7045.
- [Johnson, 1975] JOHNSON, T.M., FORMENTI, D.L., GRAY, R.F., PETERSON, W.C. Measurement of motor vehicle operation pertinent to fuel economy. In : *SAE Transactions*, Section 1, 1975. p. 17-46. SAE paper 750003
- [Jost, 1986] JOST, P., SONNBORN, K.S., ROTHER, G., HAMACHER, H.G., HABER, F., *Ermittlung der Autobahn-Fahrzyklen (AP210), Abschlußbericht über die Ergebnisse des Abgas-Großversuchs*. Essen (RFA): Vereinigung der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., 1986. p. 210
- [Jost, 1987] JOST, P., ULLRICH, J., WALDEYER, H. Etude à grande échelle des émissions de polluants sur autoroute : Abgas-Großversuchs. *Recherche Transports Sécurité*, 1987, Vol. N° 14. p. 5-12.
- [Jost, 1994] JOST, P., HASSEL, D., JOUMARD, R., HICKMAN, A.J. Vehicle Emissions and Fuel Consumption Modelling Based on Continuous Measurements. In : *Vehicle and Environment, FISITA Congress 1994*. Intern. Academic Publishers, 1994. p.158-166
- [Joumard, 1990] JOUMARD, R., PATUREL, L., VIDON, R., GUITTON, J.P., SABER, A.I., COMBET, E. *Emissions unitaires de polluants des véhicules légers*. Bron (France): INRETS, 1990. 120p. Rapport INRETS N° 116
- [Joumard, 1992] JOUMARD, R., HICKMAN, A.J., NEMERLIN, J., HASSEL, D. *Modelling of emissions and consumption in urban areas*. Bron (France): INRETS, 1992. 54p. INRETS report LEN9213
- [Joumard, 1994] JOUMARD, R., ZAFIRIS, D., SAMARAS, Z. Comparative assessment of two forecasting models for road traffic emissions : a French case study. *The science of the Total Environment*, 1994, Vol.146/147. p. 351-358.
- [Joumard, 1995] JOUMARD, R., VIDON, R., PATUREL, L., PRUVOST, C., TASSEL, P., De SOETE, G., SABER, A.I. *Changes in pollutant emissions from passenger cars under cold start conditions*. Bron (France): INRETS, 1995. 75p. INRETS report N° 197 bis
- [Keller, 1995] KELLER, M., EVEQUOZ, R., HELDSTAB, J., KESSLER, H. *Emissions polluantes du trafic routier de 1950 à 2010 - Cahier de l'environnement N°255 - Air*. Berne (Suisse): Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEPF), 1995. 430p.

- [Kent , 1978] KENT, J.H., ALLEN, G.H., RULE, G. A driving cycle for Sydney. *Transportation Research*, 1978, Vol. 12. p.147-152.
- [Kenworthy, 1986]KENWORTHY, J.R. *Driving Cycles, Urban Form and Transport Energy*. Ph.D. Thesis : Environmental Science. Murdoch (Australia) : Murdoch University, 1986. 546 p.
- [Kenworthy, 1992]KENWORTHY, J.R., NEWMAN, P.W.G., LYONS, T.J. The ecology of Urban Driving 1, Methodology. *Transportation Research A*, 1992, Vol 26-A, N°3. p. 263-272
- [Klingenberg, 1977] KLINGENBERG, H. et al. *Final Report on the Research-Project : Analysis of the Measuring and Testing Procedures for motor vehicle exhaust emissions regulated in Europe and in the USA..* Wolfsburg (RFA): Volkswagenwerk A.G., Forschung und Entwicklung, 1977. 162 p.
- [Kruse, 1973] KRUSE, R. E., HULS, T. A. *Development of the federal urban driving schedule*. New York (USA): Society of Automotive Engineers, 1973. 7 p. SAE Technical Paper 730553
- [Kuhler, 1978] KUHLE, M., KARSTENS, D. *Improved Driving Cycles for Testing Automotive Exhaust Emissions..* New York (USA): Society of Automotive Engineers, 1978. 16 p. SAE Technical Paper 780650
- [Kyriakis, 1992] KYRIAKIS N., NAKOS, C., PATTAS, K. Driving pattern development of an urban area, présenté à "*Traffic induced Air Pollution International Conference*", Graz, Austria, 1992. Graz (Autriche) : Techn. Universität Graz, VKM-Thd, 1992. Actes p. 513-521
- [Kyriakis, 1997] KYRIAKIS, N.A., ANDRE, M. Cold start of passenger cars. In : *4è Colloque intern. "Transport et pollution de l'air"*, Avignon, juin 1997. Bron (France) : INRETS, 1997. p. 137-144. Préactes INRETS LEN9718
- [Lansell, 1983] LANSELL, S.R., WATSON, H.C., MILKINS, E.E. *Development of a Melbourne Cold Start Driving Cycle* . Melbourne (Australie) : University of Melbourne, Department of Mechanical and Industrial Engineering, 1983. 60 p. Report T59/83
- [Lebart, 1982] LEBART, L., MORINEAU, A., FENELON, J.P. *Traitement des données statistiques*. Paris: Dunod. 1982. 518p.
- [Lebart, 1993] LEBART, L., MORINEAU, A., LAMBERT, T., PLEUVRET, P. *SPAD.N Version 2.5, Système portable pour l'analyse des données, Manuel de référence*. Saint-Mandé (France) : CISIA, 1993. 550 p.
- [Le Guen, 1991] LE GUEN, H., FORTIN, C., GREMEZ, P., MAGNET, J.L., POUILLE, J.P., ROUX, F. Moyens spécifiques d'essais. *Techniques de l'Ingénieur, traité Mécanique et Chaleur*. 1991. Fascicules B 2960 et B 2961. 27p.
- [Leisen, 1993] LEISEN, P. Emissions and air pollution concentrations of nitrogen oxides caused by a German motorway. In : *The Science of the Total Environment, Transport and Air Pollution*, 1993, Vol. 134. p. 125-137.
- [Lenaers, 1994] LENAERS, G. A dedicated system for on-the-road exhaust emission measurements on vehicles. In : *3ème Colloque international "Transports et pollution de l'air"*, Avignon, Juin 1994. Bron (France) : INRETS, 1994. p. 179-184. Actes de Posters : Actes INRETS N° 37
- [Lenaers, 1997] LENAERS, G., DE VLIJGER, I. On board emission measurements on petrol-driven cars and diesel city buses. *International Journal of Vehicle Design*, 1997, Vol. 18, N° 3/4 (Special Issue). p. 368-378
- [Lyons, 1986] LYONS, T.J., KENWORTHY, J.R., AUSTIN, P.I., NEWMAN, P.W.G. The development of a driving cycle for fuel consumption and emissions evaluation. *Transportation Research*, 1986, Vol. 20A. p. 447-462.
- [Mäkelä, 1996] MÄKELÄ, K. Comprehensive data on city bus driving. (VTT, Finlande) *Nordic Road and Transport Research*, 1996, Vol. N° 2. p. 26-26
- [Maurin, 1990] MAURIN, M., CRAUSER, J.P. The kinematic sequences, an atomistic approach to automobile travel and the effects of traffic. *Recherche Transport Sécurité*, 1990, English Issue N° 5. p. 53-62.
- [Meier, 1986] MEIER, E., PLASSMANN, E., WOLFF, C., et al. *Abgas-Großversuchs, Abschlußbericht, Untersuchung der Auswirkungen einer Geschwindigkeitbegrenzung auf das Abgas-Emissionsverhalten von Personenkraftwagen auf Autobahnen*. Essen (RFA): Vereinigung der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., 1986. 700 p.
- [Newman, 1992] NEWMAN, P.W.G., KENWORTHY, J.R., LYONS, T.J. The ecology of Urban Driving 2, Driving cycles across a city: their validation and implications. *Transportation Research A*, 1992, Vol 26-A, N°3. p. 273-290

- [Nilsson, 1989] NILSSON G.K., *Personbilars hastighet som funktion av variabler som beskriver resan, fordonet och bilägaren*, Linköping (Suède): VTI, 1989. 44 pp + Appendices. VTI meddelande Report 589,
- [Nilsson, 1991] NILSSON G.K., S. RIGEFALK, I.KORONNA-VILHEMSSON. *Hastighetsuppföljning på landsväg, Mätresultat 1991*. Linköping (Suède): VTI, 1992. 47pp. + App. VTI meeddelande report : Nr 690
- [Pattas, 1993] PATTAS, K., Kyriakis, N., Nakos, C., "Time dependence of traffic emissions in the Urban area of Thessaloniki". *The Science of Total Environment*, 1993, Vol. 134. p. 273-288
- [Pierson, 1990] PIERSON, W. R., GERTLER, A. W., BRADOW, R. L. Comparison of the SCAQS Tunnel Study with the Vehicle Emission Data. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1990, Vol. 40, N° 11. p. 1495-1504
- [Ragione, 1994] RAGIONE, L.S., GIGLIO, V., LUZAR, V., RAPONE, M. *Visualisation and Analysis of Urban Traffic Data*. Actes du congrès : SEUGI / Club SAS'94, Strasbourg, Juin 1994. 1994. p. 856-866
- [Rapone, 1995] RAPONE, M., Della RAGIONE, L., D'ANIELLO, F., LUZAR, V. Experimental Evaluation of Fuel Consumption and Emissions in Congested Urban Traffic. In : *Developments and Advances in Emissions Control Technology (SP-1120)*. Warrendale (USA): SAE, 1995. p 43-49
- [Raynal, 1991] RAYNAL, B. *Moteurs thermiques et Pollution atmosphérique: Réglementations des véhicules automobiles. Techniques de l'Ingénieur*. 1991. 17p. Fascicule B 378,2
- [Samaras, 1997] SAMARAS, Z., ZACHARIADIS, T., JOUMARD, R., VERNET, I., HASSEL, D., WEBER, F.J., RIJKEBOER, R. Alternative short tests for Inspection & Maintenance of in-use cars with respect to their emissions performance. In : *Colloque International : Transport et pollution de l'air*. Bron (France): INRETS, 1997. p. 181-288. Préactes, Réf. LEN9718
- [Saporta, 1990] SAPORTA, G. *Probabilités, analyse des données et statistiques*. Paris : Editions Technip. 1990. 493 p.
- [Sjödin, 1997] SJÖDIN, A., PERSSON, K., ANDREASSON, K., ARLANDER, B., GALLE, B. On-road emission factors derived from measurements in a traffic tunnel. In : *Colloque International : Transport et pollution de l'air*. Bron (France): INRETS, 1997. p. 145-152. Préactes, Réf. LEN9718
- [Steven, 1994] STEVEN, H., BACHURSKI, J., ENZ, W. et al. *Engine torque and Speed distributions of commercial vehicles and its consideration in emission measurement according to the EC Directives 38/77/EEC, resp. ECE Regulation R49*. Aix-la-Chapelle (RFA) : FIGE (Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen), 1994. 83 p. Report N° 104 05 316
- [Steven, 1995] STEVEN, H. Torque and speed distributions of commercial vehicles. In : *International Workshop on Vehicle Driving Cycle, 6-7 avril 1995, Ottawa - Proceedings*. Ottawa (Canada) : Instrumental Solutions, 1995. 21p.
- [Sturm, 1994] STURM, P.J., PUCHER, K., ALMBAUER, R. Determination of Motor Vehicle Emissions as a function of Driving Behaviour. présenté à "the Emission Inventory : perception and reality", Pasadena, Oct. 1993. Pittsburg (USA) : AWMA, 1994. 12p.
- [Taylor, 1991] TAYLOR, G. W. R., ENG, P. AUTOLOGGER: a long duration vehicle use data collection system. *6th International Conference on Travel Behaviour, Québec, May 1991*. Montréal (Québec) : Université Laval, Int. Assoc. of Travel Behaviour, 1991. p. 432-443. Proceedings tome 2
- [Vallet, 1982] VALLET, M., YGNACE, J.L., MAURIN, M. *Enquête sur l'utilisation réelle des voitures en France (EUREV)*. Bron (France): Inst. Rech. Transport, 1982. 141 p. Rapport NNE50.
- [Van de Weijer, 1993] Van de WEIJER, C., Van der GRAAF, R., HENDRIKSON, P., VERBEEK, R. *Urban Bus Driving Cycle*. Delft (Pays-Bas) : TNO Road, Vehicles Research Institute, 1993. 17p. TNO-Paper: VM9304
- [Van Ruymbecke, 1991] VAN RUYMBECKE, C., GUITTON, J.P., VIDON, R., PRUVOST, C. *Assessing an on-board sampling system for vehicle pollutant emissions: mini CVS*. Bron (France): INRETS, 1991. 57 p. Rapport N° LEN9104
- [Van Ruymbecke, 1993] VAN RUYMBECKE, C., GUITTON, J.P., VIDON, R., PRUVOST, C. Test d'une méthode alternative de mesure des émissions de polluants des voitures particulières. In : *Transport and Air Pollution. The Science of the Total Environment*, 1993, N° 134. p. 197-209.

- [Volle, 1985] VOLLE, M. *Analyse des données*. 3ème édition. Paris (France), Editeur : Economica, 1985, 324 p. Collection "Economie et statistiques avancées". ISBN 2-7178-0815-9
- [VTI, 1994] VTI. *Arliga hörsträckor skattade ur Bilprovningens databas*. Linköping (Suède): VTI, 1994. 22p. VTI report N° T149 1994
- [Wacker, 1997] WACKER, M., TÖRGYEKES, S., BAUMBACH, G. Air pollutant measurements inside an urban road tunnel to evaluate specific exhaust emissions of traffic streams. In : *4ème Colloque intern. "Transport et pollution de l'air"*, Avignon, juin 1997. Bron (France) : INRETS, 1997. p. 151-158. Actes des communications sous forme d'affiches. ISBN 2-85782-482-3
- [Watson, 1978] WATSON, H.C. *Vehicle driving patterns and measurement methods for energy and emissions assessment..* Canberra (Australie) : Bureau of Transport Economics, Australian Government Publishing Service, 1978. 105p. Occasional Paper 30
- [Watson, 1986] WATSON, H.C., MILKINS, E.E. *An International Drive Cycle*. présenté à 21th FISITA Congress, Belgrade, Yugoslavia, 1986. Paper N° 865042. 9p.
- [Watson, 1983] WATSON, H.C., MILKINS, E.E et al. *Predicting Fuel Consumption and Emissions - Transferring Chassis Dynamometer Results to Real Driving Conditions*. Warrendale (PA, USA): SAE, 1983. 24p. Techn. SAE Technical Paper Series N°830435
- [Watson, 1985] WATSON, H.C., MILKINS, E.E et al. *In-Use Vehicle Survey of Fuel Consumption and Emissions on Dynamometer and Road*. Warrendale (PA, USA): SAE, 1985. 24p. Techn. SAE Technical Paper Series N°850524
- [Watson, 1995] WATSON, H.C. Effects of a wide range of drive cycles on the emissions from vehicles of three levels of technology. In : *Global Emission Experiences: Processes, Measurements and Substrates, SP-1094*. Warrendale (PA, USA): Soc. of Automotive Engineers, 1995. pp. 119-132
- [Yoshizumi, 1980] YOSHIZUMI, K., NAKAMURA, K., INOUE, K., ISHIGURO, T. *Automotive Exhaust Emissions in an Urban Area*. Warrendale (PA, USA): Soc. of Automotive Engineers, 1980. 16 p. SAE Technical Paper Series N° 800326

Annexes

ANNEXES	221
Annexe 1 : Bancs d'essai de véhicules et de moteurs	223
Annexe 2 : Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules légers	227
Annexe 3 : Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules lourds	232
Annexe 4 : Variables descriptives des séquences entre arrêts, segments cinématiques et trajets	233
A.4.1 - Comparaison des séquences cinématiques entre arrêts et segments de longueur variable	233
A.4.2 - Forme de la distribution des variables et indicateurs - cas des séquences cinématiques entre arrêts	234
A.4.3 - Forme de la distribution des variables et indicateurs - cas des segments cinématiques	235
A.4.4 - Variables descriptives des trajets	236
Annexe 5 : Comparaison des méthodes de caractérisation des conditions de circulation	239
Annexe 6 : Bilan des expérimentations	241
A6.1 - Véhicules expérimentés	241
A6.2 - Correction des accélérations	241
A6.3 - Usages des véhicules	242
Annexe 7 : Typologie des conditions de circulation	243
A7.1 - Analyse des correspondances binaires des segments cinématiques décrits par distribution croisée des vitesses et accélérations et la durée d'arrêt	243
A7.2 - Classification des segments cinématiques	248
A.7.3 - Typologie des conditions de circulation	250
Annexe 8 : Analyse des trajets	253
A.8.1 - Analyse des Correspondances Binaires des trajets décrits par les fréquences des 12 segments cinématiques types	253
A.8.2 - Classification des trajets	258
A.8.3 - Typologie des trajets	260
Annexe 9 : Construction de cycles de conduite	263
A9.1 - Cycles de conduite urbains	264
A9.2 - Cycles de conduite routiers	265
A9.3 - Cycles de conduite autoroutiers	266
A9.4 - Comparaison du cycle de conduite urbain et des trajets urbains selon leur distribution des vitesses et accélérations instantanées	267
A9.5 - Comparaison du cycle de conduite routier et des trajets routiers selon leur distribution des vitesses et accélérations instantanées	268
A9.6 - Comparaison du cycle de conduite autoroutier et des trajets autoroutiers selon leur distribution des vitesses et accélérations instantanées	269
Annexe 10 : Synthèse des caractéristiques cinématiques des cycles de conduite et règles d'utilisation	271
A.10.1 - Les cycles de conduite sont considérés en tant que trajets entiers	271
A.10.2 - Les conditions types de circulation sont considérées	272
Annexe 11 : Mesure des émissions de polluants sur les cycles représentatifs	273
A.11.1 - Echantillon de véhicules	273
A.11.2 - Emissions de polluants selon les catégories de véhicules	274
A.11.3 - Facteurs d'émission calculés à partir des mesures sur les cycles représentatifs par combinaison des 3 ou 8 cycles	275

Annexe 1 : Bancs d'essai de véhicules et de moteurs

Pour la mesure des émissions ou de la consommation de carburant, on utilise le plus souvent un banc d'essai de véhicules ou banc à rouleaux. La nécessité d'utiliser un banc d'essai provient surtout du fait de la complexité des systèmes de prélèvement et de mesure des concentrations des polluants émis à l'échappement du véhicule. On tente donc de reproduire en laboratoire les conditions de fonctionnement des véhicules. L'objectif du banc d'essai est principalement d'opposer au véhicule l'ensemble des forces de résistances à l'avancement rencontrées sur une route. Le banc dynamométrique est un dispositif de freinage.

Les principales forces mises en jeu lors de l'avancement d'un véhicule sont les forces liées à l'aérodynamique (pénétration du véhicule dans l'air), au roulement (contact pneu chaussée), au profil de la route (en cas de pente), et à l'accélération ou décélération du véhicule. Les forces de gradient et d'accélération sont directement liées à la masse du véhicule, tandis que les forces d'aérodynamique et de roulement sont liées à la vitesse du véhicule.

Un banc d'essais de véhicule doit en conséquence permettre de simuler indépendamment les forces précédentes. Dans ce but, le dispositif se composera le plus souvent d'une partie simulation de la masse du véhicule et d'une partie freinage fonction de la vitesse.

Le banc se compose essentiellement de un ou plusieurs rouleaux (2 ou 4), sur lesquels les roues motrices du véhicules sont maintenues. Plus le diamètre des rouleaux est important, meilleure est la simulation du contact roue (pneu) - chaussée. Sur l'axe de l'un des rouleaux, sont montés:

- un ensemble de masses ou volants d'inertie (pour simuler la masse du véhicule en mouvement); ces volants sont embrayables par pas d'une centaine de kilogrammes, afin d'approcher au mieux la masse du véhicule,
- un dispositif de freinage, ou frein, qui peut être hydraulique, à courants de Foucault, ou une génératrice à courant continu.

Un matériel de contrôle et de régulation de l'ensemble permet de gérer les sécurités, le refroidissement du frein, et la consigne de freinage du banc. Pour les freins hydrauliques et à courants de Foucault, la courbe de freinage en fonction de la vitesse suit une loi pré-établie (fonction du principe même du freinage, par exemple $\text{Couple} = a \times V^2$ pour les courants de Foucault) et on ne peut ajuster que le coefficient de la courbe. Les freins à courants de Foucault et bien entendu la génératrice à courant continu acceptent des systèmes de régulation qui permettent de paramétrer complètement la courbe Couple résistant - Vitesse (en plusieurs points).

Dans le cas d'une génératrice à courant continu ou asynchrone, l'inertie du véhicule peut être simulée électriquement, auquel cas, il n'y a pas ou peu de volants d'inertie. Ce matériel a également l'avantage de pouvoir "pousser le véhicule" c'est à dire de simuler les cas de descente, et plus généralement de simuler en chaque instant des conditions variables de résistance à l'avancement (gradient de la route variable par exemple).

L'utilisation du banc à rouleaux pour un véhicule donné nécessite une calibration tenant compte des caractéristiques propres de résistance à l'avancement du véhicule. Celles-ci peuvent être estimées à partir des caractéristiques techniques du véhicule (C_x , surface frontale, résistance au roulement, etc.) non toujours disponibles. La calibration s'effectue souvent à partir d'un essai sur route, au cours duquel on mesure l'un des paramètres suivants : la dépression à l'admission (pour un véhicule à essence), le temps de décélération entre 2 vitesses moteur débrayé, la consommation, le couple à la roue). On règle la force de freinage du banc de manière à reproduire le paramètre mesuré. On peut utiliser une valeur "forfaitaire" à 50 km/h (Cf. réglementation, ou indications des constructeurs).

Les bancs d'essai de moteur utilisent les mêmes éléments de freinage (hydraulique, courants de Foucault, ou génératrice), accouplés directement en bout de l'arbre du moteur, (il n'y a plus de rouleaux, ni d'inerties). Le moteur est monté directement sur un berceau. Les différentes fonctions nécessaires au moteur (telles que refroidissement de l'eau, de l'huile du moteur, alimentation en carburant, évacuation des gaz d'échappement, etc.) sont assurées par des systèmes extérieurs, qui permettent une régulation et un contrôle mieux maîtrisés de ces paramètres.

