



HAL
open science

De l'ergonomie automobile à l'optimisation de la conduite automatisée. Application à l'écoconduite des véhicules électriques

Edwin Solano Araque

► **To cite this version:**

Edwin Solano Araque. De l'ergonomie automobile à l'optimisation de la conduite automatisée. Application à l'écoconduite des véhicules électriques. Autre. Université d'Orléans, 2020. Français. NNT : 2020ORLE3059 . tel-04416415

HAL Id: tel-04416415

<https://theses.hal.science/tel-04416415>

Submitted on 25 Jan 2024

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.

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE
ENERGIE, MATERIAUX, SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
LABORATOIRE PRISME

THÈSE présentée par :

Edwin SOLANO ARAQUE

soutenue le : 3 novembre 2020

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Energétique

**De l'ergonomie automobile à
l'optimisation de la conduite
automatisée. Application à
l'écoconduite des véhicules électriques**

THÈSE dirigée par :

Guillaume COLIN
Yann CHAMAILLARD

Maître de conférences, HDR, Université d'Orléans
Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Sorin OLARU
Pierre MELCHIOR

Professeur, Université Paris-Saclay
Professeur, Bordeaux INP

EXAMINATEURS :

Alain BOUSCAYROL
Guy-Michel CLOAREC

Professeur, Université de Lille - Président du jury
Docteur, Renault S.A.S., co-encadrant

INVITE :

Abdel-Djalil OURABAH

Docteur, Renault S.A.S.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	i
TABLE DES FIGURES	vii
LISTE D'ACRONYMES	xv
REMERCIEMENTS	1
I Introduction	7
1 CONTEXTE, ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE	9
1.1 LE DÉFI DU XXI ^E SIÈCLE	9
1.2 ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE DE L'AUTOMOBILE	12
1.3 ECO-CONDUITE ET HABITUDES DES CONDUCTEURS	14
1.3.1 Écoconduite en situation réelle	15
1.4 ÉTAT DE L'ART : AUTOMATISATION DE L'ÉCOCONDUITE	16
1.5 APPORT DE LA PSYCHOLOGIE COGNITIVE À LA CONCEPTION DE SYSTÈMES D'AIDE À LA CONDUITE	18
1.5.1 Mécanismes cognitifs pour la résolution de problèmes	19
1.5.2 Apprentissage et expertise	24
1.5.3 Des neurones aux pensées : organisation de la cognition humaine	29
1.6 ANALYSE COGNITIVE DE LA CONDUITE ÉCOLOGIQUE	31
1.6.1 Espace d'états du problème global de conduite	32
1.6.2 Espace d'états du problème de détermination de vitesse stabilisée pendant le trajet	37
1.6.3 Espace d'états du problème d'un changement de vitesse	39
1.7 DISCUSSION : APPORTS DE L'APPROCHE COGNITIVE	41
II Modélisation ergonomique du conducteur et des manœuvres	49
1 DÉFINITION DE CONTRAINTES D'AGRÈMENT DE CONDUITE	53
1.1 PERCEPTION DU MOUVEMENT : LE SYSTÈME VESTIBULAIRE	54
1.2 MÉCANISMES D'EXCITATION DES ORGANES OTOLITHIQUES	59

1.2.1	Excitation mécanique des organes otolithiques et polarisation des cellules sensorielles	60
1.2.2	Excitation de neurones afférents	68
1.2.3	Intégration des informations dans les noyaux vestibulaires	73
1.3	ÉVALUATION DE LA FONCTION DES ORGANES OTOLITHIQUES : POTENTIELS MYOGÉNIQUES ÉVOQUÉS	75
1.4	ANALYSE D'ÉTUDES EN ERGONOMIE	80
1.5	SYNTHÈSE : QU'AVONS NOUS APPRIS SUR L'AGRÈMENT DE CONDUITE	90
2	MODÉLISATION DU CONDUCTEUR ET TOPOLOGIE DES MANŒUVRES DE CONDUITE	95
2.1	REPRÉSENTATION DU SYSTÈME VESTIBULAIRE STABILISÉ (SYSTÈME VESTIBULAIRE STABILISÉ (SVS, <i>Sustained Vestibular System</i>))	96
2.2	REPRÉSENTATION DU SYSTÈME VESTIBULAIRE TRANSITOIRE (SYSTÈME VESTIBULAIRE TRANSITOIRE (SVT, <i>Transient Vestibular System</i>))	98
2.3	REPRÉSENTATION D'UNE MANŒUVRE ÉLÉMENTAIRE	99
2.3.1	Exemple de manœuvre : changement de rapport de vitesse d'un véhicule conventionnel	99
2.3.2	Exemple de manœuvre : accélération (positive ou négative) à vitesse non-nulle	100
2.4	PRISE EN COMPTE DE PHÉNOMÈNES ALTÉRANT LA PERCEPTION DU CONDUCTEUR, ET LEUR TOLÉRANCE AUX STIMULI	103
2.4.1	Phénomènes affectant la perception du mouvement	104
2.4.2	Phénomènes affectant la tolérance au mouvement	105
3	AU VOLANT DE SON VÉHICULE : ANALYSE DE ROULAGES RÉELS	109
3.1	TRAITEMENT DE DONNÉES	110
3.1.1	Méthode de filtrage et dérivation d'un signal à échantillonnage non-uniforme	111
3.1.2	Implémentation causale de la méthode : fenêtres « orientées vers la gauche »	116
3.1.3	Réponse fréquentielle du filtre et choix des paramètres de la méthode	118
3.1.4	Considérations pratiques pour l'implémentation de l'algorithme	122
3.1.5	Application à des signaux de roulages réels	127
3.2	EXTRACTION DES MANŒUVRES DE CONDUITE	130
3.2.1	Interface pour l'analyse et extraction de scénarii de conduite	130
3.2.2	Effet de la pente sur le signal de l'accéléromètre	132
3.2.3	Extraction de manœuvres de conduite	135
3.2.4	Élimination de valeurs aberrantes dans les enregistrements des manœuvres	137
3.3	APPROXIMATION TRAPÉZOÏDALE DES MANŒUVRES	139
3.3.1	Identification des manœuvres de conduite - formulation	140
3.3.2	Identification des manœuvres de conduite réelles	148
3.4	ANALYSE DES PARAMÈTRE DES MANŒUVRES	150
3.4.1	A-coup de la phase initiale : J_1	153
3.4.2	A-coup de la phase finale : J_3	154

3.4.3	Accélération de la phase stabilisée: a_{ex}	156
3.4.4	Rapidité longitudinale de la manœuvre: q_{long}	159
3.4.5	Synthèse des résultats et discussion	163
3.5	DÉPENDANCE À-COUP - DURÉE DES PHASES TRANSITOIRES	164
3.5.1	Limites d'à-coup en fonction de la durée	166
3.6	ANALYSE DES ROULAGES RÉELS: DISCUSSION	168

III Modélisation énergétique des manœuvres de conduite - Potentiel de l'écoconduite