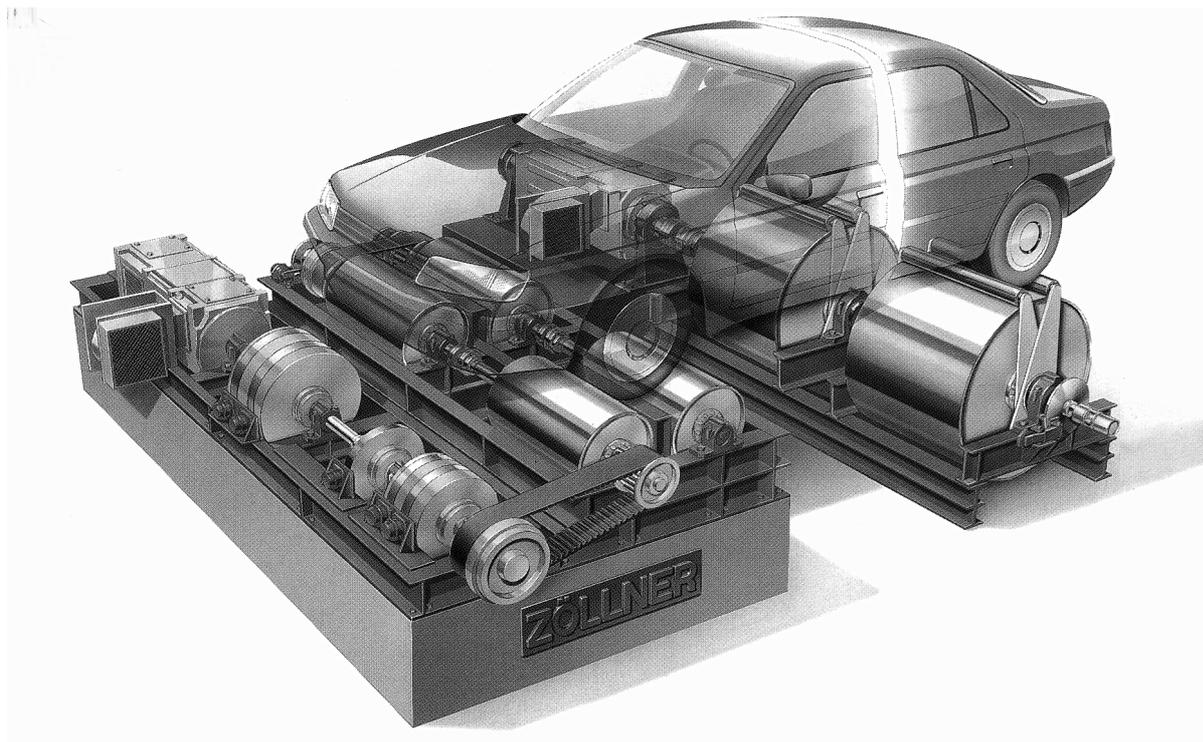


Figure A1.1 : Vue d'ensemble d'un banc à rouleaux (2 architectures sont montrées sur le schéma, bi-rouleaux devant, mono rouleau de grand diamètre en arrière) - Doc. Zöllner

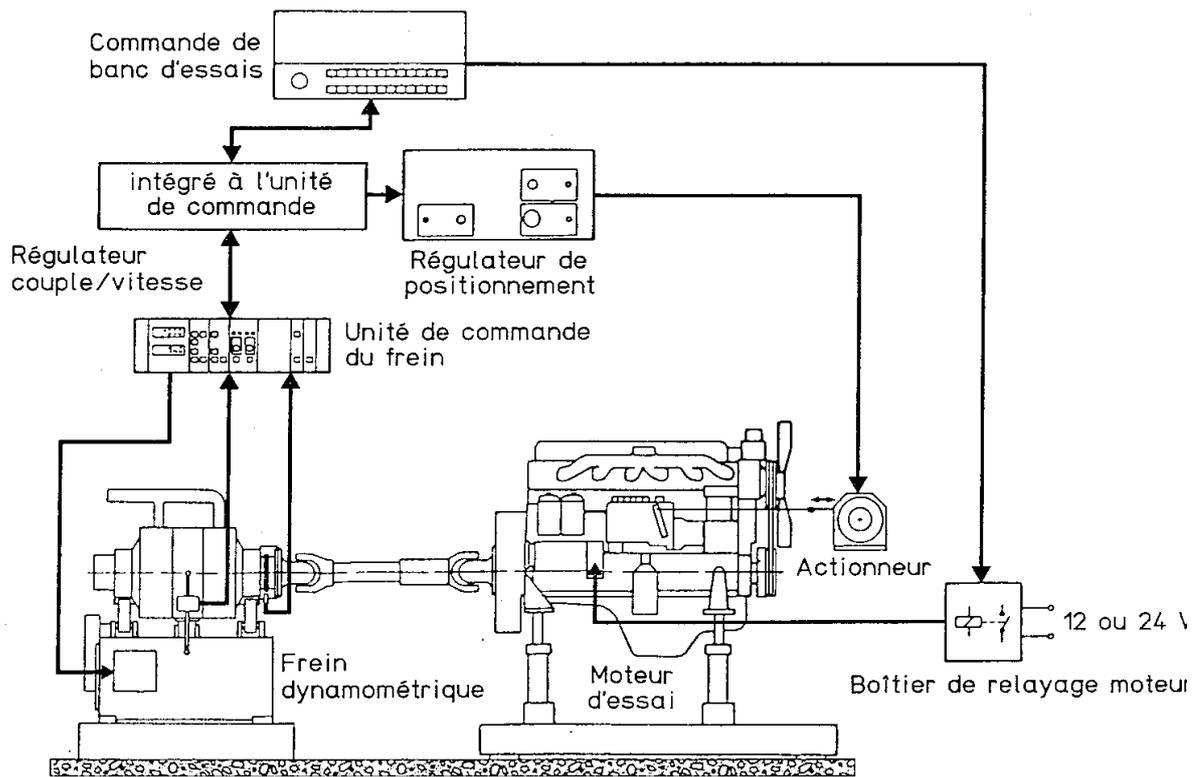


Figure A1.2 : Schéma de principe d'un banc d'essai de moteurs - Doc. Schenck

Annexe 2 : Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules légers

A2.1 : Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules légers (1)

Cycles de conduite	distance (km)	durée (sec.)	vitesse moy. (km/h)	vitesse hors arrêts (km/h)	vitesse maxi. (km/h)	arrêts au km	durée au ralenti %	durée en accél. %	durée en crois. %	durée en décel. %	accél. moy. * (m/s ²)	décél. moy. * (m/s ²)	écart- type des accél. (m/s ²)	P.K.E. (m/s ²)	accél. maxi (m/s ²)	Sources
<i>cycles réglementaires</i>																
FTP 1972 - Federal Test Procedure	11,987	1372	31,5	38,3	91,2	1,42	17,8	33,5	20,1	28,6	0,58	-0,69		0,41	1,63	Degobert, 1992, Gandhi, 1983, Watson, 1983
FTP 1975 - Federal Test Procedure	18,020	1877	34,6	42,1	91,2		18,0	33,1 ou 39,7	20,4	28,5 8,1	0,67	0,71		0,36	1,63	Degobert, 1992, Gandhi, 1983, Watson, 1983, Chou, 1996
Highway (Highway Fuel Economy test)	16,480	765	77,6	77,9	96,4	0,06	0,5	44,2	16,6	38,7				0,14	1,53	Chou, 1996, Newman, 1992, Watson, 1983
Europe ECE 15 (UDC)	4,052	780	18,7	27,6	50,0	2,93	32,3	21,5	29,2	18,5	0,75	-0,75	0,487	0,28	1,05	Newman, 1992, Watson, 1983
Extra-urbain (EUDC)	6,955	400	62,6	69,7	120,0		10,3						0,395			
Europe NEDC (Urb. + extra urbain)	11,007	1180	33,6	44,7	120,0	1,00	24,8	23,4	34,2	18,9	0,51		0,458	0,22	1,04	Beta, 1994
10 modes Japon (1973)	4,000	810	17,8	24,3	40,0	2,72	26,7	24,5	23,6	25,2	0,67	-0,6		0,37	0,82	Newman, 1992, Gandhi, 1983
11 modes Japon (1976)	3,790	476	28,7	36,6		1,05	21,7	34,2	13,3	30,8	0,54	-0,6		0,24	0,69	Watson, 1986, Newman, 1992, Gandhi, 1983
Japon - 10-15 modes	6,340	891	25,6	37,5	70,0	2,00	31,7	26,2	20,9	21,3	0,52			0,32	0,79	Beta, 1994
ADR27A (idem FTP72) Australie	12,000	1372	31,5	38,9	91,2	1,24	19,0				0,58	0,69		0,41	1,47	Australian Standard; Newman, 1992

accél. : accélération ; décél. : décélération ; crois. : croisière ; P.K.E. : énergie cinétique positive moyenne ;

* des définitions différentes des arrêts, phases de ralenti, accélérations, etc. conduisent à des résultats différents selon les sources

A.2.2 - Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules légers (2)

Cycles de conduite	distance (km)	durée (sec.)	vitesse moy. (km/h)	vitesse hors arrêts (km/h)	vitesse maxi. (km/h)	arrêts au km	durée au ralenti %	durée en accél. %	durée en crois. %	durée en décel. %	accél. moy. * (m/s ²)	décél. moy. * (m/s ²)	écart- type des accél. (m/s ²)	P.K.E. (m/s ²)	accél. maxi (m/s ²)	Sources
Autres cycles																
7 modes Californien	9,500	959	35,7	41,8		0,74	14,6				0,68	-0,66		0,4	0,67	Newman, 1992
NYCC	1,898	599	11,4	16,8	44,6		31,9	32,6	2,0	33,4						Chou, 1996, Effa, 1993
CVS-C			31,3				18,0	23,0	39,0	20,0						Gandhi, 1983
SAE Urban	3,218	461	25,1	28,7			12,4	11,0	59,8	16,8						Gandhi, 1983, Evans, 1978
UC - LA92 Cycle - Unified cycle	15,768	1435	39,6	47,1	108,0	0,94	16,0	38,0	12,0	34,0						Chou, 1996
SCC12 - Speed correction at 12 mph	1,931	343	20,3	26,8			24,5	38,8	5,0	31,8						Chou, 1996
LOW1 urbains	0,644	617	3,8	6,9			45,4	18,0	15,1	21,6						Chou, 1996
LOW3	1,126	625	6,5	9,8			34,1	26,1	11,0	28,8						Chou, 1996
UHWY freeway (autor)	9,493	474	72,1	72,7			0,8	39,9	19,0	40,3						Chou, 1996
WHWY	12,550	486	93,0	93,7			0,8	40,1	18,5	40,5						Chou, 1996
XHWY	14,159	492	103,6	104,4			0,8	40,2	18,3	40,7						Chou, 1996
Freeways (autoroutes)																
7	2,414	583	14,9	16,3	63,9		8,4									Effa, 1993
6	6,758	919	26,5	26,9	73,0		1,6									Effa, 1993
5	9,654	909	38,2	38,2	90,9		0,0									Effa, 1993
4	12,711	909	50,3	50,3	99,6		0,0									Effa, 1993
3	16,573	907	65,8	65,8	104,6		0,0									Effa, 1993
2	14,481	607	85,9	85,9	109,4		0,0									Effa, 1993
1	12,550	468	96,5	96,5	114,7		0,0									Effa, 1993
Artères urbaines																
1	5,792	907	23,0	31,5	72,2		27,0									Effa, 1993
2	9,976	931	38,6	41,8	74,5		7,7									Effa, 1993
3	14,481	944	55,2	56,1	88,3		1,6									Effa, 1993

accél. : accélération ; décel. : décélération ; crois. : croisière ; P.K.E. : énergie cinétique positive moyenne ;

* des définitions différentes des arrêts, phases de ralenti, accélérations, etc. conduisent à des résultats différents selon les sources

A.2.3 - Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules légers (3)

Cycles de conduite	distance (km)	durée (sec.)	vitesse moy. (km/h)	vitesse hors arrêts (km/h)	vitesse maxi. (km/h)	arrêts au km	durée au ralenti %	durée en accél. %	durée en crois. %	durée en décel. %	accél. moy. * (m/s2)	décél. moy. * (m/s2)	écart- type des accél. (m/s2)	P.K.E. (m/s2)	accél. maxi (m/s2)	Sources
India-six-4modes	4,020	750	19,3	21,5		1,49	10,4	42,4	12,0	35,2						Gandhi, 1983
Melbourne peak cycle	8,300	980	30,5	39,6		1,08	23,0				0,7	-0,66		0,52		Watson, 1985
Melbourne cold Cycle	10,700	1020	37,8	46,1		1,03	18,0				0,77	-0,85		0,6		Watson, 1985
Sydney D.C.	5,940	637	33,6	41,1		1,35	18,4	34,0	12,9	34,6	0,78	-0,76		0,51	2,7	Kent, 1978
Perth D.C.	14,200	1192	42,9	47,4		0,84	9,6									Newman, 1992
pointe du matin	15,800	1448				1,01	17,8							0,41		Newman, 1992
hors pointe	15,800	1276				0,76	11,0							0,43		Newman, 1992
pointe du soir	18,400	1626				0,98	13,5							0,42		Newman, 1992
11 cycles Tokyo (japon)																
1			4,7				59,9	8,5	22,4	9,2						Yoshizumi,1980
2			8,4				50,9	12,9	23,4	12,8						Yoshizumi,1980
3			11,6				43,2	14,2	27,3	15,3						Yoshizumi,1980
4			14,6				39,1	14,5	31,3	15,1						Yoshizumi,1980
5			18,2				30,4	16,0	36,3	17,3						Yoshizumi,1980
6			20,5				26,3	16,5	40,5	16,7						Yoshizumi,1980
7			23,5				23,2	16,5	43,8	16,5						Yoshizumi,1980
8			27,8				18,5	14,8	51,4	15,3						Yoshizumi,1980
9			35,4				14,4	18,1	49,6	17,9						Yoshizumi,1980
10			44,4				11,2	14,9	58,5	15,4						Yoshizumi,1980
11 (freeways)			34,1				15,8	17,3	49,5	17,3						Yoshizumi,1980
Tokyo-Yoshizumi	9,760	1470	23,9	34,8		1,54	31,3									Yoshizumi,1977
Tokyo-(d'après Sano)	2,640	419	22,7	32,3		1,89	29,8									Newman, 1992,

accél. : accélération ; décél. : décélération ; crois. : croisière ; P.K.E. : énergie cinétique positive moyenne ;

* des définitions différentes des arrêts, phases de ralenti, accélérations, etc.conduisent à des résultats différents selon les sources

A.2.4 - Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules légers (4)

Cycles de conduite	distance	durée	vitesse moy.	vitesse hors arrêts	vitesse maxi.	arrêts au km	durée au ralenti	durée en accél.	durée en crois.	durée en décel.	accél. moy. *	décél. moy. *	écart-type des accél.	P.K.E.	accél. maxi	Sources
	(km)	(sec.)	(km/h)	(km/h)	(km/h)		%	%	%	%	(m/s2)	(m/s2)	(m/s2)	(m/s2)	(m/s2)	
14 cycles urbains européens																
1	3,447	621	20,0		61,0		32,3						0,7			André, 1995
2	0,879	149	21,3		61,3		50,4						0,86			André, 1995
3	1,082	265	14,7		38,2		27,6						0,65			André, 1995
4	0,405	127	11,5		29,4		13,2						0,67			André, 1995
5	6,333	1024	22,3		72,5		30,5						0,91			André, 1995
6	0,131	79	6,0		22,2		22,1						0,66			André, 1995
7	0,840	84	36,0		80,1		15,7						1,01			André, 1995
8	1,107	246	16,2		52,2		29,3						0,66			André, 1995
9	0,202	81	9,0		26,0		21,5						0,47			André, 1995
10	1,867	426	15,8		41,2		30,6						0,72			André, 1995
11	11,346	961	42,5		87,8		3,5						0,6			André, 1995
12	2,443	422	20,9		49,4		18,6						0,69			André, 1995
13	2,620	508	18,6		54,4		29,2						0,82			André, 1995
14	3,413	374	32,9		66,0		18,5						0,75			André, 1995
somme 1-14	36,115	5366	24,2		87,8		23,4						0,74			
3 cycles Thessalonique																
zone A	1,099	170	23,3					13,3	49,8	11,7						Kyriakis, 1992
zone B	2,200	222	35,7					16,8	55,9	11,2						Kyriakis, 1992
zone C	1,558	200	28,0					14,6	53,0	11,3						Kyriakis, 1992
global	1,209	177	24,6					13,7	50,7	11,6						Kyriakis, 1992
4 cycles représentatifs européens																
urbain lent	1,705	428	14,3		42,3		31,3						0,583			Samaras, 1997
urbain fluide	2,248	355	22,8		62,3		20,0						0,702			Samaras, 1997
route	8,485	712	42,9		109,2		13,5						0,685			Samaras, 1997
autoroute	12,683	452	101,0		128,7		2,4						0,418			Samaras, 1997

accél. : accélération ; décel : décélération ; crois. : croisière ; P.K.E. : énergie cinétique positive moyenne ;

* des définitions différentes des arrêts, phases de ralenti, accélérations, etc.conduisent à des résultats différents selon les sources

A.2.5 - Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules légers (5)

Cycles de conduite	distance	durée	vitesse moy.	vitesse hors arrêts	vitesse maxi.	arrêts au km	durée au ralenti	durée en accél.	durée en crois.	durée en décel.	accél. moy. *	décél. moy. *	écart-type des accél.	P.K.E.	accél. maxi	Sources
	(km)	(sec.)	(km/h)	(km/h)	(km/h)		%	%	%	%	(m/s ²)	(m/s ²)	(m/s ²)	(m/s ²)	(m/s ²)	
Cycles courts																
IM240 (USA)		240														
IMODEM court	2,246	255	31,7		69,7		20,0						0,723			Samaras, 1997
TÜV - court	1,969	200	35,4		90,0		25,5						0,535			Samaras, 1997
3 et 8 cycles urbains et extra-urbains européens développés dans ce cadre (cf. chapitre 6)																
1 autoroute	46,205		92,2	95,4		0,11	3,4				0,73	-0,92	0,52			cf. chapitre 6
2 route	11,224		47,9	53,5		0,53	10,4				0,72	-0,93	0,66			
3 urbain	3,470		22,3	29,6		1,73	24,6				0,79	-0,79	0,60			
4 autoroute (b)	42,702		82,3	89,0		0,19	7,5				0,67	-0,78	0,57			
5 route (b)	7,820		40,2	44,3		0,51	9,3				0,82	-0,77	0,63			
6 route (c)	27,327		65,8	68,0		0,18	3,2				0,62	-0,80	0,52			
7 urbain (b)	4,185		20,9	28,6		3,35	26,9				0,81	-0,97	0,70			
8 urbain (c)	2,914		18,0	22,9		4,12	21,3				0,71	-0,75	0,55			

accél. : accélération ; décél. : décélération ; crois. : croisière ; P.K.E. : énergie cinétique positive moyenne ;

* des définitions différentes des arrêts, phases de ralenti, accélérations, etc. conduisent à des résultats différents selon les sources

Annexe 3 : Variables caractéristiques de cycles de conduite pour véhicules lourds

Cycles de conduite	distance	durée	vitesse moy.	vitesse hors arrêts	vitesse maxi.	arrêts au km	durée au ralenti	durée en accél.	durée en crois.	durée en décel.	accél moy.	décél moy.	R.M.S.	P.K.E.	accél maxi	Sources
	(km)	(sec.)	(km/h)	(km/h)	(km/h)	a/km	%	%	%	%	(m/s ²)					
Véhicules utilitaires																
CBD (Central Business District, bus)	3,23	574	20,3	25,3	32,2	4,00	20,0	24,4	44,6	11	0,89		1,35	0,35	1,79	Beta, 1994, Clark, 1995
NYTRUCK (New-York Truck)	3,44	1016	12,2	25,3	54,7	4,00	51,9	20,85	9,67	17,6	0,64		0,82	0,53	2,24	Beta, 1994
D-CYCLE (HDTC, Heavy-duty Truck cycle)	8,92	1060	30,3	44,6	93,3	1,00	32,0	21,22	26,87	19,87	0,68		0,8	0,31	2,68	Beta, 1994
ECE (petits utilitaires < 3,5t)	11,02	1220	32,5	42,6	120,0	1,00	23,6	23,36	34,18	18,85	0,51		0,63	0,22	1,04	Beta, 1994
NYBUS (New-York Bus)	0,99	600	5,9	17,1	49,6	11,00	65,3	12,67	0	22	1,17		1,11	0,76	2,77	Beta, 1994
NYCOMPOSITE (New-York Composite)	4,06	1029	14,2	20,0	57,9	4,00	29,2	34,11	7,77	28,96	0,48		0,71	0,49	5,41	Beta, 1994
BAC (Transit Coach Operating Duty Cycle - Business Arterial Commuter)	22,53	2830	28,7	36,5	88,5	2,00	21,4	27,7	39,58	11,31	0,69		1,14	0,29	1,07	Beta, 1994
Truck CBD (TCBD) WVU 5 peak truck cycle	3,20		CBD modifié pour camions - accélérations plus faibles 5 trapèzes à 5 niveaux de vitesses différents													Clark 1995 Clark 1995
TNO - urban bus driving cycle	5,24	1158	16,3	28,9	63,0	2,67	43,7									Van de Weijer, 1993
VTT - city bus driving cycle	pas d'information disponible															Mäkelä, 1996

Annexe 4 : Variables descriptives des séquences entre arrêts, segments cinématiques et trajets

A.4.1 - Comparaison des séquences cinématiques entre arrêts et segments de longueur variable

Variables calculées sur un échantillon de 20% des trajets enregistrés (1950 trajets) soit 17000 km et 420 heures de conduite

Variables	séquences entre arrêts			segments cinématiques		
	moyenne	écart-type	mini-maxi	moyenne	écart-type	mini-maxi
durée (mn)	2,20	4,17	0,1 à 110,8	1,75	0,86	0,3 à 40,0
distance (km)	1,52	6,43	0,0 à 215,7	1,19	0,83	0,0 à 4,9
nombre d' arrêts	1,00	0,00	1,0 à 0,0	0,78	1,05	0,0 à 15,0
durée arrêt (mn)	0,36	0,49	0,0 à 19,9	0,31	0,75	0,0 à 39,1
durée de route (mn)	1,84	4,14	0,1 à 110,8	1,44	0,42	0,0 à 5,3
durée en décélération (mn)	0,45	0,69	0,0 à 14,6	0,36	0,20	0,0 à 1,4
durée en stabilisé (mn)	0,91	2,95	0,0 à 83,0	0,71	0,40	0,0 à 4,1
durée en accélération (mn)	0,47	0,74	0,0 à 16,1	0,37	0,20	0,0 à 1,2
vitesse moyenne (km/h)	21,42	17,89	0,1 à 147,5	45,24	32,75	0,1 à 181,8
vitesse hors arrêts(km/h)	26,93	18,07	1,6 à 147,8	49,09	30,47	1,8 à 182,3
écart-type vitesse (km/h)	12,03	7,15	0,3 à 52,4	13,83	6,69	0,8 à 64,4
vitesse maximale (km/h)	43,58	28,44	1,9 à 193,1	68,95	30,19	0,0 à 193,1
écart-type des accélérations (m/s ²)	0,70	0,26	0,1 à 2,0	0,60	0,26	0,0 à 2,1
percentile 25% accélération (m/s ²)	-0,53	0,30	-3,1 à 0,0	-0,37	0,26	-3,5 à 0,4
percentile 75% accélération (m/s ²)	0,45	0,26	-0,3 à 1,9	0,39	0,25	-0,5 à 2,4
accélération négative moyenne (m/s ²)	-0,82	0,28	-2,8 à -0,3	-0,78	0,27	-3,2 à -0,3
accélération positive moyenne (m/s ²)	0,78	0,22	0,3 à 2,0	0,70	0,21	0,3 à 2,0
nombre d' d'accélérations	4,12	6,82	0,0 à 179,0	3,34	2,02	0,0 à 15,0
nbre de fortes accélérations	1,33	1,57	0,0 à 29,0	1,06	1,15	0,0 à 7,0
nombre de mini-maxi	9,63	22,85	0,0 à 755,0	7,55	4,86	0,0 à 53,0
température eau moteur début (°C)	71,27	25,05	-11,4 à 117,2	74,41	21,60	-11,4 à 117,2
température huile moteur début (°C)	62,39	27,84	-6,8 à 118,0	65,96	27,74	-6,8 à 122,3
température air ambiant début (°C)	16,63	8,19	-11,6 à 46,0	16,63	8,34	-11,6 à 42,0

A4.2 - Forme de la distribution des variables et indicateurs - cas des séquences cinématiques entre arrêts

séquence entre arrêts
valeurs calculées sur un échantillon de 11200 séquences représentant 20% des trajets enregistrés

distance (km)	H		moyenne	1.52
	H		médiane	0.35
	H		écart-type	6.4
	H		Asymétrie	15.5
	H	L = 0.0	Aplatissement	348.6
	H	U = 300.0	mini - maxi	0 - 216
L-----U				
durée de route (hors arrêts, mn)	H		moyenne	1,83
	H		médiane	0,83
	H		écart-type	4,14
	H		Asymétrie	10,2
	H	L = 0.0	Aplatissement	159,7
	H	U = 120.0	mini - maxi	0 - 111
L-----U				
vitesse de route (hors arrêts, km/h)	H		moyenne	26,9
	HH H		médiane	24,3
	HHHHH		écart-type	18,1
	HHHHHH		Asymétrie	1,3
	HHHHHHHH	L = 0.0	Aplatissement	2,9
	HHHHHHHHH	U = 200.0	mini - maxi	2 - 148
L-----U				
écart-type des vitesses instantanées (km/h)	HHH		moyenne	12,0
	HHHHH		médiane	11,7
	HHHHHHHHH		écart-type	7,1
	HHHHHHHHHH		Asymétrie	0,8
	HHHHHHHHHHH	L = 0.0	Aplatissement	1,3
	HHHHHHHHHHH	U = 60.0	mini - maxi	0,3 - 52
L-----U				
écart-type des accélérations instantanées (m/s ²)	HHH		moyenne	0,70
	HHHHH		médiane	0,69
	HHHHHHH		écart-type	0,26
	HHHHHHHHH		Asymétrie	0,5
	HHHHHHHHHH	L = 0.05	Aplatissement	0,7
	HHHHHHHHHHH	U = 2.05	mini - maxi	0,1 - 2,0
L-----U				
accélération positive moyenne (m/s ²)	HHH		moyenne	0,78
	HHH		médiane	0,75
	HHHHH		écart-type	0,22
	HHHHHHH		Asymétrie	0,8
	HHHHHHHHH	L = 0.15	Aplatissement	1,5
	HHHHHHHHHH	U = 2.15	mini - maxi	0,3 - 2,0
L-----U				
température ambiante au départ (°C)	H		moyenne	16,6
	H		médiane	16,0
	H		écart-type	8,2
	HHHH		Asymétrie	0,2
	HHHHHHHH H	L = -12.0	Aplatissement	-0,2
	HHHHHHHHHH	U = 48.0	mini - maxi	-12 +48
L-----U				
température eau du moteur au départ (°C)	HH		moyenne	71
	HH		médiane	80
	HH		écart-type	25
	HHH		Asymétrie	-1,0
	HHHH	L = -45.0	Aplatissement	0,1
	HHHHHH	U = 155.0	mini - maxi	-10 - 117
L-----U				