171

1	MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DES MANŒUVRES DE CONDUITE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE	173
1.1	MODÉLISATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE	174
1.1.1	Modèle physique de la consommation	175
1.1.2	Modèle analytique de la consommation	184
1.2	MODÈLE ÉNERGÉTIQUE DES MANŒUVRES DE CONDUITE	192
1.2.1	Modélisation cinématique d'une manœuvre de conduite	193
1.2.2	Modélisation physique des manœuvres	195
1.2.3	Modélisation analytique des manœuvres	196
1.2.4	Simulation de la consommation des manœuvres	206
1.3	REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE DES MANŒUVRES DE CONDUITE	213
1.3.1	Cartographie de tension de la batterie	214
1.3.2	Motorisation	216
1.3.3	Batterie	218
1.3.4	Groupe moto-propulseur	218
1.3.5	Affichage d'une manœuvre de conduite	224
2	POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE ET SOURCES DE GAIN DE L'ÉCOCONDUITE	227
2.1	MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE DES STRATÉGIES DE CONDUITE	229
2.1.1	Réduction de la vitesse stabilisée (RVS)	230
2.1.2	Modulation de l'accélération (MA)	231
2.1.3	Modulation de la décélération (MD)	235
2.2	POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE DES STRATÉGIES D'ÉCOCONDUITE: SCÉNARIOS URBAINS	237
2.2.1	Réduction de la vitesse stabilisée (RVS)	238
2.2.2	Modulation de l'accélération (MA)	240
2.2.3	Modulation de la décélération (MD)	242
2.2.4	Comparaison du potentiel des stratégies d'écoconduite	244
2.3	POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE DES STRATÉGIES D'ÉCOCONDUITE: SCÉNARIOS EXTRA-URBAINS	245
2.3.1	Réduction de la vitesse stabilisée (RVS)	245
2.3.2	Modulation de l'accélération (MA)	246

2.3.3	Modulation de la décélération (MD)	246
2.3.4	Comparaison du potentiel des stratégies d'écoconduite	249
2.4	INFLUENCE DE L'UTILISATION DES AUXILIAIRES SUR L'ÉCOCONDUITE	250
2.4.1	Scénarios urbains	250
2.4.2	Comparaison du potentiel des stratégies d'écoconduite: scénarios urbains	253
2.4.3	Scénarios extra-urbains	254
2.4.4	Comparaison du potentiel des stratégies d'écoconduite: scénarios extra-urbains	257
2.5	DISCUSSION	258
IV	Algorithme pour l'automatisation de l'écoconduite	261
1	STRUCTURE DE L'ALGORITHME	263
1.1	RAPPEL DES PRINCIPES COGNITIFS UTILISÉS	264
1.2	STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'ALGORITHME	266
1.3	APPLICATION DES PRINCIPES COGNITIFS À LA COMMANDE DE SYSTÈMES DYNAMIQUES	267
1.3.1	Formulation « classique » d'un problème de commande optimale	268
1.3.2	Formulation du problème « quasi-optimal » de commande inspirée sur des principes cognitifs	269
1.3.3	Gestion des perturbations sur les contraintes	272
1.3.4	Gestion des imprécisions sur le suivi de la dynamique	273
1.3.5	Commentaires sur la méthode proposée	274
2	COMPÉTENCE STRATÉGIQUE	275
2.1	PROBLÈME <i>quasi-optimal</i> D'ÉCOCONDUITE: FONCTION COÛT ET CONTRAINTES	276
2.1.1	Fonction coût	277
2.1.2	Contrainte sur la vitesse finale	278
2.1.3	Contrainte sur la distance finale	280
2.1.4	Contraintes temporelles	283
2.1.5	Contraintes liées à l'agrément de conduite	283
2.2	PROBLÈME <i>quasi-optimal</i> D'ÉCOCONDUITE: SCÉNARIOS D'ÉCOCONDUITE	285
2.2.1	Problème quasi-optimal d'écoconduite: distance finale libre	285
2.2.2	Problème quasi-optimal d'écoconduite: distance finale libre et manœuvre symétrique	287
2.2.3	Problème quasi-optimal d'écoconduite: distance finale libre et à-coup défini à l'avance	287
2.2.4	Problème quasi-optimal d'écoconduite: correction par rapport à une distance de référence	288
2.3	EXTRACTION DES PARAMÈTRES DU SCÉNARIO: ANALYSE DES MANŒUVRES RÉELLES	290
2.4	RÉSOLUTION HORS-LIGNE: ALGORITHME DE FORCE BRUTE	296

2.4.1	Domaine de recherche de l'algorithme	296
2.4.2	Définition des fonctions utilisées par l'algorithme	297
2.4.3	Initialisation de l'algorithme	297
2.4.4	Calcul de la consommation par Force brute	298
2.4.5	Résolution des problèmes d'optimisation	301
2.5	RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION	303
2.5.1	Problème à trapèzes asymétriques (à-coups initiale et finale libres)	303
2.5.2	Problème à trapèzes symétriques (à-coups initial et final identiques)	308
2.5.3	Problème à à-coups initial et final définis à l'avance	311
2.6	ANALYSE DU TEMPS D'EXÉCUTION DE L'ALGORITHME	313
2.7	PERSPECTIVES : SIMPLIFICATION DE LA FONCTION D'OPTIMISATION	314
3	EXÉCUTION TEMPS-RÉEL DES MANŒUVRES DE CONDUITE	319
3.1	GESTION CINÉMATIQUE DES PHASES DE LA MANŒUVRE	321
3.2	ADAPTATION DE LA MANŒUVRE AUX ÉVOLUTIONS DU CONTEXTE	325
3.2.1	Phase 1 : adaptation des paramètres	326
3.2.2	Phase 2 : déclenchement de la phase finale	332
3.2.3	Phases 3 et 0 : fin de la manœuvre et maintien de la vitesse stabilisée	335
3.3	RÉSULTATS SUR UN SCÉNARIO RÉEL	336
3.4	GÉNÉRATION DES CONSIGNES AUX ACTIONNEURS	339
3.4.1	Structure de la commande d'accélération	340
3.4.2	Performance de la commande en simulation	342
3.5	RÉPONSE DE L'ALGORITHME AUX IMPRÉCISIONS DES CAPTEURS	345
3.6	OBSERVATIONS GÉNÉRALES	348
V	Discussion, conclusions et perspectives	351
1.1	CONCLUSIONS	353
1.2	PERSPECTIVES	358
1.2.1	Résolution temps-réel du problème d'optimisation	359
1.2.2	D'autres pistes d'exploration	361
1.2.3	Déclinaison des résultats sur des produits industriels	362
1.3	DISCUSSIONS	363
	LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR	365
	BIBLIOGRAPHIE	381

TABLE DES FIGURES

Partie I: Introduction	9
1.1 Espace du problème de planification du trajet	34
1.2 Estimation de coût par itinéraire	35
1.3 Espace du problème de détermination de vitesse stabilisée pendant le trajet	38
1.4 Espace du problème de changement de vitesse - manœuvres simples	40
1.5 Espace du problème de changement de vitesse - manœuvres complexes . .	41
Partie II: Modélisation ergonomique du conducteur et des manœuvres	51
1.1 Anatomie interne de l'oreille	56
1.2 Anatomie des organes otolithiques	57
1.3 Mécanismes d'activation du système vestibulaire	58
1.4 Étapes de transduction d'un signal vestibulaire	59
1.5 Composition mécanique et modélisation des organes otolithiques	60
1.6 Transduction mécano-électrique dans les cellules ciliées	63
1.7 Structure de la macula utriculaire	64
1.8 Polarisation directionnelle de la macula	65
1.9 Types de cellules ciliées	66
1.10 Signaux générés par les afférents réguliers et irréguliers	70
1.11 Réponse des neurones afférents à des trapèzes d'accélération	71
1.12 Réponse des neurones neurones phasiques et toniques à un stimulus constant	74
1.13 Représentation du signal VsEP	76
1.14 Effet de l'accélération et de l'à-coup sur le Potentiel Evoqué Vestibulaire à Courte Latence (VsEP)	77
1.15 Seuil de réponse du VsEP en fonction du temps d'application du stimulus d'à-coup	78
1.16 Amplitude N1-P1 du Potentiel Evoqué Vestibulaire à Courte Latence (VsEP) en fonction de l'à-coup	79
1.17 Courbes tentatives d'acceptabilité pour l'accélération d'un sol	82
1.18 Représentation de l'accélération du conducteur sur un plan	84

2.1	Modélisation de l'agrément de conduite basée sur la physiologie du système vestibulaire - phases stabilisées	97
2.2	Modélisation de l'agrément de conduite basée sur la physiologie du système vestibulaire - phases transitoires	98
2.3	Modélisation générale des manœuvres de conduite	100
2.4	Exemple de manœuvre : changement de rapport de vitesse	101
2.5	Exemple de manœuvre : accélération à vitesse non-nulle	102
2.6	Relation entre les limites des accélérations longitudinale et latérale	107
3.1	Vecteur temps ré-échantillonnage	112
3.2	Fenêtre temporelle	113
3.3	Récupération de points fenêtre temporelle	114
3.4	Approximation polynomiale des points dans la fenêtre	115
3.5	Reconstruction du point associé à la fenêtre	116
3.6	Réponse fréquentielle de la méthode	119
3.7	Effet de l'ordre du polynôme sur la fréquence de coupure	120
3.8	Effet de la taille de fenêtre sur la fréquence de coupure	121
3.9	Réponses fréquentielles à iso-fréquence de coupure, pour plusieurs ordres du filtrage	121
3.10	Détermination des points de la fenêtre - algorithme naïf	123
3.11	Détermination des points de la fenêtre - algorithme avancé	124
3.12	Traitement des signaux réels de roulage	127
3.13	« bruit » filtré aux signaux du véhicule	128
3.14	Estimation d'accélération et d'à-coup	129
3.15	Vérification de l'estimation de l'à-coup	130
3.16	Interface graphique : présentation de l'interface	131
3.17	Interface graphique : affichage d'un roulage	132
3.18	Roulage utilisé pour l'étude de l'effet de la pente	134
3.19	Roulage utilisé pour l'étude de l'effet de la pente	134
3.20	Manœuvre assimilable à une fonction affine par parties	135
3.21	Exemples de manœuvres assimilable à des trapèzes	136
3.22	Suppression des valeurs aberrantes dans les roulages	139
3.23	Identification de trapèzes - notation	141
3.24	Modèle trapézoïdal de mesure	141
3.25	Comparaison des fonctions de coût - Identification d'une manœuvre de d'accélération	145
3.26	Comparaison des fonctions de coût - Identification d'une manœuvre de décélération	146
3.27	Comparaison des fonctions de coût - coefficients de corrélation	147
3.28	Correction des paramètres de l'identification	147
3.29	Exemples des manœuvres « non-suffisamment trapézoïdales »	149

3.30	Exemples des manœuvres trapézoïdales	151
3.31	Histogramme d'à-coup de la phase initiale - référentiel véhicule	154
3.32	Histogramme d'à-coup de la phase finale - référentiel véhicule	156
3.33	Histogramme d'accélération stabilisée - référentiel véhicule	158
3.34	Histogramme de <i>rapidité longitudinale</i> des manœuvres - référentiel véhicule	161
3.35	Influence de la durée de la phase transitoire sur la valeur d'à-coup - manœuvres d'accélération	165
3.36	Identification : à-coup acceptable en fonction de la durée ; phase initiale de la manœuvre	167
3.37	Identification : à-coup acceptable en fonction de la durée ; phase finale de la manœuvre	168

Partie III: Modélisation énergétique des manœuvres de conduite - Potentiel de l'écoconduite

173

1.1	Architecture du véhicule électrique à batterie	176
1.2	Bilan des forces du véhicule	177
1.3	Cartographie des pertes dans la motorisation	179
1.4	Comparaison des pertes dans la motorisation pour deux valeurs de U_{bat}	179
1.5	Modèle de batterie à résistance interne	181
1.6	Cartographie de tension d'une cellule	182
1.7	Cartographies des résistances de charge et de décharge d'une cellule	183
1.8	Architecture globale d'un véhicule électrique à batterie	184
1.9	Identification de la loi de route	186
1.10	Zone de fonctionnement pour l'identification des pertes dans la motorisation	189
1.11	Identification du modèle analytique des pertes dans la motorisation : manœuvre d'accélération	190
1.12	Identification du modèle analytique des pertes dans la motorisation : manœuvre de décélération	190
1.13	Identification du modèle analytique de la batterie	192
1.14	Cartographie du paramètre batterie ρ_{bat}	192
1.15	Profil de manœuvre trapézoïdale d'accélération	193
1.16	Profils cinématiques des manœuvres de conduite	196
1.17	Résistance à l'avancement longitudinal au cours d'une manœuvre	207
1.18	Points de fonctionnement et puissance en entrée de la motorisation, au cours d'une manœuvre	208
1.19	Pertes et rendement de la motorisation, au cours d'une manœuvre	209
1.20	Puissance, pertes et état de charge de la batterie, au cours d'une manœuvre	210
1.21	Comparaison des temps de calculs des modélisations énergétiques des manœuvres - Modèle Simulink en Mode <i>Accelerator</i>	212