A4.4 - Variables descriptives des trajets

Variables calculées sur l'ensemble des 9640 trajets enregistrés sur 77 véhicules européens, soit 80000 km parcourus et 2000 heures de conduite

	moy.	écart-type	mini	maxi	asymétrie	aplatissement
distance (km)	8,4	21,2	0,0	462,6	8,9	109,4
durée (mn)	12,5	16,2	0,1	241,3	4,6	33,4
durée à l'arrêt (mn)	2,3	3,0	0,0	39,1	2,5	18,9
durée hors arrêts (mn)	10,2	14,7	0,0	233,9	5,3	44,0
nombre d'arrêts	5,8	6,4	0,0	76,0	3,6	20,0
durée relative à l'arrêt %	21,6	15,4	0,1	100,0	1,4	3,0
fréquence d'arrêts / km	3,41	8,17	0,00	100,00	6,2	47,9
vitesse moyenne (km/h)	28,4	17,2	0,1	139,8	1,5	3,9
vitesse moyenne hors arrêts (km/h)	34,6	17,2	1,8	140,4	1,3	3,4
décélération moyenne (m/s ²)	-0,83	0,16	-2,13	-0,31	-0,5	2,0
accélération moyenne (ms ²)	0,76	0,14	0,31	1,74	0,6	2,2
température d'eau du moteur au départ °C	50,6	29,3	-11,4	125,3	0,1	-1,2
température d'huile du moteur au départ °C	43,9	26,3	-6,8	116,4	0,4	-0,8
température d'air ambiant au départ °C	14,9	8,0	-9,5	51,5	0,2	-0,2
nombre total de segments	7,1	9,8	1,0	154,0	5,2	42,2

A4.5 - Variables descriptives des trajets (2)

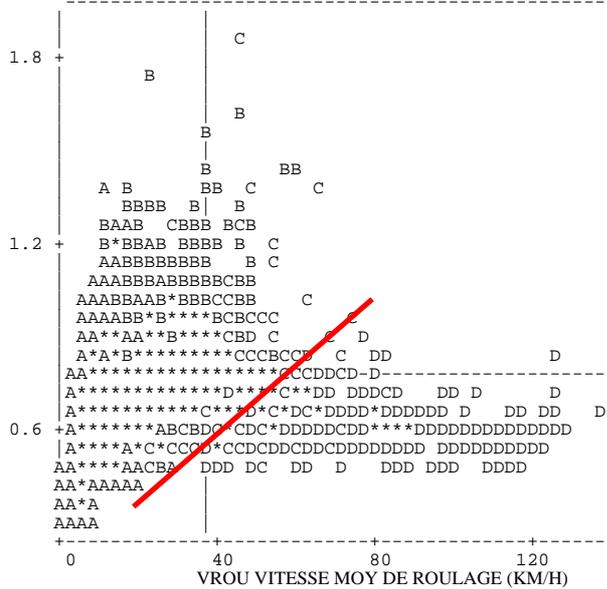
nombre et fréquences des segments cinématiques constitutifs des trajets (selon la classe à laquelle ils appartiennent - typologies en 4 ou 12 classes)

Variables calculées sur l'ensemble des 9640 trajets enregistrés sur 77 véhicules européens, soit 80000 km parcourus et 2000 heures de conduite

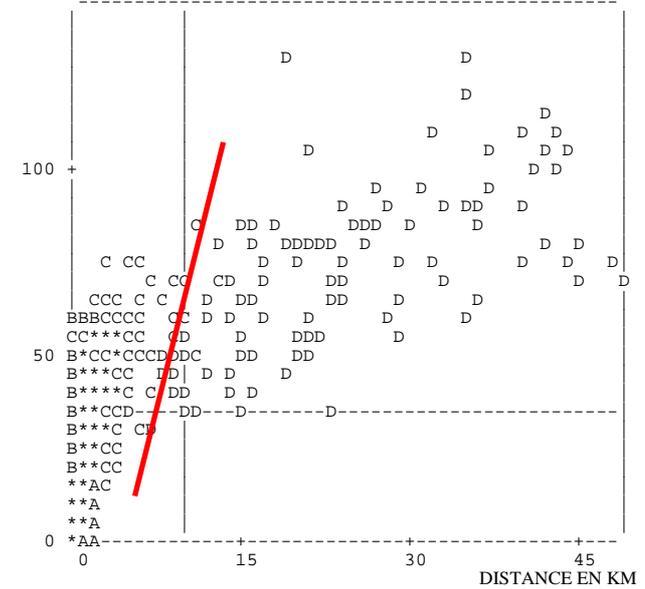
	moy.	écart-type	mini	maxi	asymétrie	aplatissement
nombre total de segments	7,1	9,8	1,0	154,0	5,2	42,2
Typologie des conditions de circulation en 4 classes						
nombre de segments :						
type 1 / 4	2,9	2,9	0,0	37,0	3,3	17,5
type 2 / 4	2,9	4,0	0,0	61,0	3,4	21,9
type 3 / 4	0,7	2,4	0,0	43,0	7,7	82,0
type 4 / 4	0,7	4,7	0,0	126,0	12,7	203,0
fréquence des segments en % durée :						
type 1/4	63,8	32,2	0,0	100,0		
type 2/4	30,1	27,9	0,0	100,0		
type 3/4	3,9	9,7	0,0	100,0		
type 4/4	2,2	9,1	0,0	100,0		
Typologie des conditions de circulation en 12 classes						
nombre de segments :						
type 1 / 12	0,6	1,0	0,0	10,0	2,2	7,1
type 2 / 12	0,9	1,2	0,0	17,0	2,6	13,3
type 3 / 12	0,4	0,8	0,0	16,0	3,8	34,0
type 4 / 12	0,6	1,3	0,0	27,0	5,0	48,0
type 5 / 12	1,2	1,5	0,0	16,0	2,1	6,9
type 6 / 12	0,7	1,4	0,0	20,0	3,2	17,3
type 7 / 12	0,7	1,5	0,0	21,0	4,6	33,7
type 8 / 12	0,4	1,2	0,0	26,0	6,6	68,0
type 9 / 12	0,5	1,8	0,0	46,0	8,7	127,0
type 10 / 12	0,3	2,1	0,0	59,0	14,5	270,0
type 11 / 12	0,2	1,2	0,0	30,0	11,1	173,0
type 12 / 12	0,4	3,3	0,0	74,0	13,3	213,0
fréquence des segments en % durée :						
type 1 / 12	14,9	24,9	0,0	100,0		
type 2 / 12	21,2	28,4	0,0	100,0		
type 3 / 12	12,7	26,7	0,0	100,0		
type 4 / 12	8,5	17,6	0,0	100,0		
type 5 / 12	19,1	24,7	0,0	100,0		
type 6 / 12	7,2	13,4	0,0	100,0		
type 7 / 12	6,6	12,8	0,0	100,0		
type 8 / 12	2,7	7,3	0,0	81,4		
type 9 / 12	3,5	9,1	0,0	100,0		
type 10 / 12	1,2	5,6	0,0	86,5		
type 11 / 12	1,3	5,0	0,0	81,9		
type 12 / 12	1,2	6,2	0,0	96,2		

Annexe 5 : Comparaison des méthodes de caractérisation des conditions de circulation

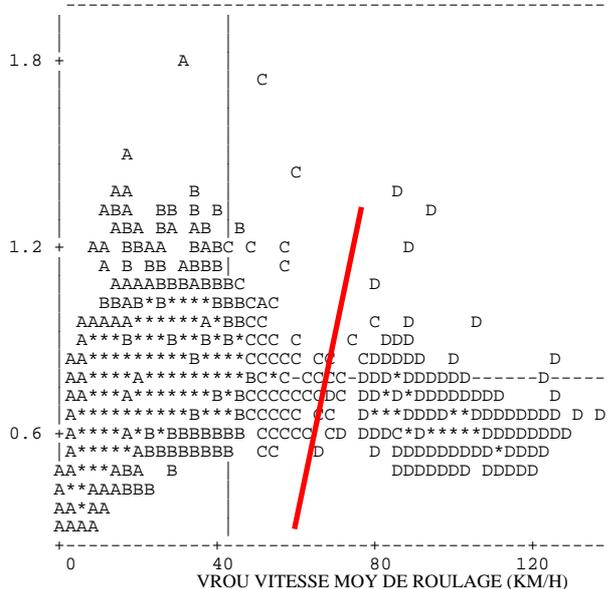
SCHEMA : ACP - CLASSIFICATION - VARIABLES [André, 1991]
SUR SEQUENCES ENTRE ARRETS
ACPO ACCELERATION POSITIVE MOYENNE (M/S2)



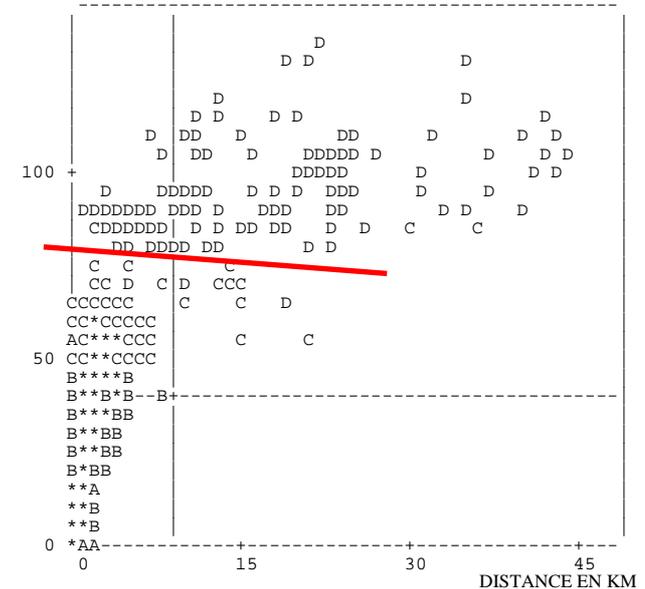
VROU VITESSE MOY DE ROULAGE (KM/H)



SCHEMA : ACB - CLASSIFICATION -- Distribution VIT. ACCELERATIONS
SUR SEQUENCES ENTRE ARRETS
ACPO ACCELERATION POSITIVE MOYENNE (M/S2)



VROU VITESSE MOY DE ROULAGE (KM/H)



Comparaison de l'affectation des séquences cinématiques entre arrêts selon le schéma d'analyse :
On a matérialisé la ligne de séparation des séquences cinématiques affectées à la classe de circulation autoroutière. Cette séparation se fait plutôt en distance dans le cas de l'A.C.P. (et classification) sur les indicateurs globaux (distance, durée, vitesse moyenne, coefficients de forme [André, 1991]) (en haut)
Elle se fait plutôt en niveau de vitesse dans le cas de l'Analyse des Correspondances Binaires (et classification) sur la distribution croisée des vitesses et accélérations (en bas).

Annexe 6 : Bilan des expérimentations

(Compléments du chapitre 6)

A6.1 - Véhicules expérimentés

	Nombre de véhicules	localisation	modèles	années
Projet DRIVE-modem				
• Allemagne	19	Cologne, Krefeld	Volkswagen Golf & Golf Diesel, Ford Fiesta, Renault 21, Audi 100	1982-89
• France	21	Marseille, Grenoble	Citroën BX 19 Diesel, Renault 5 & 21, Ford Fiesta, Peugeot 205	1980-89
• Grande-Bretagne	18	Londres, Derby	Austin Metro, Ford Granada & Escort Diesel, Peugeot 205, Volkswagen Golf GTI, Vauxhall Cavalier	1981-89
ProjetHYZEM				
• Grèce	19	Athènes	18 modèles différents	
• France	2	La Rochelle Paris	Peugeot 106 électrique	1995

Tableau A6.1 : Villes et modèles retenus pour les expérimentations DRIVE-modem et HY-ZEM

A6.2 - Correction des accélérations

Les premières analyses ont permis d'identifier une inconsistance des accélérations des données enregistrées à Athènes, due à une précision plus faible de la mesure des vitesses (variable selon les véhicules mais le plus souvent supérieure à 3 km/h contre 0.7 km/h environ pour les autres fichiers). Le calcul des accélérations à partir des vitesses (sur 3 secondes) conduit à des valeurs beaucoup plus élevées. Afin de tenir néanmoins compte de ces données, une correction a été effectuée, par un lissage des vitesses mesurées. Le degré de lissage optimal pour rétablir des accélérations cohérentes a été établi par comparaison des principales caractéristiques de conduite (vitesse moyenne et de circulation, durée et fréquence des arrêts) mesurées et des valeurs d'accélérations selon les villes d'expérimentation. La similitude d'Athènes et Marseille du point de vue des caractéristiques de circulation (les plus mauvaises, cf. tableau A6.2) a permis d'établir la nécessité d'un lissage sur 4 points des vitesses, tandis qu'un lissage sur 5 points atténuerait beaucoup trop les accélérations (tableau A6.3).

	vitesse moyenne (km/h)	vitesse hors arrêts (km/h)	durée à l'arrêt (%)	fréquence des arrêts / km	écart-type des accélérations (m/s ²)
Grenoble	42,0	51,7	18,7	0,652	0,614
Marseille	30,8	40,2	23,4	1,070	0,663
Cologne	46,5	55,1	15,7	0,565	0,596
Krefeld	56,2	65,2	13,8	0,417	0,594
Londres	39,3	46,8	16,1	0,733	0,627
Derby	44,5	49,9	10,8	0,455	0,524
Athènes	32,4	42,0	22,9	0,944	voir ci-dessous
(La Rochelle)	23,7	31,8	25,4	1,494	0,525
(Paris)	22,8	28,4	19,6	1,355	0,475

Tableau A6.2 : Conditions moyennes de circulation calculées pour les différentes villes

	écart-type des accélérations (m/s ²)	25% de la distribution des accélérations	75% de la distribution des accélérations	décélération moyenne (m/s ²)	accélération moyenne (m/s ²)
Marseille	0,663	-0,43	+0,42	-0,82	+0,73
Athènes sans lissage	0,788	-0,53	+0,52	non calculé	non calculé
lissage sur 3 points	0,709	-0,47	+0,47	-0,83	+0,76
4 points	0,668	-0,45	+0,44	-0,81	+0,74
5 points	0,628	-0,42	+0,42	-0,77	+0,71

Tableau A6.3 : Comparaison des accélérations entre les données enregistrées à Marseille, et celles à Athènes selon le degré de lissage des vitesses

A6.3 - Usages des véhicules

Etudes	nombre de journées	nombre moyen de trajets par jour	durées journalières (min.)	distances journalières (km)
sur l'ensemble des journées				
Drive-modem (90-91)				
Allemagne	406	6.2	76	68
France	603	5.0	62	38
Grande-Bretagne	363	5.1	63	45
HyZem (95-96)				
Athènes	564	3.9	52	27
Ensemble	1 936	5.0	62	43
Eurev France				
1983	750	5.0	54	37
1989	1 180	5.6	66	42
Ensemble	1 930	5.4	62	41
sur les journées incluant au moins une utilisation				
Drive-modem (90-91)				
Allemagne	366	6.8	84	75
France	494	6.0	74	46
Grande-Bretagne	304	6.1	75	54
HyZem (95-96)				
Grèce	334	6.2	82	43
Ensemble	1 498	6.3	79	54

Tableau A6.4 : Usages journaliers moyens observés au travers des différentes expérimentations (sur l'ensemble des journées de suivi et sur les journées incluant au moins une utilisation du véhicule)

Etudes	longueur moyenne des trajets (km)	durée moyenne des trajets (mn)	vitesse moyenne (km/h)	fréquence des arrêts / km (intersections, etc.)
Drive-modem (90-91)				
Allemagne	9.7	11.7	49.8	0.52
France	7.6	12.3	37.0	0.80
Grande-Bretagne	8.8	12.4	42.7	0.55
HyZem (95-96)				
Athènes	7.4	13.9	31.7	1.16
Ensemble	8,4	12,5	40,6	0,72
HyZem (95-96)				
véhicules électriques	13,5	34,9	23,2	1,42
Eurev France				
1983	7.0	10.5	39.9	0.66
1989	7.3	11.5	38.1	0.77
Ensemble	7.2	11.0	38.7	0.74

Tableau A6.5 : Caractéristiques moyennes des trajets selon les expérimentations

Annexe 7 : Typologie des conditions de circulation

(résultats des chapitres 5.3.4. et 6.3)

A7.1 - Analyse des correspondances binaires des segments cinématiques décrits par distribution croisée des vitesses et accélérations et la durée d'arrêt

Analyse de l'ensemble des 9640 trajets soit 69000 segments cinématiques

```

NOMBRE DE SEGMENTS
-----
ACTIFS ..... NIACT = 68890      PIACT = 120967.578
-----
  
```

```

EDITION DES VALEURS PROPRES
SOMME DES VALEURS PROPRES .... 3.6044
  
```

A7.1.1 - Histogramme des 30 premières valeurs propres

NUM	VALEUR PROPRE	POURCENT. CUMULE		
1	0.8665	24.04	24.04	*****
2	0.5856	16.25	40.29	*****
3	0.4117	11.42	51.71	*****
4	0.2956	8.20	59.91	*****
5	0.2172	6.02	65.93	*****
6	0.2151	5.97	71.90	*****
7	0.1502	4.17	76.07	*****
8	0.1342	3.72	79.79	*****
9	0.0971	2.69	82.49	*****
10	0.0801	2.22	84.71	*****
11	0.0639	1.77	86.48	*****
12	0.0534	1.48	87.96	*****
13	0.0483	1.34	89.30	*****
14	0.0443	1.23	90.53	*****
15	0.0398	1.10	91.64	****
16	0.0364	1.01	92.64	****
17	0.0335	0.93	93.58	****
18	0.0291	0.81	94.38	***
19	0.0279	0.78	95.16	***
20	0.0262	0.73	95.89	***
21	0.0247	0.69	96.57	**
22	0.0227	0.63	97.20	**
23	0.0200	0.55	97.76	**
24	0.0184	0.51	98.27	**
25	0.0163	0.45	98.72	**
26	0.0142	0.39	99.11	**
27	0.0137	0.38	99.49	**
28	0.0090	0.25	99.74	*
29	0.0056	0.16	99.89	*
30	0.0038	0.11	100.00	*

A7.1.2 - Coordonnées, contributions et cosinus carrés des fréquences sur les axes 1 à 5

(ViAj : classes de vitesses en km/h, d'accélération en m/s²)

FREQUENCES			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRES				
IDEN - LIBELLE COURT	P.REL	DISTO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
FREQUENCES ACTIVES																	
DARW - DARW DUREE ARRET PON	18.35	1.49	0.47	0.55	0.56	-0.53	-0.43	4.7	9.3	14.0	17.5	15.5	0.15	0.20	0.21	0.19	0.12
V1A1 (0 a 20 ; -9.9 à-0.6)	3.36	0.87	0.41	0.29	0.11	0.06	0.13	0.7	0.5	0.1	0.0	0.2	0.19	0.10	0.02	0.00	0.02
V1A2 (0 a 20 ; -0.6 à-0.2)	3.43	1.61	0.46	0.48	0.38	-0.08	0.36	0.8	1.4	1.2	0.1	2.0	0.13	0.14	0.09	0.00	0.08
V1A3 (0 a 20 ; -0.2 à+0.2)	4.59	3.00	0.48	0.57	0.50	-0.12	0.62	1.2	2.6	2.8	0.2	8.1	0.08	0.11	0.08	0.01	0.13
V1A4 (0 a 20 ; +0.2 à+0.6)	2.71	1.91	0.47	0.53	0.40	-0.03	0.49	0.7	1.3	1.0	0.0	2.9	0.12	0.15	0.08	0.00	0.12
V1A5 (0 a 20 ; +0.6 à+9.9)	3.92	0.89	0.44	0.35	0.17	0.03	0.10	0.9	0.8	0.3	0.0	0.2	0.21	0.14	0.03	0.00	0.01
V2A1 (20 a 40 ; -9.9 à-0.6)	4.10	0.90	0.38	0.12	-0.17	0.30	0.11	0.7	0.1	0.3	1.3	0.2	0.16	0.02	0.03	0.10	0.01
V2A2 (20 a 40 ; -0.6 à-0.2)	3.08	1.77	0.44	0.31	-0.06	0.49	0.49	0.7	0.5	0.0	2.5	3.4	0.11	0.05	0.00	0.13	0.13
V2A3 (20 a 40 ; -0.2 à+0.2)	4.61	2.63	0.45	0.34	-0.05	0.60	0.69	1.1	0.9	0.0	5.7	10.2	0.08	0.05	0.00	0.14	0.18
V2A4 (20 a 40 ; +0.2 à+0.6)	3.70	1.53	0.44	0.28	-0.11	0.50	0.39	0.8	0.5	0.1	3.1	2.6	0.12	0.05	0.01	0.16	0.10
V2A5 (20 a 40 ; +0.6 à+9.9)	4.34	0.90	0.38	0.10	-0.17	0.23	-0.04	0.7	0.1	0.3	0.8	0.0	0.16	0.01	0.03	0.06	0.00
V3A1 (40 a 60 ; -9.9 à-0.6)	2.42	1.63	0.24	-0.33	-0.51	0.16	-0.18	0.2	0.5	1.5	0.2	0.4	0.04	0.07	0.16	0.02	0.02
V3A2 (40 a 60 ; -0.6 à-0.2)	3.39	1.93	0.33	-0.23	-0.76	0.55	-0.31	0.4	0.3	4.7	3.5	1.5	0.06	0.03	0.30	0.16	0.05
V3A3 (40 a 60 ; -0.2 à+0.2)	7.08	2.62	0.34	-0.25	-0.94	0.75	-0.46	1.0	0.7	15.2	13.4	7.0	0.04	0.02	0.34	0.21	0.08
V3A4 (40 a 60 ; +0.2 à+0.6)	3.95	1.74	0.31	-0.29	-0.74	0.40	-0.32	0.4	0.6	5.3	2.1	1.9	0.06	0.05	0.31	0.09	0.06
V3A5 (40 a 60 ; +0.6 à+9.9)	2.09	2.03	0.20	-0.39	-0.41	-0.03	-0.29	0.1	0.5	0.9	0.0	0.8	0.02	0.08	0.08	0.00	0.04
V4A1 (60 a 80 ; -9.9 à-0.6)	0.85	5.29	-0.18	-1.05	-0.21	-0.37	-0.21	0.0	1.6	0.1	0.4	0.2	0.01	0.21	0.01	0.03	0.01
V4A2 (60 a 80 ; -0.6 à-0.2)	1.81	4.50	-0.03	-1.27	-0.65	-0.88	0.22	0.0	5.0	1.9	4.8	0.4	0.00	0.36	0.09	0.17	0.01
V4A3 (60 a 80 ; -0.2 à+0.2)	4.68	5.61	0.00	-1.46	-0.86	-1.34	0.55	0.0	17.1	8.5	28.5	6.4	0.00	0.38	0.13	0.32	0.05
V4A4 (60 a 80 ; +0.2 à+0.6)	2.08	4.40	-0.09	-1.33	-0.45	-0.86	0.16	0.0	6.3	1.0	5.3	0.2	0.00	0.40	0.05	0.17	0.01
V4A5 (60 a 80 ; +0.6 à+9.9)	0.68	7.32	-0.26	-0.99	-0.02	-0.34	-0.52	0.1	1.1	0.0	0.3	0.8	0.01	0.13	0.00	0.02	0.04
V5A1 (80 a 100 ; -9.9 à-0.6)	0.37	12.83	-0.94	-1.10	0.53	0.06	-0.81	0.4	0.8	0.3	0.0	1.1	0.07	0.09	0.02	0.00	0.05
V5A2 (80 a 100 ; -0.6 à-0.2)	0.94	9.77	-0.91	-1.75	1.22	0.38	-0.21	0.9	4.9	3.4	0.5	0.2	0.09	0.31	0.15	0.01	0.00
V5A3 (80 a 100 ; -0.2 à+0.2)	3.10	12.08	-0.97	-2.24	2.03	0.94	0.26	3.4	26.7	31.2	9.2	1.0	0.08	0.42	0.34	0.07	0.01
V5A4 (80 a 100 ; +0.2 à+0.6)	1.16	9.68	-1.02	-1.57	1.17	0.36	-0.41	1.4	4.9	3.8	0.5	0.9	0.11	0.25	0.14	0.01	0.02
V5A5 (80 a 100 ; +0.6 à+9.9)	0.26	20.26	-0.97	-0.90	0.39	-0.06	-1.31	0.3	0.4	0.1	0.0	2.0	0.05	0.04	0.01	0.00	0.09
V6A1 (100 a 999 ; -9.9 à-0.6)	0.35	24.78	-2.20	0.22	0.02	-0.01	-1.85	1.9	0.0	0.0	0.0	5.4	0.19	0.00	0.00	0.00	0.14
V6A2 (100 a 999 ; -0.6 à-0.2)	1.05	12.40	-2.53	0.49	-0.06	0.02	-0.81	7.8	0.4	0.0	0.0	3.1	0.52	0.02	0.00	0.00	0.05
V6A3 (100 a 999 ; -0.2 à+0.2)	6.06	10.11	-2.88	0.97	-0.35	-0.09	0.51	58.0	9.7	1.8	0.2	7.2	0.82	0.09	0.01	0.00	0.03
V6A4 (100 a 999 ; +0.2 à+0.6)	1.35	13.65	-2.54	0.53	-0.08	-0.01	-1.16	10.0	0.6	0.0	0.0	8.3	0.47	0.02	0.00	0.00	0.10
V6A5 (100 a 999 ; +0.6 à+9.9)	0.15	60.40	-2.00	0.05	0.08	-0.04	-2.81	0.7	0.0	0.0	0.0	5.4	0.07	0.00	0.00	0.00	0.13
FREQUENCES ILLUSTRATIVES																	
DURE - DUREE EN MINUTES	99.94	0.09	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DUNE - DUNE DUREE EN ACCELE	20.49	0.40	0.14	-0.07	-0.12	0.14	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05	0.01	0.03	0.05	0.00
DUST - DUST DUREE EN STABIL	39.92	0.48	-0.37	-0.18	-0.14	0.13	0.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.29	0.07	0.04	0.04	0.13
DUPO - DUPO DUREE EN ACCELE	21.12	0.40	0.16	-0.06	-0.10	0.10	-0.09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.06	0.01	0.02	0.03	0.02
VIT1 (0 a 20 ; -)	18.00	0.98	0.45	0.45	0.32	-0.03	0.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.21	0.21	0.10	0.00	0.12
VIT2 (20 a 40 ; -)	19.83	0.81	0.42	0.23	-0.11	0.42	0.33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.21	0.06	0.02	0.22	0.13
VIT3 (40 a 60 ; -)	18.93	1.23	0.31	-0.28	-0.75	0.48	-0.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.06	0.46	0.19	0.10
VIT4 (60 a 80 ; -)	10.10	3.35	-0.06	-1.33	-0.63	-1.01	0.27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.53	0.12	0.31	0.02
VIT5 (80 a 100 ; -)	5.83	7.51	-0.97	-1.90	1.56	0.63	-0.09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13	0.48	0.33	0.05	0.00
VIT6 (100 a 999 ; -)	8.96	8.28	-2.75	0.80	-0.26	-0.06	-0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.91	0.08	0.01	0.00	0.00
AC01 (-- -9.9 a -1.0)	2.74	1.69	0.19	-0.17	-0.20	0.07	-0.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02
AC02 (-- -1.4 a -0.6)	8.71	0.51	0.20	-0.01	-0.11	0.15	-0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.00	0.02	0.05	0.00
AC03 (-- -0.6 a -0.2)	13.70	0.30	0.03	-0.12	-0.11	0.14	0.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.05	0.04	0.06	0.02
AC04 (-- -0.2 a +0.2)	30.12	0.52	-0.46	-0.18	-0.15	0.12	0.31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.41	0.06	0.04	0.03	0.18
AC05 (-- 0.2 a +0.6)	14.96	0.33	-0.04	-0.17	-0.13	0.13	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.09	0.05	0.05	0.00
AC06 (-- 0.6 a +1.0)	6.54	0.58	0.24	-0.01	-0.09	0.11	-0.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10	0.00	0.01	0.02	0.01
AC07 (-- 1.0 a +9.9)	4.89	1.06	0.30	0.04	-0.05	0.02	-0.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.09	0.00	0.00	0.00	0.04