1.22	Tension de la batterie en fonction du point de fonctionnement du Groupe Motopropulseur (GMP)	215
1.23	Pertes dans la motorisation en fonction du point de fonctionnement du GMP	216
1.24	Rendement de la motorisation en fonction du point de fonctionnement du GMP	217
1.25	Pertes dans la batterie en fonction du point de fonctionnement du GMP . .	219
1.26	Rendement de la batterie en fonction du point de fonctionnement du GMP	220
1.27	Pertes dans la batterie en fonction du point de fonctionnement du GMP . .	221
1.28	Rendement associé au déplacement du GMP en fonction de son point de fonctionnement	222
1.29	Rendement associé aux prestations du GMP en fonction de son point de fonctionnement	223
1.30	Signaux cinématiques d'une manœuvre réelle	224
1.31	Représentation énergétique d'une manœuvre de conduite	226
2.1	Approches <i>basiques</i> pour la comparaison énergétique des manœuvres d'accélération	232
2.2	Approche <i>corrigée</i> pour la comparaison énergétique des manœuvres d'accélération	233
2.3	Paramétrage des manœuvres d'accélération	234
2.4	Approche <i>corrigée</i> pour la comparaison énergétique des manœuvres de décélération	236
2.5	Paramétrage des manœuvres de décélération	236
2.6	Effet de réduire la vitesse stabilisée sur la consommation : conduite urbaine	239
2.7	Effet de la modulation de l'accélération sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 40 - 50 km/h	241
2.8	Effet de la modulation de la décélération sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 50 - 40 km/h	243
2.9	Synthèse du potentiel de gain des stratégies d'écoconduite - scénarios urbains	244
2.10	Effet de réduire la vitesse stabilisée sur la consommation : conduite extra-urbaine	246
2.11	Effet de la modulation de l'accélération sur la consommation : conduite extra-urbaine - accélération de 110 - 130 km/h	247
2.12	Effet de la modulation de la décélération sur la consommation : conduite extra-urbaine - décélération de 130 - 110 km/h	248
2.13	Synthèse du potentiel de gain des stratégies d'écoconduite - scénarios extra-urbains	249
2.14	Effet de réduire la vitesse stabilisée sur la consommation - climatisation allumée : conduite urbaine	251
2.15	Effet de la modulation de l'accélération sur la consommation - climatisation allumée : conduite urbaine - accélération de 40 - 50 km/h	252

2.16	Effet de la modulation de l'décélération sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 50 - 40 km/h	253
2.17	Influence des auxiliaires électriques sur le potentiel de gain des stratégies d'écoconduite : scénarios urbains	254
2.18	Effet de réduire la vitesse stabilisée sur la consommation - climatisation allumée : conduite extra-urbaine	255
2.19	Effet de la modulation de l'accélération sur la consommation - climatisation allumée : conduite extra-urbaine - accélération de 110 - 130 km/h	256
2.20	Effet de la modulation de la décélération sur la consommation - climatisation allumée : conduite extra-urbaine - décélération de 130 - 110 km/h	257
2.21	Influence des auxiliaires électriques sur le potentiel de gain des stratégies d'écoconduite : scénarios extra-urbains	257
 Partie IV: Algorithme pour l'automatisation de l'écoconduite		263
1.1	Représentation de la structure cognitive associée à la résolution d'un problème	266
1.2	Structure de l'algorithme d'écoconduite	267
1.3	Définition de l'ensemble admissible du problème de commande <i>quasi-optimale</i>	270
2.1	Mesures des signaux cinématiques au cours de la manœuvre	291
2.2	Variables cinématiques du scénario d'accostage derrière un véhicule	292
2.3	Algorithme d'optimisation des manœuvres trapézoïdales de type <i>force brute</i> - remplissage des structures de données	299
2.4	Algorithme d'optimisation des manœuvres trapézoïdales de type <i>force brute</i> - calcul de la consommation corrigée, E_{mnv}^{corr}	301
2.5	Consommation de la manœuvre en fonction des paramètres d'optimisation : modèle physique, scénario réel, manœuvre asymétrique	304
2.6	Consommation de la manœuvre en fonction des paramètres d'optimisation : modèle analytique, scénario réel, manœuvre asymétrique	306
2.7	Évaluation des résultats : manœuvres asymétriques	307
2.8	Résultats de l'algorithme d'optimisation : modèle physique, scénario réel, manœuvre symétrique	309
2.9	Résultats de l'algorithme d'optimisation : modèle analytique, scénario réel, manœuvre symétrique	310
2.10	Évaluation des résultats : manœuvres symétriques	310
2.11	Estimation de la consommation globale corrigée de la manœuvre en utilisant des modèles différents	312
2.12	Comparaison des temps de calcul de l'algorithme d'optimisation par force brute - Modèles physique et analytique	314
3.1	Phases d'une manœuvre trapézoïdale de conduite	322

3.2	Représentation d'une manœuvre de conduite par un Système Dynamique Hybride	323
3.3	Représentation d'une manœuvre de conduite par une machine à états	324
3.4	Phase 1 : mise à jour des paramètres de la manœuvre	326
3.5	Phase 2 : évolution de la durée de la phase pour respecter l'objectif de vitesse	332
3.6	Notation fin phase 2 - approche simplifiée : évolution continue de l'accélération	333
3.7	Résultats de l'algorithme d'optimisation : modèle physique, manœuvre symétrique, données issues de mesures <i>au début</i> d'un scénario réel	338
3.8	Évaluation des résultats : application du questionnaire des manœuvres	338
3.9	Génération des consignes aux actionneurs	342
3.10	Signaux résultant de l'algorithme complet	344
3.11	Évaluation des résultats : exécution de la manœuvre	345
3.12	Signaux résultant de l'algorithme complet - retard dans le capteur	347
3.13	Évaluation des résultats : exécution de la manœuvre - retard dans la mesure d'accélération	348
Partie V: Discussion, conclusions et perspectives		353
1.1	Valeurs d'à-coup de la phase initiale des manœuvres réelles - référentiel véhicule	384
1.2	Valeurs d'à-coup de la phase finale des manœuvres réelles - référentiel véhicule	385
1.3	Valeurs d'accélération stabilisée des manœuvres réelles - référentiel véhicule	386
1.4	Valeurs de <i>rapidité longitudinale</i> des manœuvres réelles - référentiel véhicule	387
1.5	Effet de la Modulation de l'Accélération (MA) sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 0 - 20 km/h	399
1.6	Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 0 - 30 km/h	400
1.7	Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 0 - 50 km/h	400
1.8	Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 10 - 20 km/h	401
1.9	Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 20 - 30 km/h	401
1.10	Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 30 - 50 km/h	402
1.11	Effet de la Modulation de la Décélération (MD) sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 20 - 0 km/h	402
1.12	Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 30 - 0 km/h	403

1.13	Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 50 - 0 km/h	403
1.14	Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 20 - 10 km/h	404
1.15	Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 30 - 20 km/h	404
1.16	Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 50 - 30 km/h	405
1.17	Définition de la distance entre un <i>point</i> associé à une manœuvre et la fonc- tion d'à-coup acceptable	412
1.18	Distance signée entre un <i>point</i> associé à une manœuvre et la fonction d'à- coup acceptable	414
1.19	Fonctions asymétriques de pondération, $\phi_1(l)$ et $\phi_2(l)$	415
1.20	Notation fin phase 2 - approche avancée : évolution continue de l'accélération	420

LISTE D'ACRONYMES

Termes en Biologie:

CC	Couche de Cisaillement (<i>Shear Layer</i>)
CFC	Couche de Filaments de Colonne (<i>Column Filament Layer</i>)
CG	Couche de Gel (<i>Gel Layer</i>)
CNE	Neuro-Épithéliale
CO	Couche Otolithique (<i>Otoconial Layer</i>)
ESL	Extrastriola Latérale (<i>Lateral Extrastriola</i>)
ESM	Extrastriola Médiale (<i>Medial Extrastriola</i>)
FV	Fonction Vestibulaire
IRMf	Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle
MO	Membrane Otolithique
OO	Organes Otolithiques
VsEP	Potentiels Evoqués Vestibulaires à Courte Latence (<i>Short-Latency Vestibular Evoked Potentials</i>)
VEMP	Potentiels Evoqués Vestibulaires Myogéniques (<i>Vestibular Evoked Myogenic Potentials</i>)
SNC	Système Nerveux Central
SV	Système Vestibulaire
SVS	Système Vestibulaire Stabilisé (<i>Sustained Vestibular System</i>)
SVT	Système Vestibulaire Transitoire (<i>Transient Vestibular System</i>)

Termes en Ingénierie et Mathématique :

DAM	Déviatiion Absolue Médiane (<i>Median Absolute Deviation</i>)
GMP	Groupe Motopropulseur
MA	Modulation de l'Accélération
MD	Modulation de la Décélération
ME	Machine Électrique
PD	Programmation Dynamique
PMP	Principe du Minimum de Pontriaguine
RVA	Régulateur de Vitesse Adaptatif
RVS	Réduction de Vitesse Stabilisée
SAC	Système d'Aide à la Conduite
SDH	Système Dynamique Hybride
V2I	Communication Véhicule-Infrastructure (<i>Vehicle-to-infrastructure</i>)
VAC	Véhicule Autonome et Connecté
VE	Véhicule Électrique
VEB	Véhicule Électrique à Batterie

REMERCIEMENTS

Au cours des plus de quatre années écoulées pendant la réalisation de ces travaux, de nombreuses personnes en ont fait des précieuses contributions. Les remercier toutes étant une entreprise trop difficile, j'essayerai ici d'exprimer ma gratitude au plus grand nombre.

En premier lieu, je remercie Jésus-Christ, à qui tout ce travail est dédié. Merci Jésus d'être mon ami, mon Roi et mon frère.

Je tiens à remercier de tout cœur mon directeur de thèse, M. Guillaume Colin de l'Université d'Orléans, pour sa confiance, son soutien et sa patience pendant la réalisation de ces travaux. Depuis qu'il a été mon professeur à Polytech Orléans, et jusqu'à ce jour, il a été une référence sur le plan technique, pédagogique et humain. Merci aussi de m'avoir permis de découvrir le monde de l'enseignement académique. Un jour on réussira enfin à trouver le bon compromis entre la théorie et l'application lors de l'enseignement de l'Automatique!

Un grand merci à M. Yann Chamaillard de l'Université d'Orléans d'avoir co-dirigé cette thèse. Ses questions sur la pertinence et l'applicabilité de certaines pistes de réflexion ont permis d'orienter ces travaux dans la bonne direction. Merci aussi pour les échanges enrichissants que nous avons eus au cours de ces années.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à M. Guy-Michel Cloarec, mon encadrant industriel au sein de Renault S.A.S. En plus de ses qualités sur le plan technique et sa rigueur sans paire, il a fait preuve d'une grande bienveillance à mon égard, en m'orientant pour faire les meilleurs compromis entre les enjeux industriels et académiques. C'est aussi la personne avec la plus grande culture générale que je connaisse. Son exemple restera une source d'inspiration au long de ma carrière.

Je remercie également M. Djalil Ourabah de Renault S.A.S. d'avoir pris le flambeau de mon encadrement. En plus de ses précieuses contributions sur le plan technique, j'ai grandement apprécié ses conseils, ses orientations et son exemple concernant l'organisation du travail et la clarté dans la façon de communiquer ; cette thèse aurait difficilement réussi sans ses apports. Sa juste combinaison de bienveillance et rigueur lors de l'encadrement de personnes, me servira de modèle dans les années à venir.

Il a été un grand honneur pour moi d'avoir bénéficié de leur encadrement et leurs orientations.

Je remercie également Messieurs Pierre Melchior, Professeur à Bordeaux INP, et Sorin Oлару, professeur à CentraleSupélec, d'avoir accepté d'être rapporteurs sur ce travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à M. Alain Bouscayrol, Professeur à l'Université de Lille, pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

Je remercie mon responsable hiérarchique de Renault, M. Pierre De-Baudus, pour sa confiance, sa compréhension et ses conseils tout au long de ces années. Merci également à M. Karim Ben-Cherif, chef de service chez Renault, pour l'intérêt montré pour mes travaux. Un grand merci à M. Ahmed Ketfi-Cherif, à M. Guillermo Pita-Gil (et à son équipe) et à M. Patrick Vincent, experts techniques chez Renault, pour tous leurs apports à l'avancement et à la diffusion de cette recherche.

Je suis profondément reconnaissant à l'ensemble de personnes avec qui j'ai eu l'honneur de travailler chez Renault. Étant trop nombreuses pour les citer, j'essaierai juste de mentionner ceux qui ont fait partie de mon équipe (en sachant que certains seront sûrement oubliés ; pardon à l'avance) : Mesdames et Messieurs Ludovic Merienne (dont la qualité de son travail n'est égalee que par la qualité de ses blagues), Thomas Miro-Padovani, Ronan Le-Bras, Nesrine Ben-Beldi, Manoela Ferreira-de-Araujo, Thibaut Dezaille, Aurélien Lefèvre, Sandra Hamze, Teresa Gonzalez, Cédric, Asma Dridi, Adina Sorostinean, Carolina Ferreira, Pierre Binet, Clément Royer, Allassane Seydou, Mahdi-Nazim Saidi. Une mention spéciale à Mlle. Souad Hadj-Said avec qui, en plus d'avoir partagé le même bureau pendant la plupart de ces années, j'ai eu le privilège de voyager en Chine pour assister à une conférence et partager des moments remarquables qui resteront gravés dans ma mémoire.

Un grand merci à tous les membres (passés, présents et honoraires) de la Communauté des Doctorants chez Renault, pour leur amitié et pour tous les échanges sur des sujets toujours variés et intéressants : Mesdames et Messieurs Clara Gandrez, Sonia Assou, Benoit Laussat, Carolina Rengifo, Jean Mercat, Edouard Leurent, Guillaume Lucas, Tanguy Lo, Lu Zhao, Lucie Juste, Clarie Badouel, Martin Charrier, Marc Nabhan...

Je remercie l'ensemble des personnes travaillant dans le laboratoire Prime pour leur accueil chaleureux. Un grand merci à M. Alain Charlet et M. Dominique Nelson-Gruel pour les échanges toujours enrichissants et à Mme. Sylvie Plessard pour sa grande gentillesse et sa patience lors de la gestion de mes Ordres de mission faites à la dernière minute. J'exprime aussi tout ma gratitude aux doctorants et stagiaires du laboratoire (et surtout à ceux du bureau 007!) : Antoine Simon, Salim Sayssouk, Mounia Hammoudi, Charles L'Huillier, Emmanuel Nault...