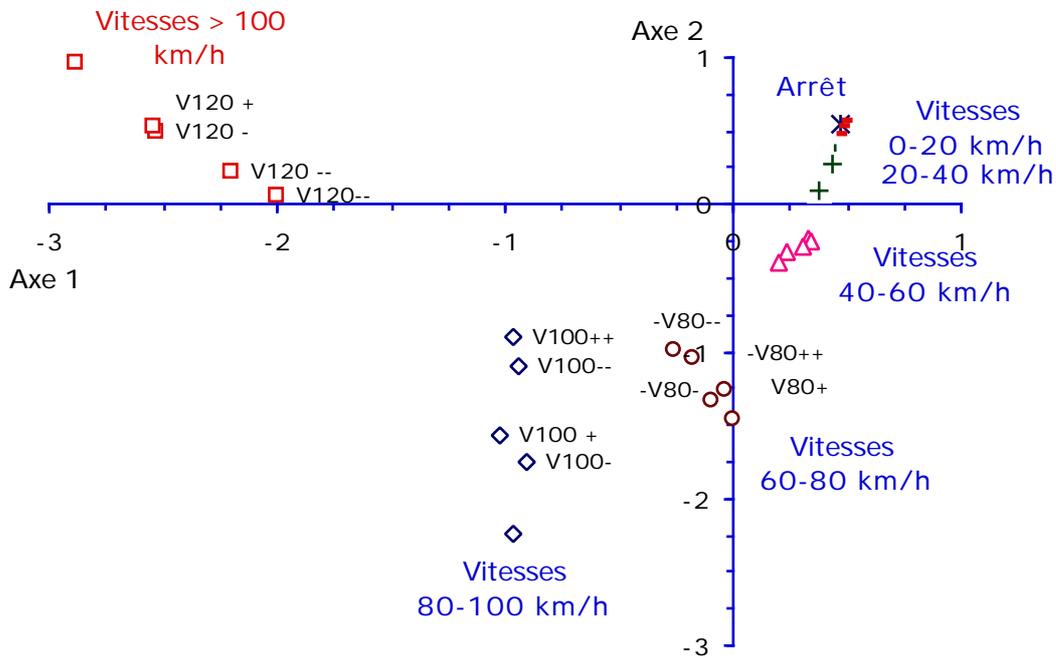
A7.1.3 - Coordonnées, contributions et cosinus carrés des fréquences sur les axes 6 à 10

FREQUENCES			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRES				
IDEN - LIBELLE COURT	P.REL	DISTO	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
FREQUENCES ACTIVES																	
DARW - DARW DUREE ARRET PON	18.35	1.49	-0.36	0.16	-0.13	0.10	0.01	11.2	3.1	2.2	1.9	0.0	0.09	0.02	0.01	0.01	0.00
V1A1 (0 a 20 ; -9.9 à-0.6)	3.36	0.87	0.12	0.01	0.14	-0.29	-0.03	0.2	0.0	0.5	2.8	0.0	0.02	0.00	0.02	0.09	0.00
V1A2 (0 a 20 ; -0.6 à-0.2)	3.43	1.61	0.27	-0.55	0.13	-0.05	0.00	1.1	6.9	0.4	0.1	0.0	0.04	0.19	0.01	0.00	0.00
V1A3 (0 a 20 ; -0.2 à+0.2)	4.59	3.00	0.44	-1.13	0.19	0.13	0.02	4.1	39.1	1.2	0.8	0.0	0.06	0.43	0.01	0.01	0.00
V1A4 (0 a 20 ; +0.2 à+0.6)	2.71	1.91	0.35	-0.56	0.11	-0.02	-0.01	1.6	5.6	0.2	0.0	0.0	0.06	0.16	0.01	0.00	0.00
V1A5 (0 a 20 ; +0.6 à+9.9)	3.92	0.89	0.10	0.06	0.14	-0.30	-0.04	0.2	0.1	0.5	3.7	0.1	0.01	0.00	0.02	0.10	0.00
V2A1 (20 a 40 ; -9.9 à-0.6)	4.10	0.90	0.13	0.23	0.19	-0.42	-0.05	0.3	1.4	1.1	7.3	0.1	0.02	0.06	0.04	0.19	0.00
V2A2 (20 a 40 ; -0.6 à-0.2)	3.08	1.77	0.37	0.49	-0.19	0.08	0.00	1.9	5.0	0.8	0.2	0.0	0.08	0.14	0.02	0.00	0.00
V2A3 (20 a 40 ; -0.2 à+0.2)	4.61	2.63	0.51	0.71	-0.41	0.47	0.06	5.5	15.4	5.7	10.6	0.2	0.10	0.19	0.06	0.08	0.00
V2A4 (20 a 40 ; +0.2 à+0.6)	3.70	1.53	0.29	0.49	-0.19	0.08	0.00	1.4	6.0	1.0	0.2	0.0	0.05	0.16	0.02	0.00	0.00
V2A5 (20 a 40 ; +0.6 à+9.9)	4.34	0.90	0.04	0.26	0.25	-0.46	-0.06	0.0	2.0	2.0	9.6	0.2	0.00	0.08	0.07	0.24	0.00
V3A1 (40 a 60 ; -9.9 à-0.6)	2.42	1.63	0.00	0.11	0.50	-0.51	-0.03	0.0	0.2	4.5	6.6	0.0	0.00	0.01	0.15	0.16	0.00
V3A2 (40 a 60 ; -0.6 à-0.2)	3.39	1.93	-0.27	-0.17	0.03	-0.09	-0.01	1.1	0.7	0.0	0.3	0.0	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00
V3A3 (40 a 60 ; -0.2 à+0.2)	7.08	2.62	-0.47	-0.47	-0.26	0.38	0.04	7.1	10.2	3.6	10.6	0.1	0.08	0.08	0.03	0.06	0.00
V3A4 (40 a 60 ; +0.2 à+0.6)	3.95	1.74	-0.27	-0.14	0.07	-0.12	-0.03	1.3	0.5	0.2	0.6	0.0	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00
V3A5 (40 a 60 ; +0.6 à+9.9)	2.09	2.03	0.02	0.22	0.67	-0.48	-0.01	0.0	0.7	7.0	4.9	0.0	0.00	0.02	0.22	0.11	0.00
V4A1 (60 a 80 ; -9.9 à-0.6)	0.85	5.29	0.42	0.26	1.09	0.04	0.13	0.7	0.4	7.5	0.0	0.2	0.03	0.01	0.23	0.00	0.00
V4A2 (60 a 80 ; -0.6 à-0.2)	1.81	4.50	0.15	0.06	0.18	-0.01	0.00	0.2	0.1	0.4	0.0	0.0	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
V4A3 (60 a 80 ; -0.2 à+0.2)	4.68	5.61	0.07	-0.06	-0.61	0.01	0.03	0.1	0.1	12.9	0.0	0.0	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
V4A4 (60 a 80 ; +0.2 à+0.6)	2.08	4.40	0.17	0.15	0.34	0.11	-0.10	0.3	0.3	1.8	0.3	0.3	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00
V4A5 (60 a 80 ; +0.6 à+9.9)	0.68	7.32	0.58	0.37	1.39	0.36	0.25	1.0	0.6	9.7	0.9	0.5	0.05	0.02	0.26	0.02	0.01
V5A1 (80 a 100 ; -9.9 à-0.6)	0.37	12.83	1.08	0.21	1.29	1.01	0.32	2.0	0.1	4.6	4.0	0.5	0.09	0.00	0.13	0.08	0.01
V5A2 (80 a 100 ; -0.6 à-0.2)	0.94	9.77	0.25	0.09	0.59	0.83	-0.33	0.3	0.0	2.4	6.7	1.3	0.01	0.00	0.04	0.07	0.01
V5A3 (80 a 100 ; -0.2 à+0.2)	3.10	12.08	-0.62	-0.13	-0.50	-0.47	0.20	5.6	0.3	5.8	7.1	1.5	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00
V5A4 (80 a 100 ; +0.2 à+0.6)	1.16	9.68	0.41	0.14	0.77	1.09	-0.71	0.9	0.2	5.1	14.2	7.2	0.02	0.00	0.06	0.12	0.05
V5A5 (80 a 100 ; +0.6 à+9.9)	0.26	20.26	1.57	0.26	1.27	1.05	1.23	2.9	0.1	3.1	2.9	4.9	0.12	0.00	0.08	0.05	0.07
V6A1 (100 a 999 ; -9.9 à-0.6)	0.35	24.78	2.41	-0.26	-0.81	-0.33	1.37	9.4	0.2	1.7	0.4	8.1	0.23	0.00	0.03	0.00	0.08
V6A2 (100 a 999 ; -0.6 à-0.2)	1.05	12.40	1.05	-0.16	-0.59	-0.23	-0.71	5.4	0.2	2.7	0.6	6.6	0.09	0.00	0.03	0.00	0.04
V6A3 (100 a 999 ; -0.2 à+0.2)	6.06	10.11	-0.63	0.06	0.22	0.07	0.18	11.2	0.2	2.2	0.3	2.5	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
V6A4 (100 a 999 ; +0.2 à+0.6)	1.35	13.65	1.49	-0.21	-0.87	-0.39	-1.10	13.9	0.4	7.6	2.2	20.3	0.16	0.00	0.06	0.01	0.09
V6A5 (100 a 999 ; +0.6 à+9.9)	0.15	60.40	3.55	-0.31	-1.13	-0.49	4.92	8.8	0.1	1.4	0.4	45.2	0.21	0.00	0.02	0.00	0.40
FREQUENCES ILLUSTRATIVES																	
DURE - DUREE EN MINUTES	99.94	0.09	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DUNE - DUNE DUREE EN ACCELE	20.49	0.40	0.23	0.05	0.19	-0.17	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13	0.01	0.09	0.07	0.00
DUST - DUST DUREE EN STABIL	39.92	0.48	-0.06	-0.16	-0.16	0.14	0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.05	0.05	0.04	0.00
DUPO - DUPO DUREE EN ACCELE	21.12	0.40	0.22	0.11	0.23	-0.16	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.12	0.03	0.13	0.07	0.00
VIT1 (0 a 20 ; -)	18.00	0.98	0.26	-0.46	0.15	-0.10	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07	0.22	0.02	0.01	0.00
VIT2 (20 a 40 ; -)	19.83	0.81	0.26	0.44	-0.07	-0.05	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.09	0.24	0.01	0.00	0.00
VIT3 (40 a 60 ; -)	18.93	1.23	-0.28	-0.20	0.06	-0.02	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00
VIT4 (60 a 80 ; -)	10.10	3.35	0.17	0.06	0.01	0.05	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
VIT5 (80 a 100 ; -)	5.83	7.51	-0.07	0.00	0.12	0.21	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
VIT6 (100 a 999 ; -)	8.96	8.28	0.07	-0.02	-0.10	-0.06	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AC01 (-: -9.9 a -1.0)	2.74	1.69	0.18	0.19	0.52	-0.48	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.02	0.16	0.14	0.00
AC02 (-: -1.4 a -0.6)	8.71	0.51	0.24	0.10	0.25	-0.26	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.11	0.02	0.12	0.14	0.00
AC03 (-: -0.6 a -0.2)	13.70	0.30	0.20	-0.07	0.02	0.02	-0.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.14	0.01	0.00	0.00	0.02
AC04 (-: -0.2 a +0.2)	30.12	0.52	-0.14	-0.18	-0.20	0.15	0.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.06	0.08	0.04	0.01
AC05 (-: 0.2 a +0.6)	14.96	0.33	0.25	0.00	0.02	0.05	-0.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.20	0.00	0.00	0.01	0.10
AC06 (-: 0.6 a +1.0)	6.54	0.58	0.22	0.15	0.30	-0.24	0.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.04	0.16	0.10	0.01
AC07 (-: 1.0 a +9.9)	4.89	1.06	0.10	0.23	0.43	-0.44	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.05	0.18	0.18	0.00

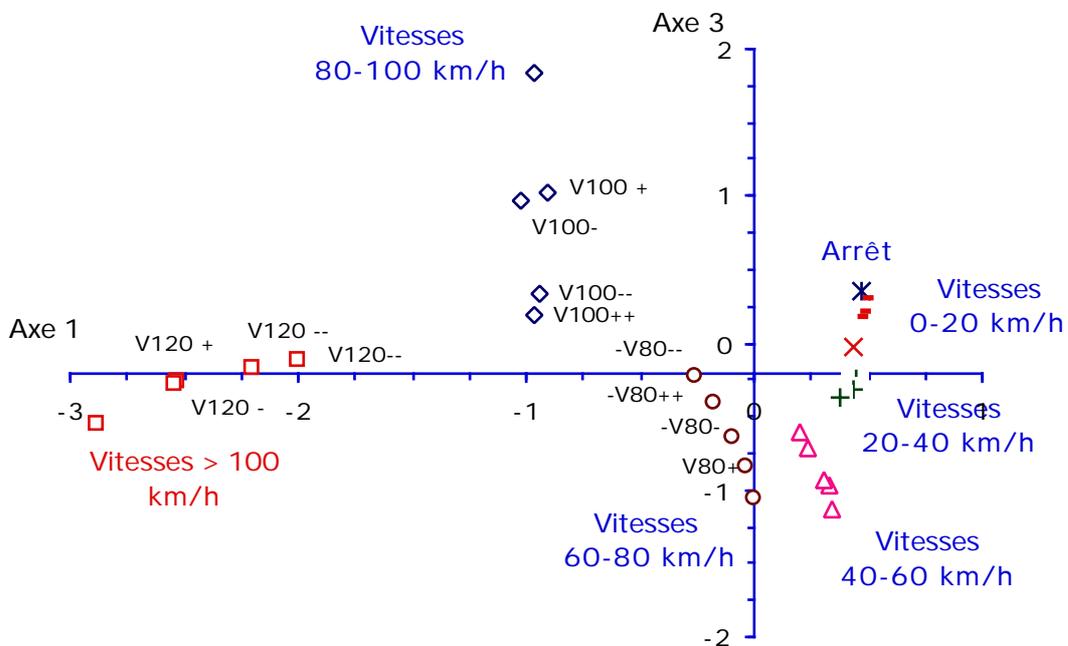
A7.1.4 - Représentation des variables dans les plans principaux

distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées et durée à l'arrêt

(convention : V80++ : vitesses 60-80 en km/h, fortes accélérations)

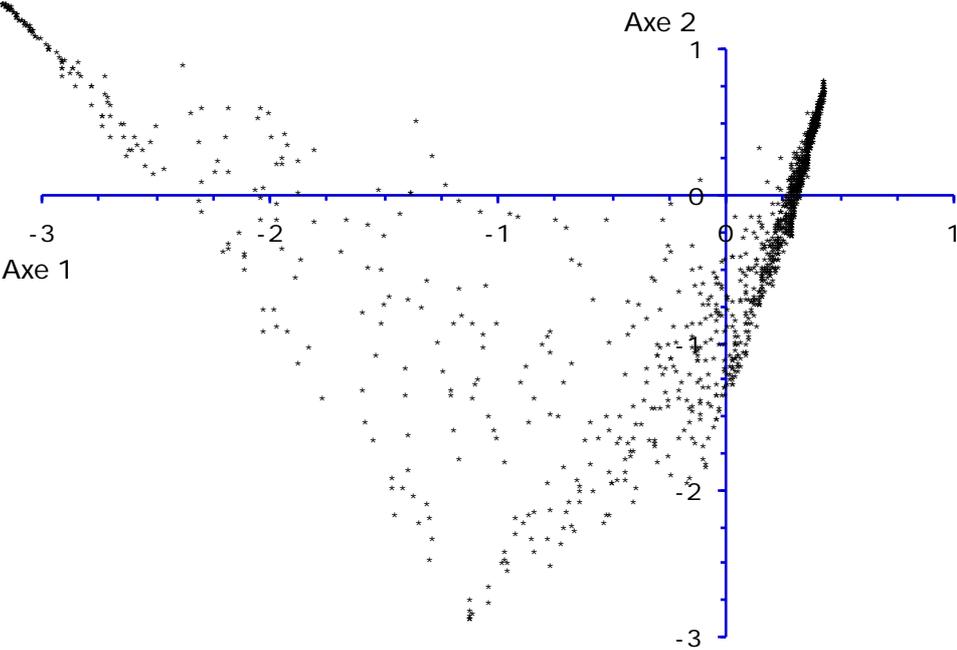


Plan 1 - 2

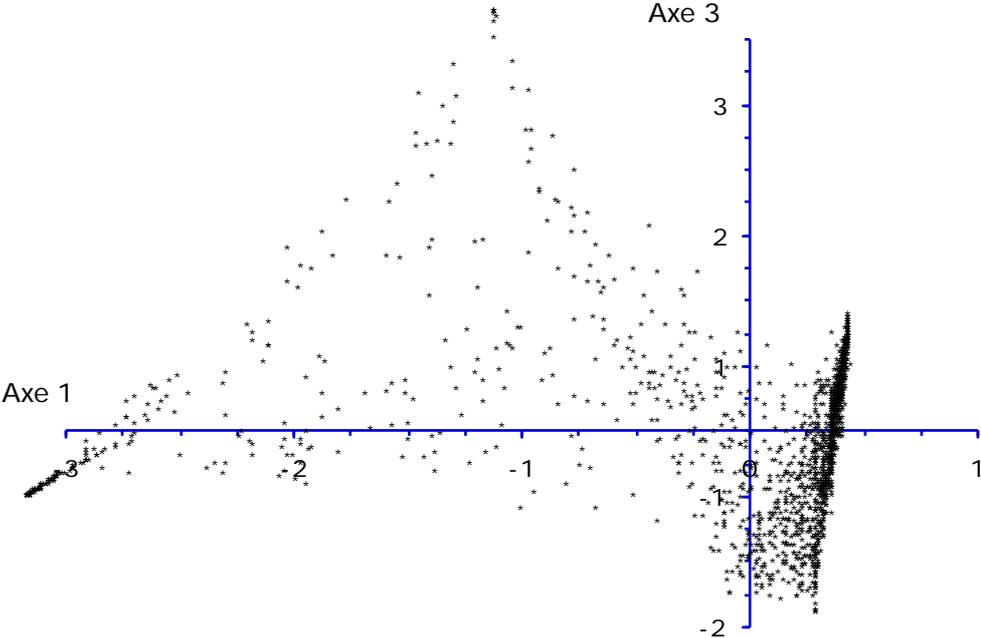


Plan 1 - 3

A7.1.5 - Représentation des segments dans les plans principaux



Plan 1 - 2



Plan 1 - 3

A7.2 - Classification des segments cinématiques

Classification des 69000 segments cinématiques par croisement de 5 partitions par nuées dynamiques autour de 10 centres mobiles, suivie de classification ascendante hiérarchique sur les classes stables résultantes.

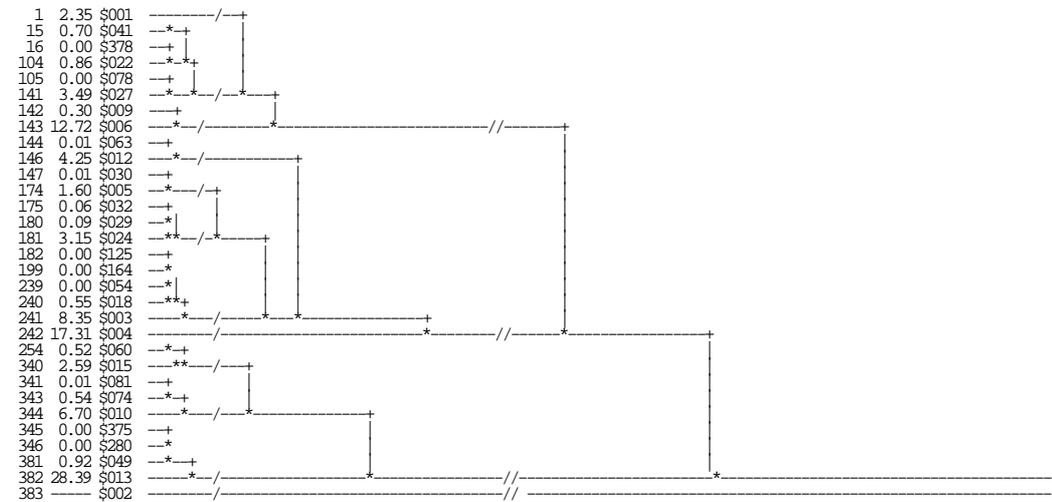
A7.2.1 - Classification hiérarchique : description des 20 noeuds d'indices les plus élevés

NUM.	AINE	BENJ	EFF.	POIDS	INDICE	HISTOGRAMME DES INDICES DE NIVEAU
745	15	731	86	5136.10	0.00710	*
746	6	9	2	8178.07	0.00733	*
747	733	728	7	8871.33	0.00816	*
748	12	692	3	7352.13	0.00978	**
749	745	736	98	7178.92	0.01282	**
750	10	689	4	3926.23	0.01344	**
751	3	744	60	13066.54	0.01358	**
752	742	739	103	21593.34	0.01731	**
753	737	752	140	27646.74	0.02125	***
754	13	741	38	4337.18	0.02284	***
755	747	743	35	20246.92	0.03952	*****
756	753	1	141	41811.35	0.05813	*****
757	750	749	102	11105.15	0.06393	*****
758	751	755	95	33313.46	0.07779	*****
759	746	756	143	49989.42	0.08642	*****
760	758	748	98	40665.59	0.10503	*****
761	754	757	140	15442.34	0.16567	*****
762	4	760	99	47107.21	0.20657	*****
763	762	759	242	97096.62	0.31444	*****
764	761	763	382112538.96	0.42809	*****	
765	2	764	383120964.56	0.70201	*****	
SOMME DES INDICES DE NIVEAU = 2.47276						

A7.2.2 - Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique

Les deux partitions en 4 et 12 classes ne sont pas imbriquées après itérations de consolidation.