Je remercie également M. Raphaël Bonifaci, M. Florent Colin et M. Hugo Hong, que j'ai pu encadrer lors de la préparation d'un projet TIPE avec le Lycée Polyvalent de Cachan. Leur travail et implication a enrichi la préparation de cette thèse.

Finalement, j'associe à ces remerciements mes parents, ma sœur, mon beau-frère, mon neveu Santiago Zambrano et toute ma famille, ainsi que l'ensemble de mes amis sur Orléans, la Région Parisienne, en Colombie et ailleurs, qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ces années de doctorat. Merci pour vos mots d'encouragement, vos conseils, votre écoute et vos prières. Un grand merci à la famille Langlois, qui a été comme ma deuxième famille en France. Une mention spéciale à Jiang Chang qui se compte parmi mes meilleurs amis. Sans vous tous, la réussite de cette thèse n'aurait pas été possible.

Un remerciement spéciale à Mme. Inés Espinosa, ma grand-mère, la dame la plus sage

que je connaisse ; ses conseils et ses encouragements ont été précieux pendant ces années de doctorat.

Enfin, un grand merci à tout ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à cette thèse et qui n'ont pas été mentionnés sur ces pages.

* * *

[Je traduit en espagnol les trois derniers paragraphes pour qu'il puissent être reçus par certaines des personnes concernées]

Finalmente, asocio a estos agradecimientos a mis padres, mi hermana, mi cuñado, mi sobrino Santiago Zambrano, y a toda mi familia, así que a todos mis amigos en Orléans, en la Region Parisina, en Colombia y en otros lugares, quienes me apoyaron y animaron a lo largo de estos años. Gracias por sus palabras de ánimo, sus consejos, su escucha y sus oraciones. Un gran agradecimiento a la familia Langlois, que ha sido como mi segunda familia en Francia. Una mención especial a Jiang Chang, quien es uno de mis mejores amigos. Sin todos ustedes, el éxito de esta tesis no hubiera sido posible.

Un agradecimiento especial a la Sra. Inés Espinosa, mi abuelita, la dama mas sabia que conozco; sus consejos y sus palabras de ánimo han sido preciosos durante estos años de tesis.

Finalmente, un gran agradecimiento a todos aquellos que contribuyeron de una u otra forma a esta tesis y que no fueron mencionados en estas páginas.

Quatre idées, exprimées dans les mots d'autres personnes, ayant nourri mes réflexions au cours de ces années de thèse, et discrètement reflétées sur ces pages...

« *Quand je contemple les cieux, ouvrage de tes mains,
La lune et les étoiles que tu as créées :
Qu'est-ce que l'homme [...] ?* »

Attribué au Roi David
Psaume 8, La Bible (extrait, traduction Nouvelle Edition de Genève 1979)

« *Instrument formidable dans l'espace et le temps, la mathématique est une science où personne ne sait jamais de quoi on parle - de pommes, de poires, de particules, de points, d'étoiles, de galaxies, d'univers... - ni si ce qu'on dit a une réalité.* »

Jean d'Ormesson
Comme un chant d'espérance

« *Friendship is unnecessary, like philosophy, like art, like the universe itself... It has no survival value; rather it is one of those things which give value to survival.* »

(L'Amitié n'est pas une chose nécessaire, comme la philosophie, comme l'art, comme l'univers lui-même... Elle n'a aucune valeur de survie ; c'est plutôt une de ces choses qui donnent de la valeur à la survie)

Clive Staples Lewis
The Four Loves

« *No se olvide nunca, mijo, que para ser buen hermano
No hay que dar de lo que sobra, sino lo que está faltando* »

(N'oublie jamais, mon enfant, que pour être un bon frère
il ne faut pas donner ce que tu as en trop, mais ce qui te manque)

Luis Javier Piedrahita Gaviria (Fausto)
Soñando con el abuelo (Chanson traditionnelle colombienne)

I

Introduction

CONTEXTE, ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE



PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Présentation de la problématique à traiter*
- *Présentation de l'état de l'art*
- *Présentation des principes cognitifs humains et proposition des pistes pour les appliquer au problème d'automatisation de l'écoconduite*

1.1 LE DÉFI DU XXI^E SIÈCLE

Objectif de la section

Décrire le contexte sociétal dans lequel s'inscrit notre travail

L'être-humain, en tant qu'espèce biologique, n'a pas de particularité qui le ferait sortir du lot, outre ses capacités cognitives, associées à la taille de son cerveau. Il s'agit d'un mammifère appartenant à l'espèce *Sapiens*, associée au genre *Homo*. Elle est d'ailleurs la seule espèce appartenant à ce genre qui aurait survécu jusqu'à nos jours [84].

Et pourtant, contre toute attente, l'influence de cette espèce sur la planète est, quasiment sans conteste, un phénomène sans précédent depuis que la vie existe sur terre. L'impact sur son entourage des autres créatures biologiques, aussi grandes, aussi puissantes soit elles, n'est pas comparable à celui des hominidés poilus que nous sommes.

C'est assez surprenant, en effet, et n'en déplaise aux Humanistes, que nous occupions cette place dans notre environnement. Ce ne sont pas des arbres majestueux, ni des féroces dinosaures ; pas des animaux ailés grandioses qui s'imposent aujourd'hui sur les autres espèces, mais des simples mammifères qui ont appris à marcher sur deux pattes. Nous avons même un mot pour décrire ce phénomène, de plus en plus présent dans les documents scientifiques : « Antropocène ».

Le terme *Antropocène*, du grec *'ανθρωπος*, *humain*, et *καιός*, *nouveau, frais* (sous-entendu, *Nouvelle époque*)¹, indique que nous sommes dans une phase de l'histoire de

notre planète où l'espèce humaine est la force géophysique ayant la plus grande influence au niveau mondial [131, 210].

Même s'il peut paraître prétentieux pour une espèce de revendiquer le rôle prépondérant dans son environnement, force est de constater l'énorme influence des êtres humains sur la planète. Nous avons une capacité inouïe à conquérir des nouveaux territoires, sur la mer et sous la mer, dans les entrailles de la Terre, dans l'étendue des Cieux ; nous arrivons même à sortir de notre planète et à explorer ses frontières. Le paysage en ait transformé aussi : nous sommes capables de bâtir des édifices qui rivalisent en altitude avec les montagnes, des murs qui se répandent sur des milliers de kilomètres, des lacs artificiels gigantesques qui nourrissent nos villes en électricité.

Aussi puissante l'Espèce Humaine puisse paraître, la réalité paradoxale est que nous sommes aussi extrêmement fragiles. Les événements en arrière-plan au moment où j'écris ces mots², associés à la maladie dénotée COVID-19, nous rappellent combien peu de chose il faut pour faire trembler notre souveraineté comme espèce ; un simple virus, dont le diamètre se mesure en nanomètres [30], a suffi à changer radicalement notre comportement pendant plusieurs mois.

Néanmoins, la plus grande menace sur notre horizon ne provient pas d'un agent extérieur, mais elle découle de nos propres actions ; malheureusement, notre impact sur la planète n'est pas purement positif. Par exemple, lorsqu'on compare le taux d'extinction des espèces biologiques, estimé relativement constant au fil des temps géologiques, le constat est malaisant : les espèces disparaissent aujourd'hui au moins fois cent fois plus vite ! [42]. Ce serait dû principalement à cinq causes : *la destruction des habitats, la surexploitation des ressources, la pollution, les espèces invasives et le changement climatique*. Elles sont toutes dues à l'homme ; nous consommons plus de ce que notre planète est capable de régénérer. La Terre peine sous notre intendance.

* * *

Le *Changement Climatique* fait l'objet de profondes réflexions au sein des états, des institutions et des citoyens. En effet, des estimations associent à l'Activité humaine une augmentation de la température moyenne de la planète d'environ 1°C, par rapport à des niveaux pré-industriels [131]. Ce phénomène produit déjà des impacts observables sur les écosystèmes océaniques et terrestres, parmi lesquels nous avons l'acidification des océans (qui absorbent environ 30% des émissions de dioxyde de carbone d'origine humaine), menaçant des nombreux écosystèmes ; il y a aussi des évidences montrant que le réchauffement climatique induit par l'homme serait à l'origine de l'incrément de la fréquence et l'intensité des fortes précipitations à l'échelle mondiale, ainsi que du risque de sécheresses dans la Région Méditerranéenne.

Si la cible issue de l'Accord de Paris est respectée [219], on estime que les effets cu-

1. Source : Greek Study Tool, Perseus Digital Library Project ; <http://www.perseus.tufts.edu/>

2. J'écris cette page le 4 juillet 2020, ce qui veut dire qu'en France nous devons encore mettre des masques dans les transports en commun, et de nombreuses personnes pleurent encore des êtres chers. Dans d'autres pays, le virus continue de faire des dégâts.

mulés sur le long-terme des émissions anthropogéniques se traduiront par une augmentation de température de 1,5°C, et qui devrait être stabilisé vers 2100 [131]. En revanche, cette valeur peut être atteinte suivant des trajectoires différentes : la variation de température pourrait, par exemple, augmenter graduellement jusqu'à attendre les 1,5°C dans un intervalle de temps plus ou moins long ; néanmoins, elle pourrait également dépasser temporairement cette valeur, avant de redescendre et se stabiliser³.

Les risques et les impacts du Réchauffement Climatique sur l'environnement dépendent du profil d'augmentation de la température. Si le scénario avec dépassement s'avérait vrai, ou si l'augmentation de température était supérieure à 1,5°C, les effets sur l'environnement seraient plus dramatiques et pourraient inclure la destruction de nombreux écosystèmes et des risques d'approvisionnement en nourriture et en eau. D'autres conséquences seraient l'augmentation de la propagation de certaines maladies comme le paludisme et la dengue, et un incrément de la pauvreté et des inégalités sociales.

Face à cette situation, les états et les citoyens ont le devoir de prendre des mesures pour limiter les impacts du Changement Climatique. Cette volonté s'est traduite en 2015 par la Conférence de Paris, puis sur l'Accord de Paris sur le climat, dans lequel des nombreux états ont pris des engagements ciblant à atténuer et limiter les effets de ce phénomène, en limitant leurs émissions des gaz à effet de serre [219].

* * *

L'Union Européenne est responsable de 9% des émissions globales, même si cette proportion est à la baisse [39]. Elle s'est donc fixé des objectifs assez forts en matière de réduction de l'impact environnemental [37, 38]. Les objectifs clé pour les états européens d'ici 2030 sont :

- Une réduction d'au moins 40% des **émissions des gaz à effet de serre** (par rapport aux niveaux en 1990).
- Une part minimale de 32% de la consommation doit être issue des **énergies renouvelables**.
- Une amélioration d'au moins 32,5% de l'**efficacité énergétique**.

Le secteur de la Mobilité a un rôle majeur à jouer dans la consécution de ces objectifs [40]. Pour y répondre, le législateur impose aux constructeurs des normes à respecter en matière de consommation et des émissions polluantes. Pour plus d'informations, le lecteur est invité consulter [61, 41].

3. Ce dernier scénario suppose la prise des mesures permettant d'avoir des émissions globales négatives de CO₂ après le pic de température [131].

1.2 ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE DE L'AUTOMOBILE : ÉLECTRIFICATION ET AUTOMATISATION DE LA CONDUITE

Objectif de la section

Décrire le contexte technologique où surgit notre sujet d'étude

En 2016, le secteur des *Transports* a été responsable de 28% de la consommation globale d'énergie finale au niveau mondial, dont plus de 90% dépendait des produits dérivés du pétrole, et se traduit donc par des émissions de polluants et de gaz à effet de serre [4].

En réponse à cela, la Stratégie Européenne ciblant une Mobilité à faibles émissions intègre trois éléments principaux [40], à savoir :

- **Augmenter l'efficacité des systèmes de transport** : grâce à l'utilisation des technologies numériques, la baisse des prix et en encourageant la transition vers des modes de transport à faibles émissions.
- **Accélérer le déploiement des énergies alternatives à faibles émissions pour les transports** : tel que des bio-carburants de nouvelle génération, de l'électricité de sources renouvelables, ainsi qu'en éliminant les obstacles vers l'électrification des transports.
- **Encourager la transition vers des véhicules à zéro-émissions** : même si l'amélioration des moteurs à combustion interne est toujours une nécessité, il est urgent d'accélérer l'entrée massive sur le marché de véhicules à faibles et à zéro émissions.

Dans ce contexte, l'*Électrification Automobile* est un levier important pour l'accomplissement des objectifs européens, et donc pour la transition vers une mobilité plus respectueuse de l'environnement [14, 27, 35, 5, 81]. Il existe différentes technologies et niveaux d'électrification, pouvant aller du renfort de certains composants électriques, dans le cas des véhicules dits *micro-hybrides* ou *hybrides discrets*, en passant par des *hybrides non-rechargeables* et *rechargeables*, jusqu'aux *véhicules tout électriques*. Concernant ces derniers, que l'on nomme aussi *véhicule à zéro-émissions*, il existe deux solutions technologiques principales [27] : les véhicules à pile à combustible, générant de l'électricité à partir de l'hydrogène et de l'air, et des Véhicules Électriques à Batterie (VEB), qui emmagasinent de l'énergie produite ailleurs sous forme chimique, grâce à des réactions d'oxydo-réduction [14]. Comme ce sont les VEB qui ont eu jusqu'à présent le plus grand taux de pénétration dans le marché [5], sauf mention explicite, lorsque nous parlerons des Véhicules Électriques (VE), ce sera ce type de technologie qui sera évoquée. De même, en prenant de la distance par rapport à certaines publications, notre usage du terme VE exclut les hybrides rechargeables⁴.