RANG IND. IDEN DENDROGRAMME (INDICES EN % DE LA SOMME DES INDICES, MIN = 0.0%, MAX = 28.4%)



A7.2.3 - Mouvements entre classes lors des itérations de consolidation de la partition

CONSOLIDATION DE LA PARTITION AUTOUR DES 4 CENTRES DE CLASSES, DECOMPOSITION DE L'INERTIE CALCULEE SUR 10 AXES

		INERTIES		EFFECTIFS		POIDS		DISTANCES	
		AVANT	APRES	AVANT	APRES	AVANT	APRES	AVANT	APRES
INERTIE	INTER-CLASSES	1.4445	1.5202						
INERTIES	INTRA-CLASSE								
	CLASSE 1 / 4	0.3086	0.4502	22528	28260	49989.43	58897.51	0.6058	0.5084
	CLASSE 2 / 4	0.6340	0.5488	30808	27490	47107.21	42031.59	0.5075	0.6284
	CLASSE 3 / 4	0.5146	0.2623	10017	6441	15442.33	9850.85	2.6904	4.5529
	CLASSE 4 / 4	0.1515	0.2717	5537	6699	8425.60	10186.08	9.3768	8.1177
INERTIE	TOTALE	3.0533	3.0532						

QUOTIENT (INERTIE INTER / INERTIE TOTALE) : AVANT ... 0.4731 - APRES ... 0.4979

A7.2.4 - Représentation des 12 classes de segments cinématiques dans le premier plan principal

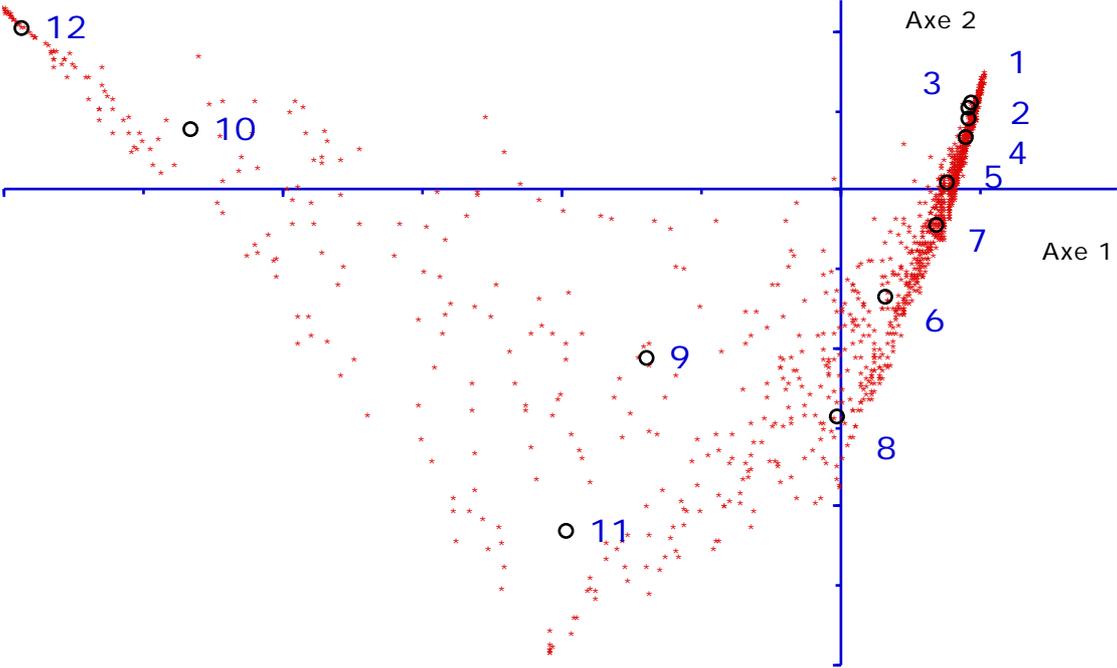


Figure A7.2.1 : Position des 12 centres de classes dans le premier plan

A.7.3 - Typologie des conditions de circulation

Classes	taille	fréquences caractéristiques	variables caractéristiques (à fortes valeurs)	variables caractéristiques (à faibles valeurs)
1/4	0,3 - 1 km	durée à l'arrêt vitesses faibles (0-40 km/h)	nombre et durée d'arrêts nombre d'accélération variations des accélérations accélération positive moy.	vitesses moy. et maxi. faibles
2/4	1 - 3 km	vitesses intermédiaires (40 - 80 km/h) faible durée à l'arrêt	variations des accélé. durées en accélé., décélé. durée de route	nombre et durée d'arrêts - durée totale vitesses moyennes faibles
3/4	1 - 3 km	vitesses fortes (80 - 100 km/h et 60 - 80) forte durée en stabilisé faible durée à l'arrêt	vitesses moy. et max élevées durée en stabilisé, durée de route	accélération moy. variations et nombres des accélé. durée et durée arrêt
4/4	3 - 5 km	vitesses élevées stables (100 km/h et +) forte durée en stabilisé faible durée à l'arrêt	vitesses moy. et max. élevées durée en stabilisé, durée de route	variations et nombres des accélé. accélération moy. nombre et durée d'arrêt - et durée totale

Tableau A7.1 : Variables caractéristiques des 4 classes types de conditions de circulation

	classe 1/4 conduite urbaine	classe 2/4 trafic intermédiaire	classe 3/4 routes principales	classe 4/4 autoroutes	ensemble
nombre de segments	28264	27486	6441	6699	68890
%	41,0	39,9	9,3	9,7	100,0
distance totale(km)	15690	31860	13320	20590	81430
% distance	19,3	39,1	16,4	25,3	100,0
Caractéristiques moyennes des segments *					
durée moyenne (min.)	2,1	1,5	1,5	1,5	1,8
distance (km)	0,6	1,2	2,7	3,1	1,2
nombre d'arrêts	1,4	0,5	0,2	0,05	0,8
durée à l'arrêt (min.)	0,71	0,08	0,02	0,003	0,32
durée de conduite (min.)	1,37	1,45	1,52	1,52	1,43
Caractéristiques moyennes de circulation **					
vitesse hors arrêts (km/h)	24,2	48,0	81,5	121,2	49,5
vitesse moyenne (km/h)	16,0	45,6	80,4	120,9	40,4
durée à l'arrêt (in %)	33,9	5,0	1,4	0,2	18,3
fréquence des arrêts /km	2,57	0,45	0,09	0,01	0,69
Description des vitesses *					
écart-type (km/h)	13,2	15,4	15,1	10,5	14
percentile 75% (km/h)	36	59,8	93,3	129,8	59,9
vitesse maximale (km/h)	47	68,4	100,7	135,1	69,1
Description des accélérations *					
écart-type (m/s ²)	0,71	0,65	0,46	0,28	0,62
nombre d'accélération	5,6	4,4	3,0	1,6	4,5

* valeurs correspondant à la moyenne arithmétique sur l'ensemble des segments

** valeurs moyennes vraies sur l'ensemble des données

Tableau A7.2 : Caractéristiques moyennes des 4 classes types de conditions de circulation

Classes (*)	taille	fréquences caractéristiques	variables caractéristiques (à fortes valeurs)	variables caractéristiques (à faibles valeurs)
1/12 (1/4)	0,3 - 0,5 km	durée à l'arrêt durée totale vitesses faibles (0-20 km/h)	durée d'arrêt nombre d'arrêts variations des accél. accél. positiv. moy. nbre d'accélération	durée en stabilisé vitesses moy. et maxi.
2/12 (1/4)	0,3 - 1 km	durée à l'arrêt vitesses faibles (0-40 km/h)	nombre d'arrêts variations des accél. accél. positiv. moy. durée d'arrêt et totale	vitesses moy. et maxi. durée de route
3/12 (1/4)	0,3 - 1 km	(durée à l'arrêt - durée stable) vitesses faibles (0-20 km/h)	durée de route, en stabilisé et totale nombre et durée d'arrêt nombre d'accélération	vitesses moy. et maxi. variations des accél. accél. positiv. moy.
4/12 (1 et 2/4)	0,5 - 1 km	durée en stabilisé vitesses faibles (20-40 km/h)	nombre d'accélération durée de route	vitesses moy. et maxi. variations des vitesses et accel. accél. positiv. moy. durées d'arrêt et totale
5/12 (2 et 1/4)	0,5 - 1 km	vitesses moyennes (20 - 60 km/h) instables	variations des accél. accél. positiv. moy. nbre d'accélération	vitesses moy. et maxi. durées d'arrêt et de route
6/12 (2/4)	1 - 3 km	vitesses intermédiaires (40 - 80 km/h) instables (faible durée à l'arrêt)	variations des vitesses et accél. accél. moy. vitesses moy. et max.fortes	nombre et durée d'arrêt durées en stabilisé et totale
7/12 (2/4)	1 - 3 km	vitesses intermédiaires (40 - 60 km/h) stables	durée en stabilisé durée de route	variations des vitesses et accél. accél. moy. nombre et durée d'arrêt vitesses moy. et max. durée totale
8/12 (2 et 3/4)	1 - 3 km	vitesses intermédiaires (60 - 80 km/h) stables	durée en stabilisé vitesses moy. et max.fortes durée de route	nombres d'accél. accél. moy. variations des vitesses et accel. nombre et durée d'arrêt durée totale
9/12 (3 et 2/4)	1 - 3 km	vitesses fortes (80 - 100 km/h et 60 - 80) instables	vitesses moy. et max. fortes variations des vitesses et accél. durée de route accél. nég. moy.	nombre et durée d'arrêt durée totale accél. posit. moy. nombre d'accél.
11/12 (3/4)	1 - 3 km	vitesses fortes (80 - 100 km/h et 60 - 80) stables forte durée en stabilisé	durée en stabilisé vitesses moy. et max. fortes durée de route	variations des accél. nombres d'accél. accél. moy. (pos. & nég.) variations des vitesses nombre et durée d'arrêt durée totale
10/12 (4 et 3/4)	1 - 5 km	vitesses élevées (100 km/h et +) instables	vitesses moy. et max. fortes variations des vitesses durée de route	accél. moy. nombre d'arrêts nombre d'accél. variations des accél. durées d'arrêt et totale
12/12 (4/4)	1 - 5 km	vitesses élevées stables (100 km/h et +) forte durée en stabilisé	vitesses moy. et max. fortes durées en stabilisé et de route	variations des accél. nombres d'accél. accél. moy. (pos. & nég.) variations des vitesses nombre et durée d'arrêt durée totale

(* correspondance approximative avec la typologie en 4 classes)

Tableau A7.3 : Variables caractéristiques des 12 classes types de conditions de circulation

Classes :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	10	12
nombre de segments	6227	9104	4085	6000	11920	7010	6553	3631	5111	2324	2878	4047
%	9,0	13,2	5,9	8,7	17,3	10,2	9,5	5,3	7,4	3,4	4,2	5,9
distance totale(km)	3001	4789	1985	4128	9906	8777	7182	5857	9619	5078	8447	12679
% distance	3,7	5,9	2,4	5,1	12,2	10,8	8,8	7,2	11,8	6,2	10,4	15,6
Caractéristiques moyennes des segments *												
durée moyenne (min.)	2,9	2,0	2,2	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5
distance (km)	0,48	0,53	0,49	0,69	0,83	1,25	1,10	1,61	1,88	2,19	2,94	3,13
nombre d'arrêts	1,9	1,6	1,7	0,7	0,8	0,5	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,02
durée à l'arrêt (min.)	1,73	0,65	0,43	0,11	0,14	0,10	0,06	0,02	0,05	0,006	0,01	0,001
durée de conduite (min.)	1,12	1,34	1,77	1,47	1,40	1,44	1,45	1,49	1,51	1,52	1,52	1,52
Caractéristiques moyennes de circulation **												
vitesse hors arrêts (km/h)	25,9	23,6	16,5	28,0	35,6	52,2	45,4	65,0	75,0	86,1	115,6	123,8
vitesse moyenne (km/h)	10,1	15,9	13,3	26,1	32,3	48,8	43,8	64,0	72,5	85,7	114,9	123,7
durée à l'arrêt (in %)	60,8	32,6	19,5	6,7	9,1	6,6	3,7	1,5	3,3	0,4	0,7	0,1
fréquence des arrêts /km	3,91	3,01	3,40	0,97	0,98	0,41	0,39	0,15	0,15	0,04	0,03	0,01
Description des vitesses *												
écart-type (km/h)	15	14	11	10	16	19	12	12	21	10	18	6
percentile 75% (km/h)	41	35	24	36	48	67	53	73	92	93	120	129
vitesse maximale (km/h)	51	47	38	44	59	76	59	78	103	98	140	132
Description des accélérations *												
écart-type (m/s ²)	0,79	0,75	0,52	0,56	0,80	0,72	0,51	0,41	0,64	0,29	0,47	0,17
nombre d'accélérations	5,2	6,1	5,9	5,0	5,8	4,7	3,4	2,6	4,2	1,6	3,2	0,6
correspondance approximative -----(classe 1/4) ----- classe 3 -----												
avec la classification en 4 classes -----(classe 2/4) ----- classe 4 -----												
conditions de circulation correspondantes (indicatives)	circulation urbaine congestionnée				condition urbaine fluide		circulation routière		routes principales		autoroutes	

* valeurs correspondant à la moyenne arithmétique sur l'ensemble des segments

** valeurs moyennes vraies sur l'ensemble des données

Tableau A7.4 : Caractéristiques moyennes des 4 classes types de conditions de circulation obtenues par analyse et classification des segments cinématiques décrits par la distribution croisée des vitesses et accélérations

Annexe 8 : Analyse des trajets

(résultats des chapitres 5.4.5 et 6.4)

A.8.1 - Analyse des Correspondances Binaires des trajets décrits par les fréquences des 12 segments cinématiques types

Analyse des 9640 trajets décrits par les fréquences temporelles des 12 types de segments cinématiques identifiés précédemment, dont on rappelle ci-après les caractéristiques.

Classes	type de conditions de circulation	vitesse - vitesses hors arrêts
1/12	urbain congestionné, forte durée à l'arrêt	10-26 km/h
2/12	urbain congestionné moyen	16-24 km/h
3/12	urbain congestionné, faibles vitesses stables	13-17 km/h
4/12	urbain fluide, vitesses stables	26-28 km/h
5/12	urbain fluide, vitesses instables	32-36 km/h
6/12	routier, vitesses instables	50 km/h
7/12	routier moyen à vitesses limitées	45 km/h
8/12	routier, vitesses stables	65 km/h
9/12	grandes routes, vitesses instables	75 km/h
11/12	grandes routes	86 km/h
10/12	autoroutes, vitesses instables	115 km/h
12/12	autoroutes	124 km/h

Définition des classes-types de conditions de circulation

Edition des valeurs propres

SOMME DES VALEURS PROPRES 2.6086

HISTOGRAMME DES 11 PREMIERES VALEURS PROPRES

NUMERO	VALEUR PROPRE	POURCENT.	POURCENT. CUMULE	
1	0.5394	20.68	20.68	*****
2	0.3321	12.73	33.41	*****
3	0.3014	11.55	44.96	*****
4	0.2671	10.24	55.20	*****
5	0.2316	8.88	64.08	*****
6	0.2083	7.99	72.07	*****
7	0.1898	7.28	79.34	*****
8	0.1681	6.44	85.79	*****
9	0.1403	5.38	91.17	*****
10	0.1245	4.77	95.94	*****
11	0.1060	4.06	100.00	*****

Coordonnées, contributions et cosinus carrés des fréquences sur les axes 1 à 10

(Convention FS01 : fréquence en durée du segment ou des conditions de circulation de type 1)

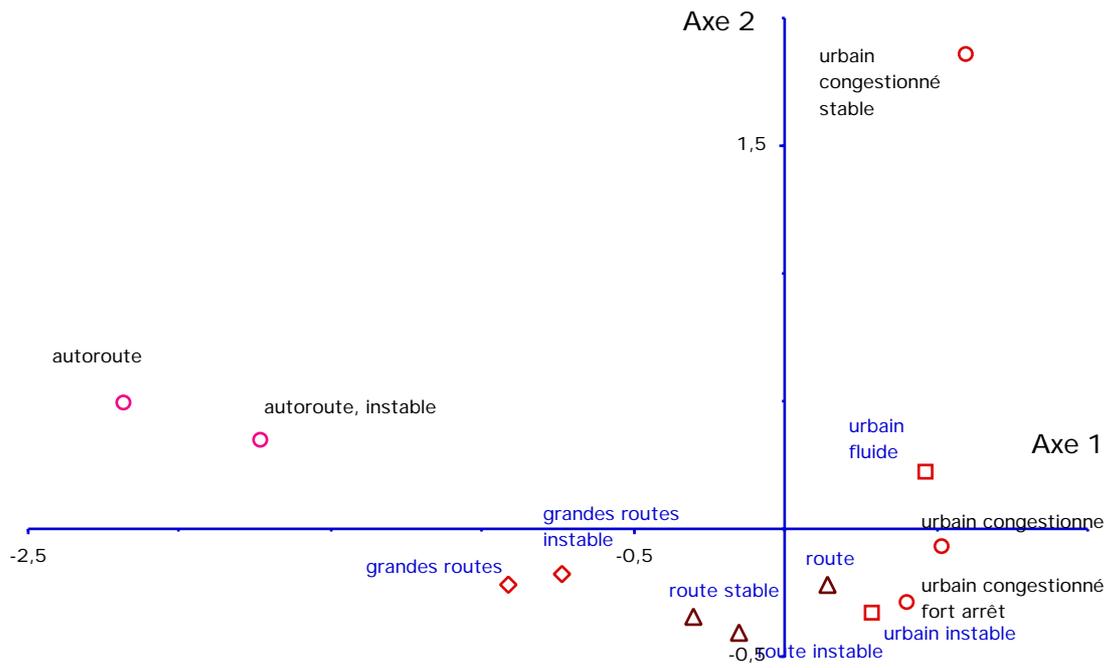
COORDONNEES, CONTRIBUTIONS ET COSINUS CARRÉS DES FREQUENCES SUR LES AXES 1 à 5

FREQUENCES			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRÉS				
IDEN - LIBELLE COURT	P.REL	DISTO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
FREQUENCES ACTIVES																	
FS01 - FS01 FTYPE 1 /12 FRE	14.63	1.76	0.41	-0.29	-1.01	0.66	0.18	4.6	3.7	49.7	23.9	2.0	0.10	0.05	0.58	0.25	0.02
FS02 - FS02 FTYPE 2 /12 FRE	15.07	1.56	0.52	-0.07	-0.20	-0.96	-0.09	7.6	0.3	2.0	52.2	0.5	0.17	0.00	0.03	0.59	0.01
FS03 - FS03 FTYPE 3 /12 FRE	7.45	4.14	0.60	1.85	0.17	0.39	-0.41	5.0	76.6	0.7	4.2	5.5	0.09	0.82	0.01	0.04	0.04
FS04 - FS04 FTYPE 4 /12 FRE	7.78	2.68	0.47	0.22	0.28	-0.22	1.19	3.2	1.2	2.1	1.4	47.2	0.08	0.02	0.03	0.02	0.53
FS05 - FS05 FTYPE 5 /12 FRE	15.14	1.25	0.29	-0.33	0.13	-0.17	-0.48	2.4	5.1	0.8	1.7	14.9	0.07	0.09	0.01	0.02	0.18
FS06 - FS06 FTYPE 6 /12 FRE	8.97	1.70	-0.15	-0.41	0.41	0.29	-0.45	0.4	4.5	4.9	2.8	8.0	0.01	0.10	0.10	0.05	0.12
FS07 - FS07 FTYPE 7 /12 FRE	8.15	2.22	0.14	-0.22	0.76	0.23	0.56	0.3	1.2	15.7	1.6	10.9	0.01	0.02	0.26	0.02	0.14
FS08 - FS08 FTYPE 8 /12 FRE	4.65	3.31	-0.30	-0.34	0.88	0.50	0.04	0.8	1.6	11.9	4.4	0.0	0.03	0.03	0.23	0.08	0.00
FS09 - FS09 FTYPE 9 /12 FRE	6.58	2.43	-0.74	-0.18	0.12	0.18	-0.41	6.7	0.6	0.3	0.8	4.8	0.23	0.01	0.01	0.01	0.07
FS10 - FS10 FTYPE 10/12 FRE	3.60	6.82	-1.73	0.34	-0.54	-0.29	-0.26	19.9	1.2	3.5	1.1	1.0	0.44	0.02	0.04	0.01	0.01
FS11 - FS11 FTYPE 11/12 FRE	2.89	5.96	-0.91	-0.22	0.69	0.49	0.13	4.5	0.4	4.6	2.6	0.2	0.14	0.01	0.08	0.04	0.00
FS12 - FS12 FTYPE 12/12 FRE	5.08	6.81	-2.18	0.49	-0.47	-0.41	0.47	44.6	3.7	3.8	3.3	4.9	0.70	0.04	0.03	0.03	0.03
FREQUENCES ILLUSTRATIVES																	
DURE - DUREE EN MINUTES	101.38	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DUNE - DUNE DUREE EN ACCELE	20.79	0.16	0.10	-0.05	0.04	-0.08	-0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.06	0.02	0.01	0.04	0.07
DUST - DUST DUREE EN STABIL	40.50	0.27	-0.30	0.09	0.18	0.02	0.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.32	0.03	0.12	0.00	0.05
DUPO - DUPO DUREE EN ACCELE	21.43	0.18	0.09	-0.07	0.06	-0.07	-0.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.03	0.02	0.03	0.08
DARW - DARW DUREE ARRET PON	18.35	0.56	0.42	-0.04	-0.53	0.13	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.32	0.00	0.49	0.03	0.00
DROW - DROW DUREE DE ROUTE	81.65	0.03	-0.10	0.01	0.12	-0.03	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.32	0.00	0.49	0.03	0.00
VIT1 - VIT1 (0 a 20 ; -)	18.01	0.42	0.45	0.35	-0.11	-0.10	-0.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.49	0.29	0.03	0.02	0.01
VIT2 - VIT2 (20 a 40 ; -)	19.84	0.28	0.36	-0.01	0.09	-0.20	0.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.45	0.00	0.03	0.14	0.08
VIT3 - VIT3 (40 a 60 ; -)	18.93	0.34	0.12	-0.24	0.35	0.06	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.18	0.36	0.01	0.00
VIT4 - VIT4 (60 a 80 ; -)	10.10	0.87	-0.30	-0.32	0.50	0.32	-0.22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10	0.11	0.29	0.12	0.05
VIT5 - VIT5 (80 a 100 ; -)	5.83	2.00	-0.86	-0.16	0.35	0.29	-0.16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.37	0.01	0.06	0.04	0.01
VIT6 - VIT6 (100 a 999 ; -)	8.96	4.25	-1.91	0.38	-0.44	-0.32	0.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.86	0.03	0.04	0.02	0.01
AC01 - AC01 (- : -9.9 a -1. 2.74	0.50	0.12	-0.25	0.00	-0.09	-0.31		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03	0.12	0.00	0.02	0.20
AC02 - AC02 (- : -1.4 a -0. 8.71	0.14	0.17	-0.07	0.01	-0.12	-0.12		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.21	0.04	0.00	0.11	0.10
AC03 - AC03 (- : -0.6 a -0. 13.70	0.06	0.02	0.03	0.10	-0.03	-0.02		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.02	0.18	0.01	0.01
AC04 - AC04 (- : -0.2 a +0. 30.12	0.25	-0.36	0.10	0.20	0.03	0.15		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.53	0.04	0.16	0.00	0.09
AC05 - AC05 (- : 0.2 a +0. 14.96	0.08	-0.06	0.01	0.14	-0.03	-0.02		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05	0.00	0.23	0.01	0.01
AC06 - AC06 (- : 0.6 a +1. 6.54	0.16	0.16	-0.09	0.05	-0.10	-0.14		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.17	0.05	0.02	0.07	0.12
AC07 - AC07 (- : 1.0 a +9. 4.89	0.38	0.20	-0.19	-0.04	-0.12	-0.27		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.11	0.09	0.00	0.04	0.19

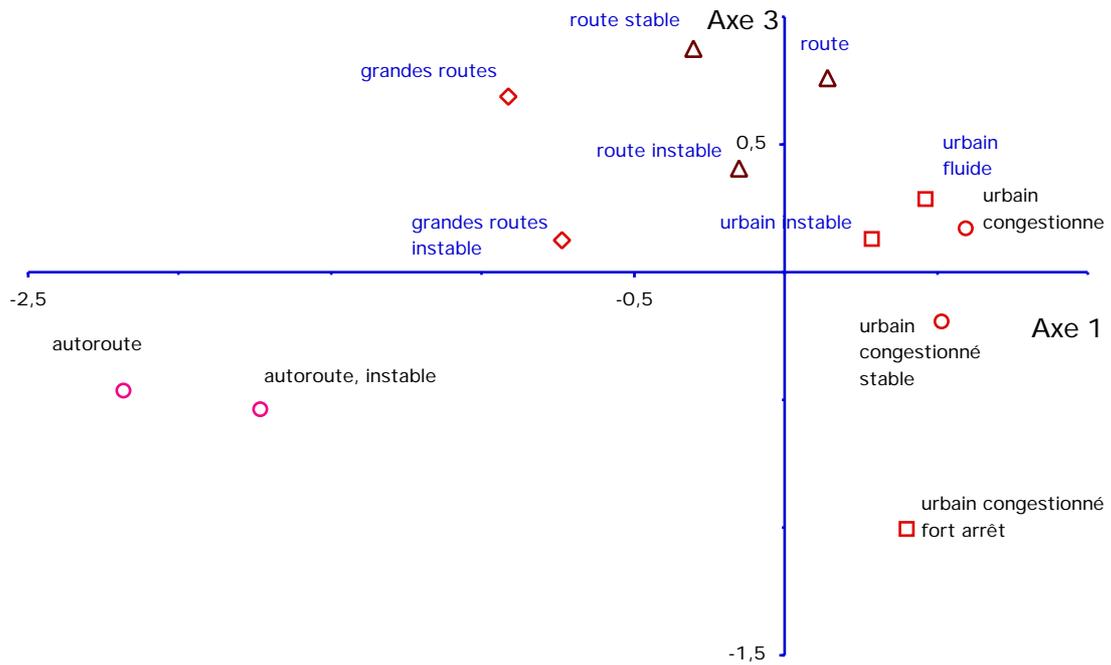
COORDONNEES, CONTRIBUTIONS ET COSINUS CARRÉS DES FREQUENCES SUR LES AXES 6 A 10

FREQUENCES			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRÉS				
IDEN - LIBELLE COURT	P.REL	DISTO	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
FREQUENCES ACTIVES																	
FS01 - FS01 FTYPE 1 /12 FRE	14.63	1.76	0.12	0.05	0.06	0.02	-0.02	0.9	0.2	0.3	0.0	0.0	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
FS02 - FS02 FTYPE 2 /12 FRE	15.07	1.56	0.54	-0.05	0.10	0.01	0.00	21.4	0.2	0.8	0.0	0.0	0.19	0.00	0.01	0.00	0.00
FS03 - FS03 FTYPE 3 /12 FRE	7.45	4.14	0.08	0.08	0.03	-0.01	0.02	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FS04 - FS04 FTYPE 4 /12 FRE	7.78	2.68	-0.50	-0.45	-0.63	-0.06	-0.12	9.3	8.2	18.6	0.2	0.9	0.09	0.07	0.15	0.00	0.01
FS05 - FS05 FTYPE 5 /12 FRE	15.14	1.25	-0.74	0.42	-0.10	0.21	-0.08	39.3	13.9	1.0	4.8	0.8	0.43	0.14	0.01	0.04	0.01
FS06 - FS06 FTYPE 6 /12 FRE	8.97	1.70	0.13	-0.26	-0.22	-0.82	-0.07	0.7	3.1	2.6	42.8	0.3	0.01	0.04	0.03	0.39	0.00
FS07 - FS07 FTYPE 7 /12 FRE	8.15	2.22	-0.06	0.16	0.97	0.02	0.46	0.1	1.2	45.9	0.0	14.2	0.00	0.01	0.43	0.00	0.10
FS08 - FS08 FTYPE 8 /12 FRE	4.65	3.31	0.58	0.04	0.14	-0.01	-1.01	7.6	0.0	0.6	0.0	38.3	0.10	0.00	0.01	0.00	0.31
FS09 - FS09 FTYPE 9 /12 FRE	6.58	2.43	0.09	-0.62	-0.41	0.12	0.83	0.3	13.4	6.6	0.7	36.4	0.00	0.06	0.07	0.01	0.28
FS10 - FS10 FTYPE 10/12 FRE	3.60	6.82	-0.61	-1.28	0.78	0.47	-0.56	6.4	31.2	13.2	5.7	9.0	0.05	0.24	0.09	0.03	0.05
FS11 - FS11 FTYPE 11/12 FRE	2.89	5.96	0.99	0.40	-0.77	1.36	0.00	13.7	2.4	10.2	37.9	0.0	0.17	0.03	0.10	0.31	0.00
FS12 - FS12 FTYPE 12/12 FRE	5.08	6.81	-0.02	0.98	-0.11	-0.46	0.06	0.0	25.9	0.4	7.7	0.1	0.00	0.14	0.00	0.03	0.00
FREQUENCES ILLUSTRATIVES																	
DURE - DUREE EN MINUTES	101.38	0.09	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DUNE - DUNE DUREE EN ACCELE	20.79	0.16	-0.09	-0.07	-0.02	0.00	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00
DUST - DUST DUREE EN STABIL	40.50	0.27	0.03	0.06	0.01	0.03	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
DUPO - DUPO DUREE EN ACCELE	21.43	0.18	-0.11	-0.07	-0.04	-0.01	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07	0.03	0.01	0.00	0.01
DARW - DARW DUREE ARRET PON	18.35	0.56	0.15	0.03	0.03	0.00	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
DROW - DROW DUREE DE ROUTE	81.65	0.03	-0.03	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
VIT1 - VIT1 (0 a 20 ; -)	18.01	0.42	0.02	0.03	-0.03	0.01	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VIT2 - VIT2 (20 a 40 ; -)	19.84	0.28	-0.17	-0.03	-0.11	-0.01	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.11	0.00	0.04	0.00	0.00
VIT3 - VIT3 (40 a 60 ; -)	18.93	0.34	-0.15	0.08	0.22	-0.05	0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07	0.02	0.14	0.01	0.03
VIT4 - VIT4 (60 a 80 ; -)	10.10	0.87	0.25	-0.17	-0.08	-0.18	-0.22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07	0.03	0.01	0.04	0.05
VIT5 - VIT5 (80 a 100 ; -)	5.83	2.00	0.44	-0.19	-0.46	0.60	0.28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10	0.02	0.11	0.18	0.04
VIT6 - VIT6 (100 a 999 ; -)	8.96	4.25	-0.20	0.08	0.16	-0.07	-0.09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
AC01 - AC01 (- : -9.9 a -1. 2.74	0.50	-0.15	-0.03	-0.06	-0.07	0.06		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	0.00	0.01	0.01	0.01
AC02 - AC02 (- : -1.4 a -0. 8.71	0.14	-0.10	-0.06	-0.04	-0.01	0.02		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.02	0.01	0.00	0.00
AC03 - AC03 (- : -0.6 a -0. 13.70	0.06	-0.04	-0.08	0.01	0.01	0.01		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03	0.10	0.00	0.00	0.00
AC04 - AC04 (- : -0.2 a +0. 30.12	0.25	0.05	0.11	0.01	0.02	-0.03		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00
AC05 - AC05 (- : 0.2 a +0. 14.96	0.08	-0.07	-0.11	0.00	0.01	0.01		0.0</									

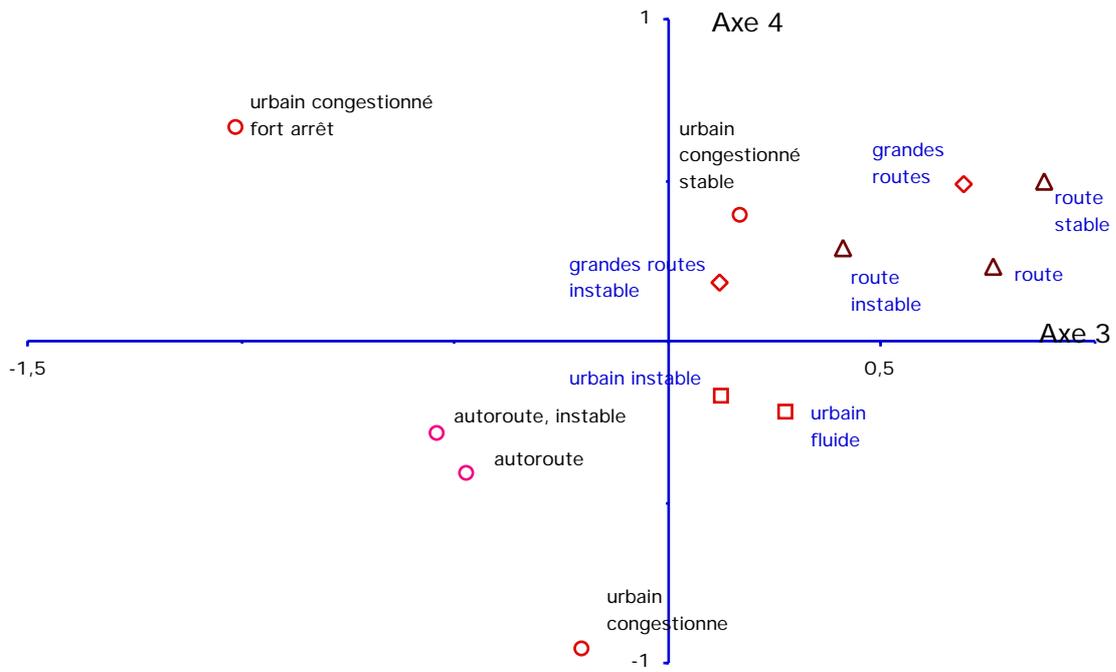
Représentation des variables dans les plans principaux



Plan 1 - 2

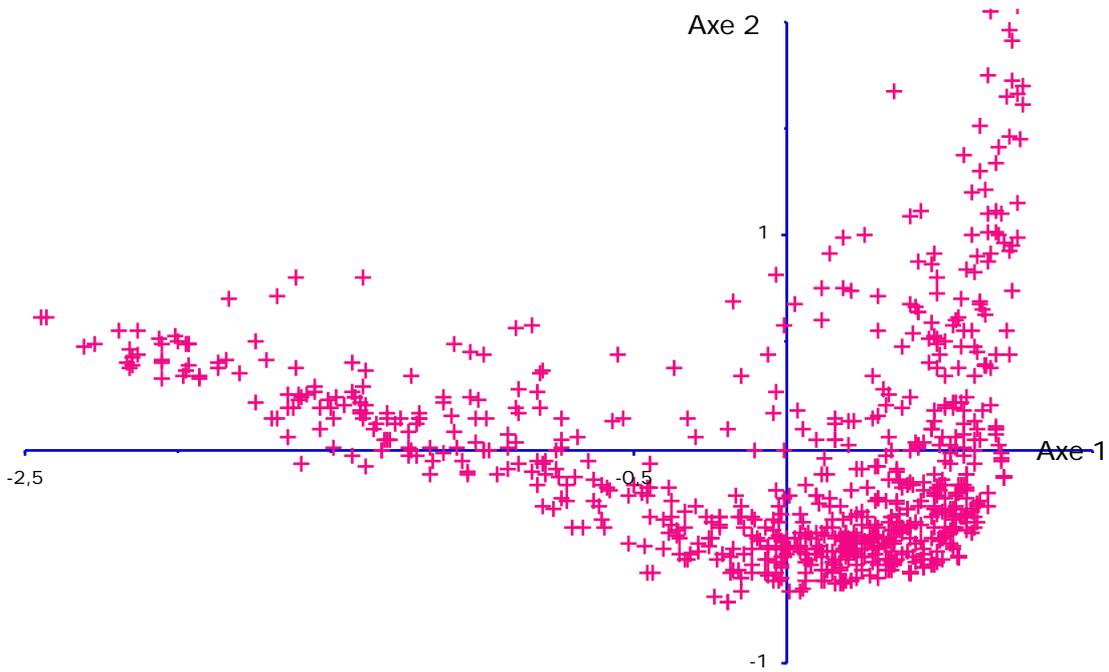


Plan 1 - 3

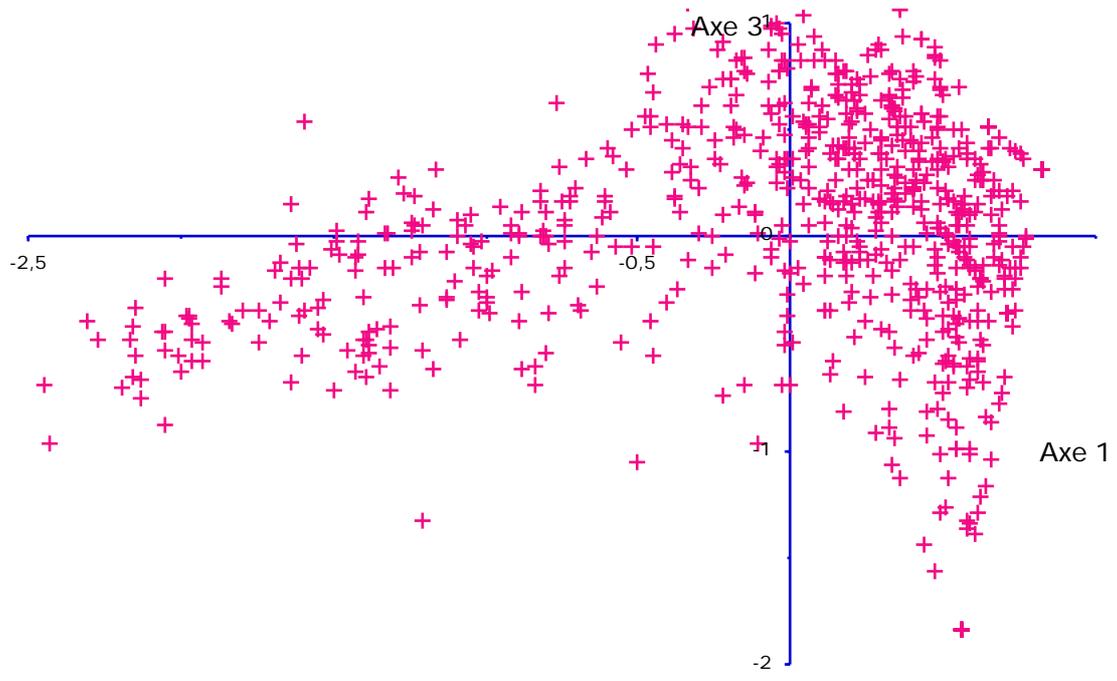


Plan 3 - 4

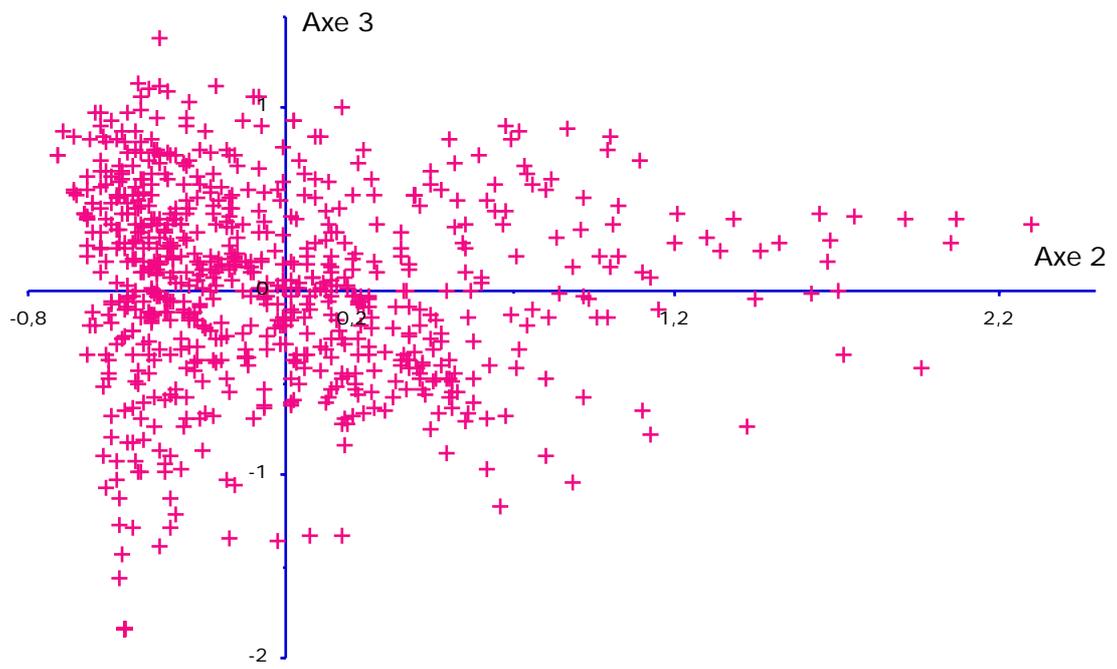
Représentation du nuage des trajets dans les premiers plans principaux



Plan 1 - 2



Plan 1 - 3



Plan 2 - 3

A.8.2 - Classification des trajets

Classification mixte des 9642 trajets par croisement de 5 partitions construites par nuées dynamiques autour de 10 centres mobiles, puis classification ascendante hiérarchique sur les 602 classes stables formées. Un seuil de 0.01 conduit à réaffecter 120 classes de durées inférieures à 10 mn.

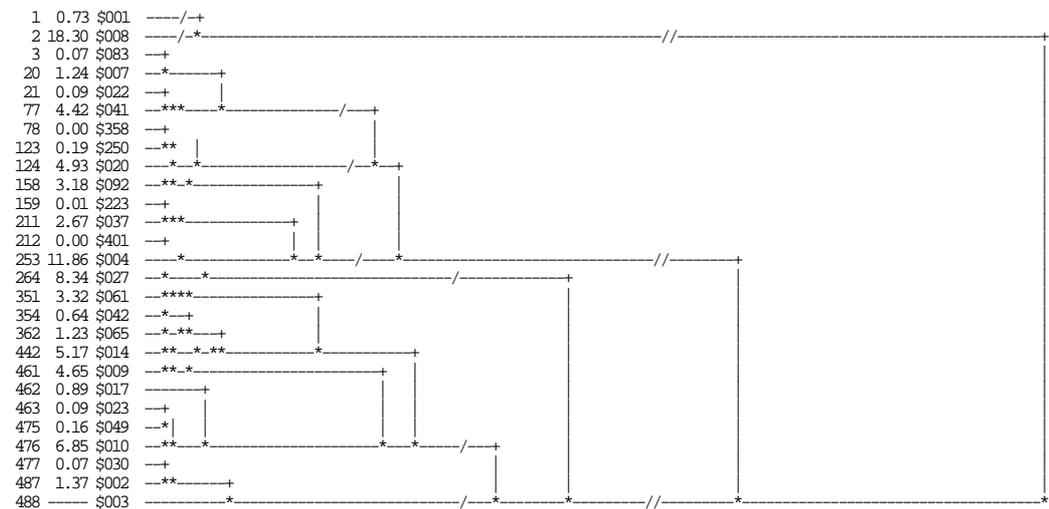
Classification hiérarchique : description des 20 noeuds d'indices les plus élevés

NUM.	AINE	BENJ	EFF.	POIDS	INDICE	HISTOGRAMME DES INDICES DE NIVEAU
956	8	1	2	12169.08	0.01457	****
957	943	916	47	8508.25	0.01543	****
958	934	944	70	9933.55	0.01550	****
959	945	17	15	7690.95	0.01762	****
960	572	929	11	3572.13	0.01826	*****
961	958	941	80	13307.52	0.02025	*****
962	961	954	91	16744.84	0.02438	*****
963	949	928	75	13279.57	0.02460	*****
964	3	937	12	15995.16	0.02714	*****
965	947	950	95	14667.82	0.05305	*****
966	965	952	129	23283.61	0.06329	*****
967	962	955	178	28523.97	0.06603	*****
968	957	953	122	21787.81	0.08791	*****
969	959	953	34	13897.62	0.09236	*****
970	966	968	251	45071.42	0.09809	*****
971	969	967	212	42421.59	0.10276	*****
972	964	971	224	58416.75	0.13608	*****
973	972	960	235	61988.88	0.16584	*****
974	973	970	486	107060.30	0.23586	*****
975	974	956	488	119229.40	0.36381	*****
SOMME DES INDICES DE NIVEAU =					1.98797	

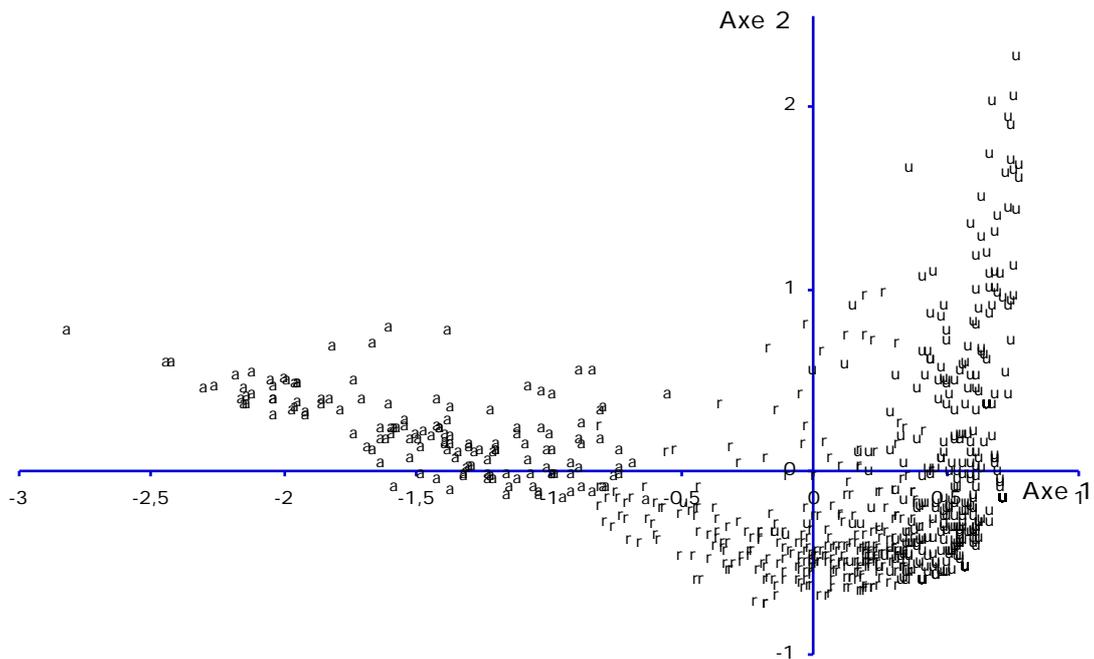
Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique

On réalise une partition en 3 classes principales. Cette partition est optimisée par des itérations de consolidations. On réalise des classifications des trajets de chacune des trois classes principales consolidées. On définit respectivement 3, 3 et 2 sous-classes des précédentes. On obtient une partition secondaire en 8 sous-classes.

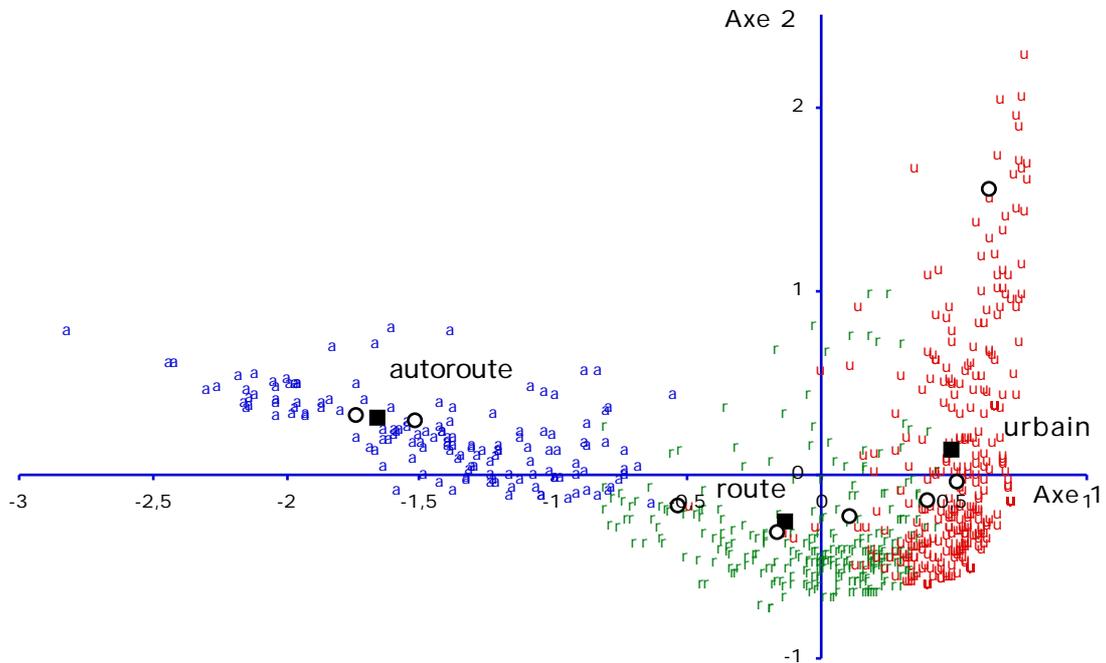
RANG IND. IDEN DENDROGRAMME (INDICES EN POURCENTAGE DE LA SOMME DES INDICES : 1.98797
 MIN = 0.00% / MAX = 18.30%)



Représentation des classes de trajets dans le premiers plan principal



Représentation des centres des 3 classes principales (carrés) et 8 classes secondaires (ronds) de trajets dans le premiers plan principal



A.8.3 - Typologie des trajets

	classe 1/3 trajets autoroutiers	classe 2/3 trajets routiers	classe 3/3 trajets urbains	ensemble
nombre de trajets	274	2652	6716	9642
% nombre	2,8	27,5	69,7	100,0
distance totale (km)	22480	36218	22750	81460
% distance	27,6	44,5	27,9	100,0
caractéristiques moyennes des trajets **				
durée moyenne (min.)	53,0	17,3	9,0	12,5
longueur moyenne(km)	82,0	13,7	3,4	8,4
nombre d'arrêts	6,8	5,6	5,8	5,8
durée à l'arrêt (min.)	2,5	2,0	2,4	2,3
durée de route (min.)	50,5	15,3	6,6	10,2
conditions moyennes de circulation **				
vitesse hors arrêts (km/h)	97,5	53,7	30,8	49,5
vitesse moyenne (km/h)	92,8	47,5	22,5	40,4
durée à l'arrêt (%)	4,8	11,6	26,7	18,4
fréquence des arrêts /km	0,08	0,41	1,72	0,69
descriptions des accélérations *				
décélération moyenne (m/s ²)	-0,75	-0,84	-0,83	-0,83
accélération moyenne (m/s ²)	0,65	0,74	0,77	0,75
constitution en segments types				
segments 1/4 (nombre)	33,6	10,6	4,7	7,2
segments 2/4	3,0	2,6	3,1	2,9
segments 3/4	6,5	5,9	1,5	2,9
segments 4/4	5,5	1,7	0,1	0,7
	18,7	0,5	0,03	0,7

* valeurs correspondant à la moyenne arithmétique sur l'ensemble des segments

** valeurs moyennes vraies sur l'ensemble des données

Tableau A.8.1 : Caractéristiques moyennes des 3 classes de trajets décrits par leur constitution en segments cinématiques types

Classes	divers	fréquences caractéristiques (fortes)	variables caractéristiques (valeurs fortes)	variables caractéristiques (valeurs faibles)
1/3	50 - 500 km week-end, lundi Allemagne faible et moy. motorisat. Londres, Krefeld, Cologne	vitesse élevées (100km/h et +) segments type 12, 10, 9, 11 durées stabilisée et de route vitesses 80-100 km/h	distance, vitesse durée de route et totale nombre d'arrêts	accél. moy.
2/3	10 - 50 (100) km Allemagne, UK Dimanche Cologne, Derby, Krefeld Forte motorisat.	vitesse 40 - 100 km/h segments type 6, 8, 9, 7, 11 durée de route	vitesse durée de route et totale distance	durée d'arrêt
3/3	0,5 - 10 km Athènes, Grèce Marseille, Londres Mardi à Vendredi	segments type 2 et 1 durée à l'arrêt vitesses 0 - 40 km/h segments type 3, 4 et 5	durée d'arrêt	vitesses durées de route et totale distance

Tableau A.8.2 : Variables caractéristiques des 3 classes de trajets

Classes	divers	fréquences caractéristiques (fortes)	variables caractéristiques (valeurs fortes)	variables caractéristiques (valeurs faibles)
1 - 1/3	100 - 500 km Derby, Grenoble, Londres UK lun. dim. moy. motorisation	segments type 12 et 11 stabilisé vitesses 100km/h et + vitesses 80-100 km/h durée de route		accél. moy.
2 - 1/3	10 - 100 km Athènes, Marseille, Krefeld Grèce, Allemagne mar. mer.jeu. ven. faible motorisation	segments type 10 vitesses 100km/h en accél. et décél., vitesses 0-40 km/h segments type 1 et 3 nombre et durée arrêt	accél. moy.	
1 - 2/3	3 - 20 km UK, Allemagne Derby, Krefeld, Londres, Cologne Faible motorisat. mar. jeu. ven. sam.	segments type 7 et 2, 8 et 7, 3 vitesses 20-60 km/h durée stabilisé et de route vitesses 60 - 80 km/h ...		accél. moy. durée d'arrêt distance nombre d'arrêts durée
2 - 2/3	20 - 500 km UK, France dim. sam. ven. Londres, Grenoble, Derby, Krefeld moy. motorisat.	segments type 11 et 3, 12, 8 vitesses 80 - et + durée de route et stabilisé vitesses 60-80 km/h	distance durée de route et totale durée arrêt	accél. moy.
3 - 2/3	3 - 20 km Athènes, Marseille, Grenoble Grèce, France lun. mer. jeu. Forte motorisat.	segments type 9, 6, 10, 1, 5, 2 nombre et durée arrêt vitesses 40 - 100 km/h et + instables	accél. moy. durée d'arrêt nombre d'arrêts	durée de route et totale distance
1 - 3/3	10 - 50 km Athènes, Cologne, Grenoble, Marseille Grèce, France fort. et faible motorisat. jeu. ven.	segments type 1, 9, 10, 6, 12, 11 durée à l'arrêt vitesses 100 km/h et + vitesses 60 - 100 km/h	durée d'arrêt nombre d'arrêts durée de route et totale distance accél. moy.	
2 - 3/3	0,5 - 20 km Londres, Derby, Krefeld, Marseille, UK moy. motorisat. lun. mar. mer. jeu.	segments type 2, 5 et 4, 7 durée(s) de route vitesses 20 - 60 km/h	accél. moy.	nombre et durée d'arrêt durée totale
3 - 3/3	0,2 - 3 km Derby, Grenoble, Cologne moy. motorisat. dim. sam.	segments type 3 et 1 durée de route et stabilisé vitesses 0 - 20 km/h segments type 8		accél. moy. nombre et durée d'arrêt distance, durée

Tableau A.8.3 : Variables caractéristiques des 8 classes de trajets

	classe 1/3 trajets autoroutiers		classe 2/3 trajets routiers			classe 3/3 trajets urbains		
	<i>sous-classes :</i> cla. 1/2	cla. 2/2	cla. 1/3	cla. 2/3	cla. 3/3	cla. 1/3	cla. 2/3	cla. 3/3
nombre de trajets	161	113	980	330	1342	1871	3488	1357
% nombre	1,7	1,2	10,2	3,4	13,9	19,4	36,2	14,1
distance totale (km)	13492	8875	10824	8940	16453	8511	11657	2590
% distance	16,6	10,9	13,3	11,0	20,2	10,4	14,3	3,2
caractéristiques moyennes des trajets **								
durée moyenne (min.)	54,6	50,8	15,9	27,0	15,8	12,7	8,2	6,0
longueur moyenne(km)	83,8	78,5	11,0	27,1	12,3	4,5	3,3	1,9
nombre d'arrêts	6,5	7,3	5,0	6,2	6,0	8,4	5,2	4,0
durée à l'arrêt (min.)	2,3	2,9	1,6	2,3	2,2	4,6	1,7	1,2
durée de route (min.)	52,3	47,9	14,3	24,7	13,6	8,1	6,5	4,7
caractéristiques moyennes des conditions de circulation **								
vitesse hors arrêts (km/h)	96,2	98,3	46,3	65,8	54,0	33,8	30,6	24,2
vitesse moyenne (km/h)	92,1	92,8	41,6	60,1	46,5	21,5	24,4	19,2
durée à l'arrêt (%)	4,2	5,7	10,2	8,7	13,9	36,4	20,4	20,7
fréquence des arrêts /km	0,08	0,09	0,45	0,23	0,49	1,84	1,55	2,10
description des accélérations *								
décélération moyenne (m/s ²)	-0,74	-0,73	-0,78	-0,76	-0,89	-0,85	-0,84	-0,74
accélération moyenne (m/s ²)	0,64	0,66	0,71	0,67	0,78	0,80	0,77	0,70
constitution en segments types								
segments 1/4 (nombre)	34,8	32,1	9,9	16,7	9,7	5,9	4,7	3,1
segments 2/4	2,8	3,3	2,5	2,9	2,5	3,7	3,0	2,4
segments 3/4	6,7	6,3	6,7	6,6	5,1	1,9	1,6	0,7
segments 4/4	6,0	4,7	0,6	5,3	1,5	0,2	0,03	0,04
	19,3	17,7	0,1	1,9	0,5	0,1	0,01	0,00

* valeurs correspondant à la moyenne arithmétique sur l'ensemble des trajets

** valeurs moyennes vraies sur l'ensemble des données

Tableau A8.4 : Caractéristiques des 8 classes de trajets décrits selon les conditions de circulation

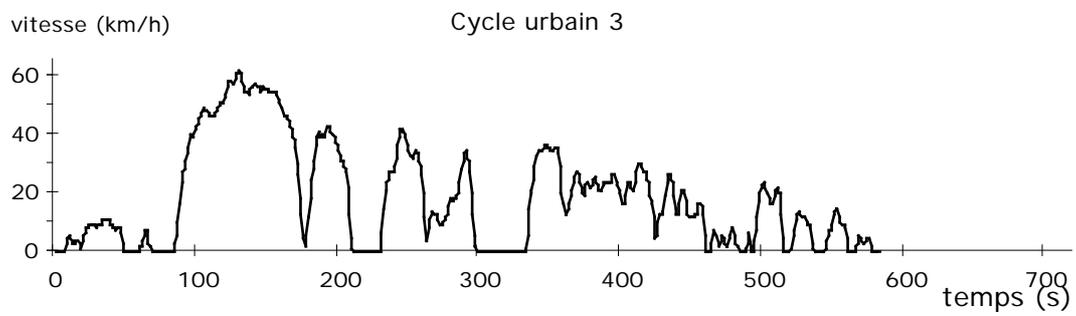
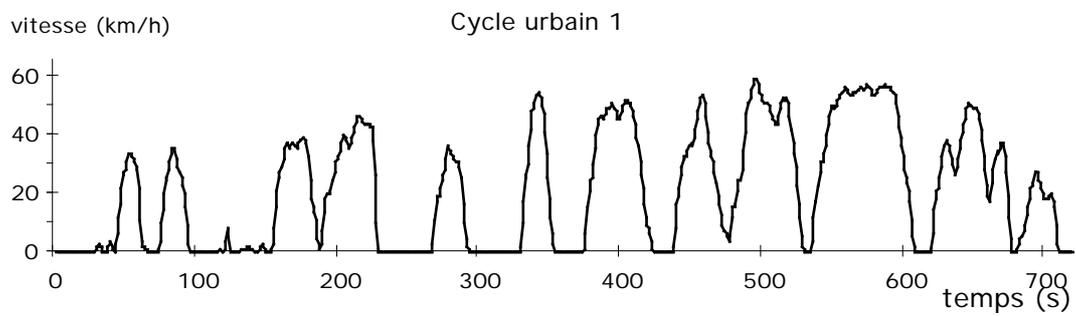
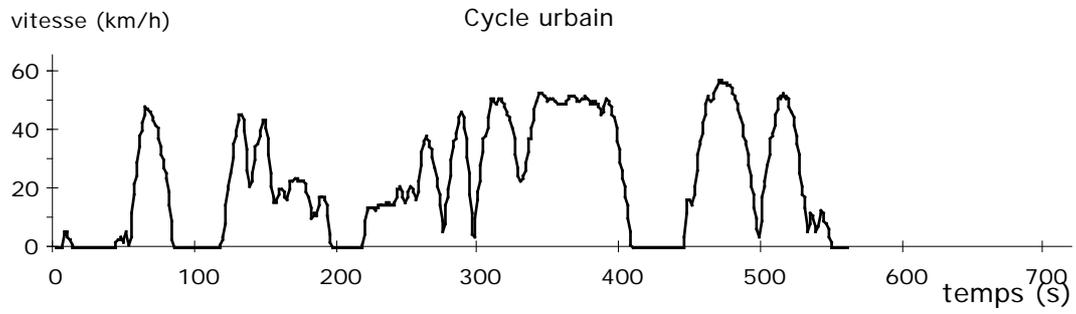
Annexe 9 : Construction de cycles de conduite

Tableau A9.1 : Comparaison des caractéristiques des cycles et des 8 classes de trajets (*en italique les cycles principaux communs aux 2 partitions*)

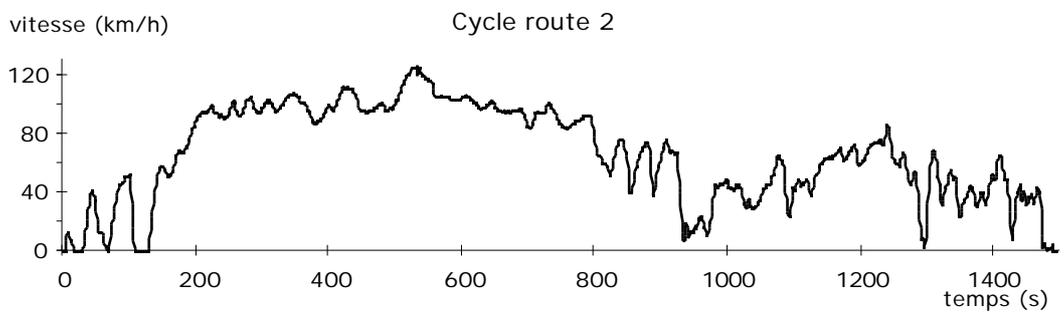
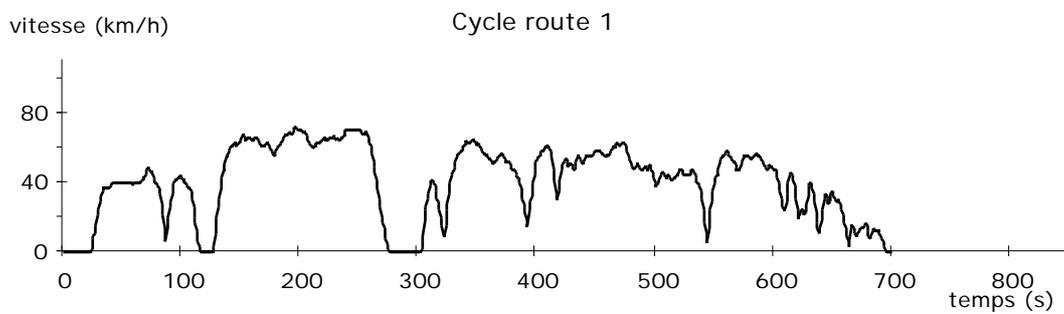
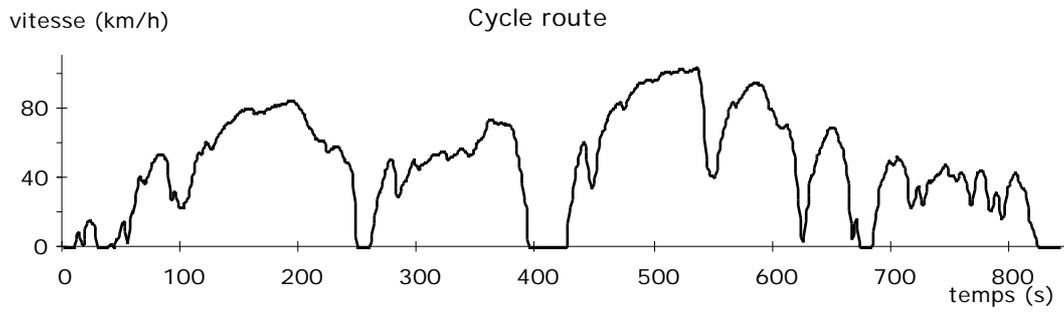
	trajets autoroutiers 1 / 2 classe de trajets	<i>cycle autoroutier 1 (7239)</i>	trajets autoroutiers 2 / 2 classe de trajets	<i>cycle autoroutier 2 (339)</i>	trajets routiers 1/3 classe de trajets	cycle route 1 (2329)	trajets routiers 2/3 classe de trajets	cycle route 2 (5587)
longueur (km)	84	<i>46,19</i>	80	42,68	11	7,82	27	27,33
étendue probable *	25 - 100		20 - 100		3 - 8		10 - 30	
durée à l'arrêt (%)	4,2	<i>3,8</i>	5,7	7,9	10,2	9,8	8,7	3,4
valeur probable *	5		7,6		10,4		9,4	
fréquence d'arrêts / km	0,08	<i>0,06</i>	0,09	0,16	0,45	0,38	0,23	0,15
vitesse moyenne (km/h)	92	<i>91,8</i>	93	82,1	41,6	40,2	60,1	65,7
valeur probable	85		86		39		57	
étendue probable	80 - 100		70 - 100		30 - 45		50 - 70	
vitesse hors arrêts (km/h)	96	<i>95,5</i>	98	89,2	46,3	44,6	65,8	68,1
valeur probable	89		93		44		63	
étendue probable	80 - 100		70 - 110		35 - 50		55 - 70	
pois de la classe / coefficient de pondération du cycle (en distance)	16,6	<i>0,029</i>	10,9	<i>0,021</i>	13,3	<i>0,139</i>	11,0	<i>0,033</i>

	trajets routiers (3/3) classe de trajets	<i>cycle route 3 (7344)</i>	trajets urbains (1/3) classe de trajets	cycle urbain 1 (6311)	trajets urbains (2/3) classe de trajets	cycle urbain 2 (2026)	trajets urbains (3/3) classe de trajets	cycle urbain 3 (6215)
longueur (km)	12,3	<i>11,22</i>	4,5	4,19	3,3	<i>3,46</i>	1,9	2,92
étendue probable *	2 - 8		1 - 6		1 - 4		0,5 - 3	
durée à l'arrêt (%)	13,9	<i>11,8</i>	36,4	35,0	20,4	<i>25,5</i>	20,7	23,4
valeur probable *	14,1		41,5		19,8		20,7	
fréquence d'arrêts / km	0,49	<i>0,45</i>	1,84	2,39	1,55	<i>1,45</i>	2,10	3,42
vitesse moyenne (km/h)	46,5	<i>47,8</i>	21,5	21,0	24,4	<i>22,2</i>	19,2	18,0
valeur probable	43		18		23		15	
étendue probable	30 - 50		15 - 25		15 - 30		10 - 20	
vitesse hors arrêts (km/h)	54	<i>54,2</i>	33,8	32,2	30,6	<i>29,9</i>	24,2	23,5
valeur probable	50,2		28,3		28,5		19	
étendue probable	40 - 55		25 - 35		25 - 35		15 - 25	
pois de la classe / coefficient de pondération du cycle (en distance)	20,2	<i>0,147</i>	10,4	<i>0,204</i>	14,3	<i>0,337</i>	3,2	<i>0,089</i>

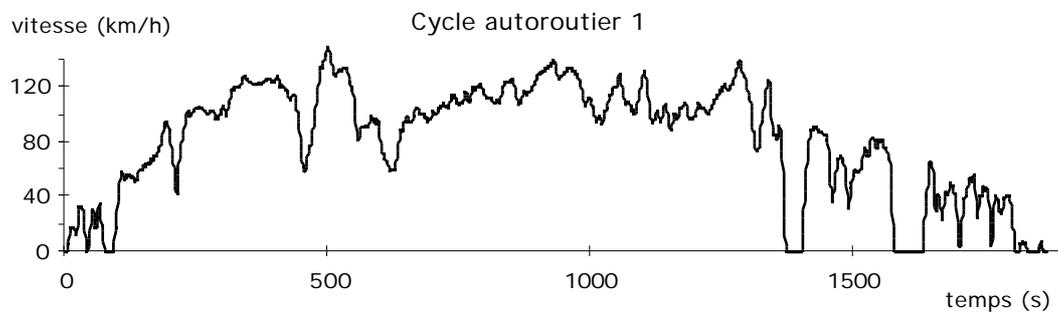
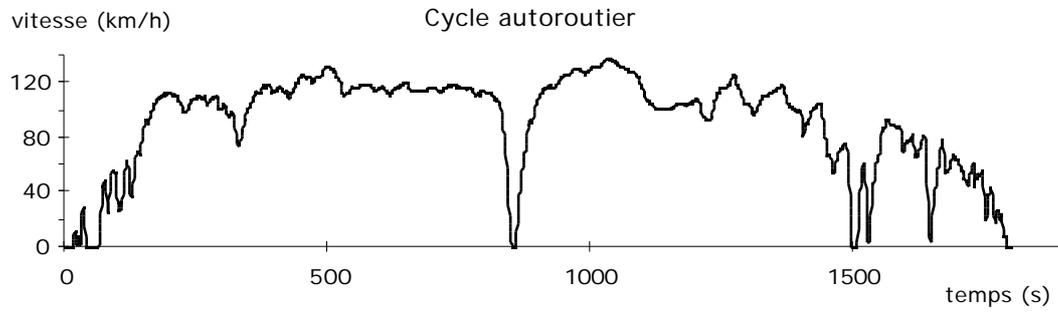
A9.1 - Cycles de conduite urbains



A9.2 - Cycles de conduite routiers

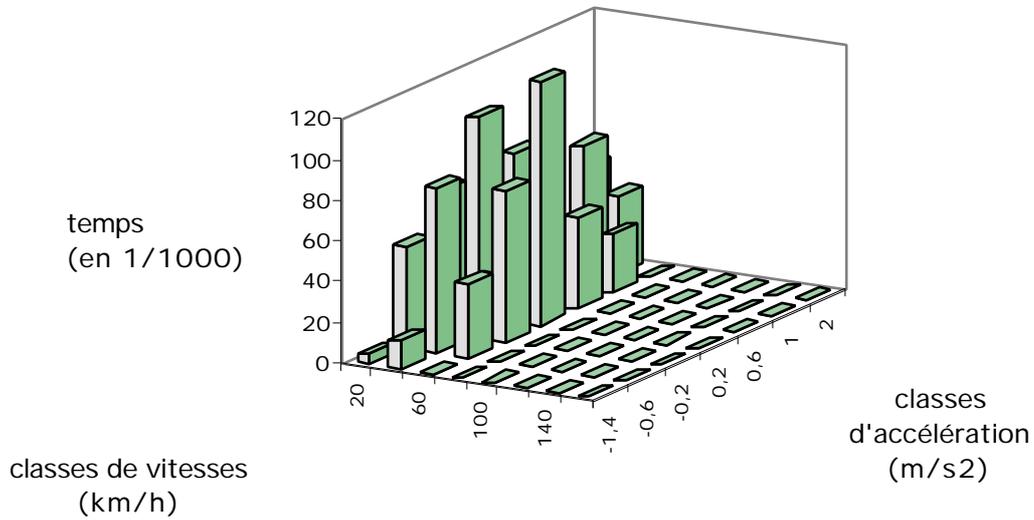


A9.3 - Cycles de conduite autoroutiers

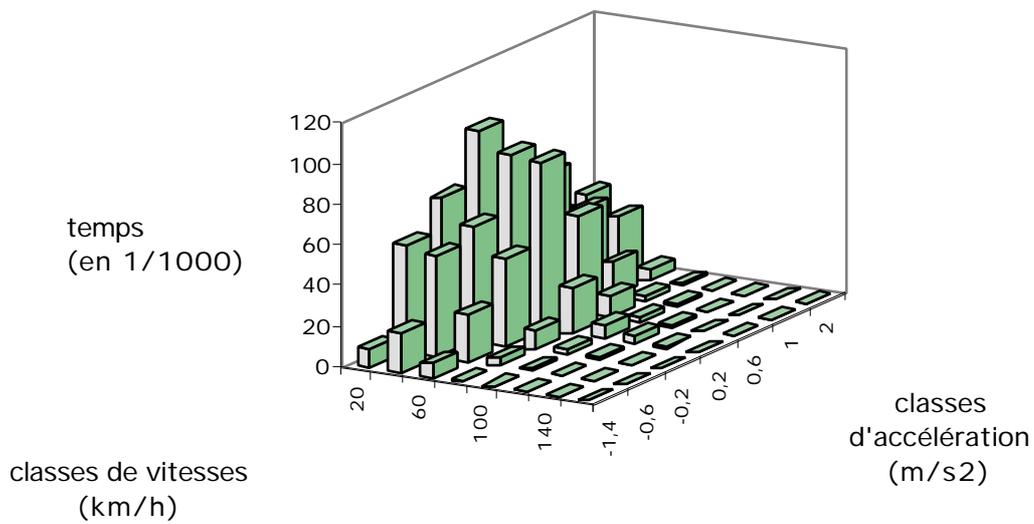


A9.4 - Comparaison du cycle de conduite urbain et des trajets urbains selon leur distribution des vitesses et accélérations instantanées

cycle urbain (2026)



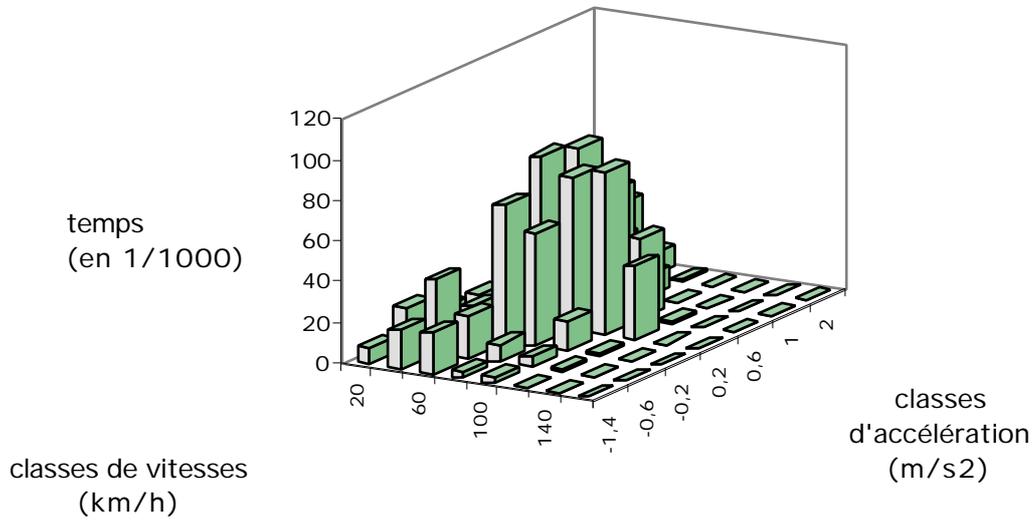
trajets urbains



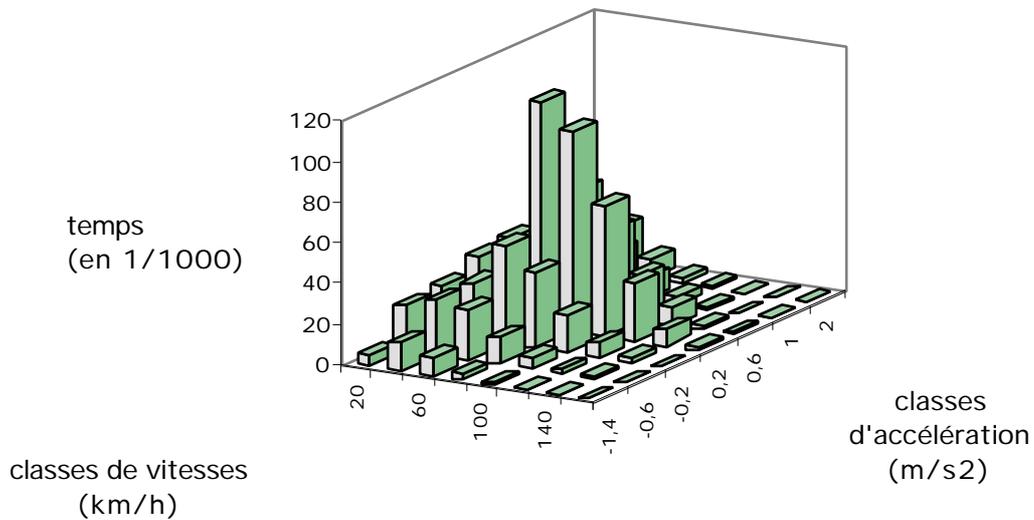
Le cycle urbain ne présente pas de vitesses supérieures à 60 km/h, mais les fréquences correspondantes sur la classe de trajets sont très faibles.

A9.5 - Comparaison du cycle de conduite routier et des trajets routiers selon leur distribution des vitesses et accélérations instantanées

cycle routier (7344)



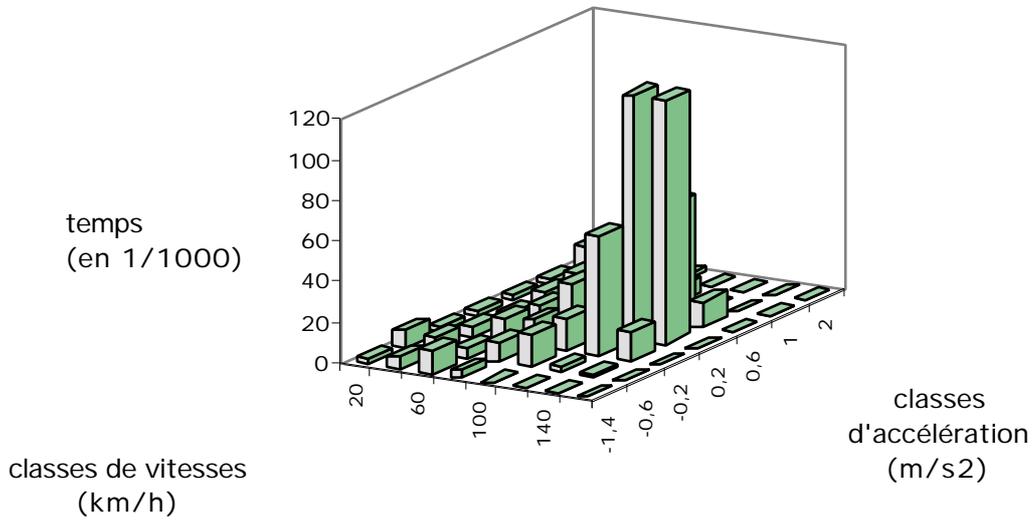
trajets routiers



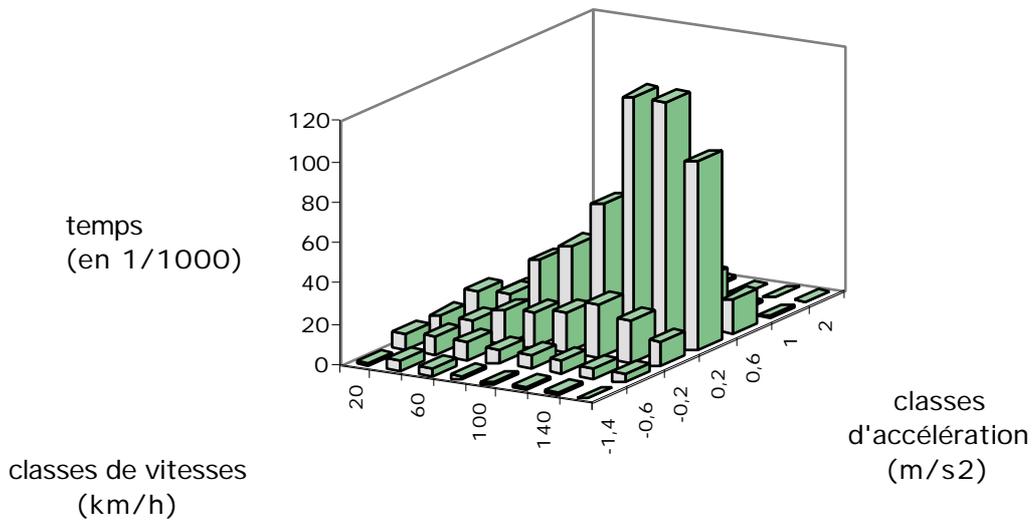
Le cycle ne présente pas de vitesses supérieures à 120 km/h, de fréquences faibles également sur la classe de trajet. Les vitesses intermédiaires semblent un peu plus réparties sur le cycle.

A9.6 - Comparaison du cycle de conduite autoroutier et des trajets autoroutiers selon leur distribution des vitesses et accélérations instantanées

cycle autoroutier (7239)



trajets autoroutiers



Le cycle ne présente pas de vitesses supérieures à 140 km/h observées sur la classe de trajet..

Annexe 10 : Synthèse des caractéristiques cinématiques des cycles de conduite et règles d'utilisation

A.10.1 - Les cycles de conduite sont considérés en tant que trajets entiers

	cycle autoroutier principal	cycle autoroutier 2	cycle routier 1	cycle routier 2	cycle routier principal	cycle urbain 1	cycle urbain principal	cycle urbain 3
réf.	7239	339	2329	5587	7344	6311	2026	6215
Usage : un cycle est considéré en tant que trajet entier								
coefficients de pondération pour :								
l'ensemble de 3 cycles principaux	27,6				44,5		27,9	
l'ensemble de 8 cycles	16,6	11,0	13,3	11,0	20,2	10,4	14,3	3,2
distance (km)	46,205	42,702	7,820	27,327	11,224	4,185	3,470	2,914
durée (mn)	30,07	31,13	11,67	24,90	14,05	12,00	9,33	9,72
vitesse moyenne (km/h)	92,2	82,3	40,2	65,8	47,9	20,9	22,3	18,0
vitesse moyenne hors arrêts (km/h)	95,4	89,0	44,3	68,0	53,5	28,6	29,6	22,9
nombre d'arrêts (vitesse V=0)	5	8	4	5	6	14	6	12
durée à l'arrêt (mn)	1,02	2,35	1,08	0,80	1,47	3,23	2,30	2,07
durée relative à l'arrêt (% de durée)	3,4	7,5	9,3	3,2	10,4	26,9	24,6	21,3
fréquence des arrêts /km	0,11	0,19	0,51	0,18	0,53	3,35	1,73	4,12
écart-type des accélérations (m/s ²)	0,52	0,57	0,63	0,52	0,66	0,70	0,60	0,55
accélération positive moyenne (m/s ²)	0,73	0,67	0,82	0,62	0,72	0,81	0,79	0,71
décélération moyenne (m/s ²)	-0,92	-0,78	-0,77	-0,80	-0,93	-0,97	-0,79	-0,75

A.10.2 - Les conditions types de circulation sont considérées

	cycle autoroutier principal	cycle autoroutier 2	cycle routier 1	cycle routier 2	cycle routier principal	cycle urbain 1	cycle urbain principal	cycle urbain 3
réf.	7239	339	2329	5587	7344	6311	2026	6215
Usage : Les conditions types de circulation d'un cycle sont considérées (par exemple conditions autoroutières du cycle autoroutier, etc.)								
partie à utiliser : de (sec.) :	104	185	117	109	101	1	1	1
à (sec.) :	1598	1465	end	1199	end	end	end	end
coefficients de pondération pour :								
l'ensemble de 3 cycles principaux	28,1				41,3		30,6	
l'ensemble de 8 cycles	17,4	11,8	11,9	11,7	17,9	9,8	16,2	3,3
distance (km)	42,902	36,939	6,957	23,107	10,682	4,185	3,470	2,914
durée (mn)	24,92	21,35	9,73	18,18	12,38	11,98	9,32	9,70
vitesse moyenne (km/h)	103,3	103,8	42,9	76,2	51,8	21,0	22,3	18,0
vitesse moyenne hors arrêts (km/h)	104,4	106,2	46,1	77,7	57,1	28,7	29,7	22,9
nombre d'arrêts (vitesse V=0)	2	1	2	0	4	14	6	12
durée à l'arrêt (mn)	0,25	0,48	0,68	0,35	1,15	3,23	2,30	2,07
durée relative à l'arrêt (% de durée)	1,0	2,3	7,0	1,9	9,3	27,0	24,7	21,3
fréquence des arrêts /km	0,05	0,03	0,29	0,00	0,37	3,35	1,73	4,12
écart-type des accélérations (m/s ²)	0,44	0,50	0,62	0,40	0,67	0,70	0,60	0,55
accélération positive moyenne (m/s ²)	0,71	0,59	0,80	0,54	0,72	0,81	0,79	0,71
décélération moyenne (m/s ²)	-0,85	-0,71	-0,76	-0,70	-0,93	-0,97	-0,79	-0,75

Annexe 11 : Mesure des émissions de polluants sur les cycles représentatifs

A.11.1 - Echantillon de véhicules

Marque	Modèle	Année	Puissance kw	Régime de puissance maxi t/mn	Cylindrée cm ³	Masse kg	Masse de référence kg	kilométrage km
Véhicules à essence catalysés								
Renault	Laguna	1995	68	5750	1794	1125	1250	11180
Opel	Astra	1996	74	6200	1597	1050	1020	18000
Ford	Fiesta	1995	36	5200	1118	870	910	15000
Fiat	Tipo	1994	51	6000	1372	1020	1020	45000
Toyota	Corolla	1994	65	6000	1332	1070	1130	53000
Fiat	Punto	1996	40	5500	1108	850	910	22000
Citroen	Xantia	1997	81	5500	1761	1234	1250	5000
Seat	Ibiza	1996	55	5200	1598	930	910	40600
Opel	corsa	1996	44	5200	1398	865	910	15000
VW	Polo	1997	44	4700	1400	910	910	16000
VW	Golf	1997	66	5500	1781	1035	1020	5600
Toyota	Carina	1996	85	6000	1587	1160	1130	52000
Peugeot	106 Color	1994	44	6200	1124	780	800	47200
Renault	Megane	1996	66	5000	1598	1055	1020	23000
Audi	80	1994	66	5400	1984	1190	1250	57000
Véhicules à essence non catalysés								
VW	Golf Trav.	1990	40	5200	1272	845	910	130000
Renault	Super 5	1985	43	5250	1108	740	910	85000
Ford	Sierra	1988	65	5400	1796	1090	1130	100000
Opel	Kadett	1992	55	5600	1389	850	910	67000
Peugeot	405SR	1989	81	6000	1905	1020	1020	110000
Véhicules diesel non catalysés								
Renault	Clio	1993	47,8	4500	1870	905	910	72000
Toyota	Carina	1993	54	4600	1975	1100	1130	80000
Ford	Escort	1990	43	4800	1753	900	910	70000
VW	Golf GTD	1989	51	4500	1588	960	910	215000
Citroen	ZX	1994	51	4600	1905	1035	1020	71000
Véhicules diesel catalysés								
VW	Golf GTD	1994	55	4200	1896	1075	1130	33000
Peugeot	205 Gén.	1997	57	4300	1769	880	910	7500
Opel	Astra	1996	44	4600	1699	1070	1130	29600
Ford	Mondeo	1997	65	4500	1753	1340	1360	20000
Opel	Vectra	1997	60	4300	1994	1385	1360	2800

A.11.2 - Emissions de polluants selon les catégories de véhicules

véhicules à essence catalysés			15 véhicules					
cycle	CO g/km		HC g/km moyenne	NOx g/km		CO2 g/km		écart-type
	moyenne	écart-type		écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	
urbain froid	4,6	3,0	0,66	0,59	0,36	0,17	213	34
urbain chaud	2,0	1,7	0,21	0,15	0,25	0,15	199	27
route	1,3	1,2	0,09	0,08	0,28	0,20	154	20
autoroute	0,9	1,1	0,06	0,05	0,43	0,30	154	17
urbain 1	3,4	6,6	0,22	0,28	0,27	0,18	204	30
urbain 3	3,2	5,4	0,23	0,24	0,20	0,15	214	32
route 1	1,9	2,6	0,13	0,13	0,31	0,21	147	21
route 2	1,1	1,1	0,12	0,16	0,32	0,23	134	22
autoroute 2	2,7	2,1	0,14	0,10	0,49	0,32	153	16
ECE urb. + extra-urbain	1,4	1,0	0,22	0,13	0,26	0,12	165	25
ECE urb. + extra-urbain	2,0	1,2	0,30	0,12	0,26	0,13	162	23
véhicules à essence non catalysés			5 véhicules					
urbain froid	31,4	5,9	4,46	0,84	1,57	0,70	176	41
urbain chaud	22,9	6,3	3,37	0,89	1,55	0,62	163	36
route	16,7	4,8	2,24	0,55	1,98	0,95	131	24
autoroute	11,5	4,2	1,36	0,34	3,02	0,84	138	12
urbain 1	24,5	8,0	3,23	0,99	1,55	0,85	170	38
urbain 3	25,0	10,8	3,49	1,23	1,36	0,64	180	38
route 1	15,8	5,3	2,31	0,82	1,37	0,67	121	29
route 2	10,3	4,1	1,54	0,54	2,18	0,71	121	16
autoroute 2	11,6	1,2	1,52	0,40	3,07	0,88	142	16
ECE urb. + extra-urbain	12,6	5,5	1,89	0,41	1,89	0,74	144	19
véhicules diesel non catalysés			5 véhicules					
urbain froid	0,84	0,19	0,15	0,06	0,60	0,15	181	15
urbain chaud	0,62	0,11	0,12	0,05	0,60	0,14	160	13
route	0,37	0,05	0,06	0,02	0,48	0,08	133	11
autoroute	0,26	0,05	0,04	0,01	0,58	0,10	146	12
urbain 1	0,62	0,08	0,10	0,02	0,64	0,17	179	12
urbain 3	0,69	0,13	0,11	0,01	0,65	0,16	174	13
route 1	0,61	0,41	0,09	0,06	0,60	0,47	169	109
route 2	0,29	0,04	0,04	0,01	0,46	0,09	125	10
autoroute 2	0,31	0,04	0,04	0,01	0,56	0,10	149	10
ECE urb. + extra-urbain	0,47	0,15	0,07	0,03	0,44	0,11	126	27
véhicules diesel catalysés			5 véhicules					
urbain froid	0,68	0,28	0,106	0,033	0,63	0,22	200	38
urbain chaud	0,55	0,38	0,088	0,036	0,63	0,23	191	19
route	0,20	0,11	0,037	0,018	0,57	0,25	160	16
autoroute	0,07	0,07	0,012	0,007	0,74	0,34	171	16
urbain 1	0,51	0,32	0,072	0,038	0,65	0,22	205	27
urbain 3	0,48	0,28	0,079	0,053	0,59	0,33	182	63
route 1	0,31	0,17	0,055	0,031	0,47	0,16	153	17
route 2	0,14	0,06	0,023	0,011	0,52	0,20	148	14
autoroute 2	0,05	0,04	0,009	0,004	0,85	0,43	167	13
ECE urb. + extra-urbain	0,43	0,19	0,056	0,042	0,44	0,10	163	14

A.11.3 - Facteurs d'émission calculés à partir des mesures sur les cycles représentatifs par combinaison des 3 ou 8 cycles

Emissions moyennes de polluants mesurées sur un échantillon de 30 voitures en utilisant les cycles représentatifs :

- urbain, route et autoroute : 3 cycles principaux ; urbain (3), route (3) et autoroute (2) : par combinaison des mesures sur les 2 ou 3 cycles correspondants
- ensemble (3 cycles) et ensemble (8 cycles) : combinaison des mesures sur les 3 ou 8 cycles

	CO g/km	HC g/km	NOx g/km	CO2 g/km
véhicules essence catalysés				
	15 véhicules			
urbain	1,96	0,21	0,25	199
urbain (3 cycles)	2,64	0,21	0,25	203
route	1,25	0,09	0,28	154
route (3 cycles)	1,40	0,11	0,30	147
autoroute	0,92	0,06	0,43	154
autoroute (2 cycles)	1,62	0,09	0,45	154
globalement (3 cycles)	1,36	0,12	0,31	166
globalement (8 cycles)	1,80	0,13	0,33	164
véhicules essence non catalysés				
	5 véhicules			
urbain	22,9	3,37	1,55	163
urbain (3 cycles)	23,7	3,33	1,53	167
route	16,7	2,24	1,98	131
route (3 cycles)	14,8	2,09	1,85	126
autoroute	11,5	1,36	3,02	138
autoroute (2 cycles)	11,5	1,42	3,04	139
globalement (3 cycles)	17,0	2,31	2,14	142
globalement (8 cycles)	16,4	2,25	2,09	141
véhicules diesel non catalysés				
	5 véhicules			
urbain	0,62	0,116	0,60	160
urbain (3 cycles)	0,63	0,111	0,62	169
route	0,37	0,065	0,48	133
route (3 cycles)	0,42	0,067	0,51	142
autoroute	0,26	0,035	0,58	146
autoroute (2 cycles)	0,28	0,037	0,57	147
globalement (3 cycles)	0,41	0,071	0,54	144
globalement (8 cycles)	0,44	0,071	0,56	151
véhicules diesel catalysés				
	5 véhicules			
urbain	0,55	0,088	0,63	191
urbain (3 cycles)	0,53	0,081	0,63	195
route	0,20	0,037	0,57	160
route (3 cycles)	0,22	0,039	0,53	155
autoroute	0,07	0,012	0,74	171
autoroute (2 cycles)	0,06	0,011	0,78	170
globalement (3 cycles)	0,26	0,045	0,63	172
globalement (8 cycles)	0,26	0,043	0,63	170

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : Prénoms :	ANDRÉ Michel, Raymond	DATE de SOUTENANCE 3 février 1998
TITRE :	Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules	
NATURE : Formation doctorale	Doctórat INGÉNIERIE INFORMATIQUE	Numéro d'ordre : 98 ISAL 0006
Cote B.I.U. - Lyon: T 50/210/19 /	et	bis
		CLASSE :
RESUME :	<p>La mesure des émissions de polluants des véhicules nécessite la définition de conditions de tests et de cycles de conduite représentatifs. Celle-ci nécessite la constitution d'une base d'information sur les conditions réelles d'usage et de fonctionnement des véhicules, par l'instrumentation de voitures privées utilisées normalement. Selon ces principes, 80 voitures européennes ont été sélectionnées puis instrumentées par quatre laboratoires européens. Globalement, 10000 trajets et 90 000 kilomètres ont été enregistrés.</p> <p>On analyse les conditions de circulation au travers de la courbe de vitesse enregistrée à bord des véhicules, au cours de déplacements élémentaires ou segments cinématiques de tailles homogènes. Ces segments cinématiques sont décrits par la distribution croisée des vitesses et accélérations instantanées. Une Analyse des Correspondances Binaires suivie d'une classification, permet de construire une typologie des conditions de circulation en 12 classes. Avec les mêmes outils, on analyse et établit une typologie des trajets selon les conditions de circulation rencontrées. On construit ensuite deux ensembles de 3 et 8 cycles représentatifs des trajets urbains, routiers et autoroutiers.</p> <p>30 véhicules à essence, diesel, avec et sans catalyseur sont testés sur banc d'essai en utilisant ces cycles. La mesure des émissions des polluants CO, HC, NOx et CO₂ sur les 3 cycles principaux conduit à une sous-estimation par rapport aux résultats obtenus à partir des 8 cycles. Ceci démontre la nécessité d'une description détaillée des conditions de circulation, des conditions non moyennes de fonctionnement pouvant conduire à de fortes surémissions. Des relations entre conditions cinématiques et thermiques et l'incidence du démarrage à froid sur les émissions urbaines montrent la nécessité d'approfondir ce point. Le lien entre conditions de circulation et caractéristiques des véhicules tend à remettre en cause le principe de cycles communs à l'ensemble des véhicules.</p>	
MOTS-CLES :	méthode mesure, banc d'essai, émission polluant, véhicule routier, vitesse, accélération, instrument embarqué, analyse données, classification automatique	
Laboratoire(s) de recherches :	INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS ET LEUR SÉCURITÉ - Laboratoire Énergie et Nuisances	
Directeurs de thèse :	M. Patrick PRÉVOT M. Abdelkébir ABDALI	INSA, Lyon, Dépt. Génie Productique Université P.Mendès-France, Grenoble, Lab. LABSAD
Président du jury Composition du jury	M. Patrick PRÉVOT M. Abdelkébir ABDALI M. Jean DELSEY M. Gérard d'AUBIGNY Mme Nicole VINCENT M. Jean-Claude GUIBET Mme Jane NOPPE	INSA, Dépt. Génie Productique - 69621 Villeurbanne Cedex LABSAD, Université Pierre Mendès-France - 38040 Grenoble INRETS, Lab. Energie Nuisances - 69675 Bron Cedex LABSAD, Université Pierre Mendès-France - 38040 Grenoble E3I, Université François Rabelais - 37200 Tours IFP - B.P. 311 - 92506 Rueil-Malmaison Cedex ADEME, 27 rue Louis Vicat - 75737 Paris Cedex 15