⁴ Éventuellement, nous pourrions parler des *véhicules électrifiés*, pour englober les véhicules électriques et les hybrides.

A proprement parler, les VE ne sont pas *intrinsèquement propres* : leur impact environnemental *global* est fortement lié à la manière comme l'électricité est produite, nommée parfois « mix énergétique » [5]. En effet, dans des pays où l'électricité est issue majoritairement de sources fossiles, ce n'est même pas sûr que les émissions de gaz à effet de serre *sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule*, soient plus faibles pour les VE que pour des véhicules non-électrifiés (même s'ils pourraient tout de même contribuer à réduire les niveaux de pollution dans les villes). En revanche, du fait que l'électricité soit le vecteur d'énergie le plus diversifié, si les VE sont associés à de la génération d'énergie à faible taux de carbone, ils deviendront un fort levier de réduction de l'impact environnemental, en matière de Changement Climatique et de pollution dans les villes [5, 32]. La France est un exemple de pays où le mix énergétique rend intéressant de point de vue écologique l'utilisation des VE [32].

* * *

En plus de l'Électrification Automobile, un autre type d'innovation technologique se développe rapidement ; il s'agit de l'*Automatisation de la Conduite*. Celle-ci consiste dans la *prise en main* par des systèmes numériques de certaines actions associées à l'opération du véhicule qui jusqu'à assez récemment étaient la prérogative du conducteur. Cette transformation arrivant de manière progressive, certaines institutions ont définies des *niveaux d'autonomie* permettant de distinguer le niveau d'automatisation d'un certain véhicule ; par exemple, la *SAE International (Society of Automotive Engineers, Société d'Ingénieurs de l'Automobile)* distingue cinq niveau d'autonomie, allant du niveau 0, *Pas d'autonomie*, au niveau 5, *Complète autonomie* [7, 96].

L'entrée sur le marché des technologies d'automatisation de la conduite ouvre la porte à un certain nombre d'opportunités en matière de mobilité [7, 195] :

- **Augmentation du taux d'utilisation par véhicule** : en lien avec des *systèmes d'auto-partage*, les véhicules autonomes pourraient réduire le besoin d'avoir un véhicule chez certains utilisateurs, qui pourraient faire appel plutôt à ce type de service. En plus des avantages économiques associées à l'utilisation commune d'un même véhicule, et donc au partage indirect des coûts fixes, ces systèmes pourraient conduire à une diminution du nombre de véhicules produits, et donc avoir des impacts environnementaux positifs.
- **Accès facilité à la mobilité à certaines catégories de la population** : des véhicules entièrement autonomes pourraient faciliter les déplacements à des personnes qui ne sont pas en capacité de conduire : d'enfants, des personnes âgées et des personnes handicapées.
- **Amélioration de la circulation routière** : en coopération avec des systèmes de communication avancées, entre les véhicules et avec l'infrastructure, les systèmes de conduite autonome pourraient générer une conduite plus fluide, en réduisant les embouteillages et les périodes d'arrêt.
- **Amélioration de l'efficacité énergétique de la conduite** : les Systèmes d'Aide à la

Conduite (SAC) offrent plusieurs leviers pour améliorer l'efficacité énergétique associée à la conduite d'un véhicule.

Cette dernière opportunité servira de socle à notre recherche.

* * *

L'interaction entre l'*Électrification automobile* et l'*Automatisation de la conduite* étant fort prometteuse pour une mobilité durable, nos travaux porteront sur l'exploitation de nouveaux leviers offerts par les SAC pour réduire la consommation des VE. Notre sujet d'étude sera donc l'**Automatisation de l'écoconduite des véhicules électriques**. Le domaine d'application des SAC étant assez large, nous nous limiterons à la considération de la composante longitudinale du mouvement du véhicule.

1.3 ECO-CONDUITE ET HABITUDES DES CONDUCTEURS

Objectif de la section

Qu'est-ce donc que l'écoconduite ?

Bien que la notion d'*écoconduite*, de conduite écologique, soit plutôt intuitive, définir de manière précise ce que le terme englobe peut s'avérer assez difficile. Le Collège de terminologie de l'automobile, du Dispositif d'enrichissement de la langue française, a défini *écoconduite* comme [36] : l' « Ensemble de pratiques de conduite permettant à l'automobiliste de réduire la consommation d'énergie du véhicule et d'en limiter l'usure. » En revanche, il ne se prononce pas sur la portée de la phrase « pratiques de conduite ».

Lorsqu'on regarde du côté des publications académiques, la définition du terme *écoconduite* peut varier fortement selon les auteurs⁵ : par exemple, Sivak et Schoettle [203, 204] incluent la sélection du type de véhicule et sa maintenance dans leur définition d'*écoconduite*, alors que la plus part des auteurs ne le font pas. Encore, il existe une grande diversité parmi ces derniers : certains considèrent que le choix de l'itinéraire fait partie de l'*écoconduite* [94, 184, 194], alors que d'autres ne le font pas [3, 54, 55, 230, 126, 233] ; le choix de la route serait alors associé à une catégorie différente que l'on peut nommer *éco-routage* ou *éco-planification* (de l'anglais, *éco-routing*) [6, 80, 233]. Barkenbus [15] exclue même de sa définition d'*écoconduite* l'utilisation, sur une descente, de l'énergie potentielle emmagasinée dans le véhicule afin de le faire avancer (qu'il dénote « *hypermilling* »).

Lorsqu'on demande aux conducteurs de définir eux-même ce qu'ils entendent par *écoconduite*, des pratiques variées semblent venir à l'esprit. Sur [79], les conducteurs ont reporté des stratégies orientées plutôt vers l'adaptation du comportement cinématique du véhicule. En revanche, sur d'autres études, les conducteurs reportent aussi des com-

5. Dans certains cas, les auteurs ne donnent de définition *explicite* de ce qu'ils entendent pas « écoconduite ». En revanche, on peut le deviner en analysant ce qu'ils ont considéré dans leur étude.

portements associés à la sélection de la route et / ou à la maintenance du véhicule [110, 134, 153].

Il nous semble pertinent de ne pas dissocier la sélection du trajet du reste de la conduite, car ils semblent se rejoindre dans l'esprit du conducteur. Toutefois, dans ce travail, nous avons décidé de nous limiter à l'étude de l'effet de la variation de la cinématique du véhicule sur un trajet défini à l'avance. Ainsi, en dehors la discussion brièvement présentée sur ce chapitre (section I.1.6.1), *l'éco-planification du trajet*, ou *Eco-routage*, sera exclue de notre étude. Ce choix est fondé sur deux arguments : d'une part, comme nous le verrons par la suite, du point de vue de la conception d'un algorithmes, il semble pertinent de découpler le problème d'éco-planification de celui de détermination le bonne profil de vitesse ou d'accélération du véhicule ; la résolution simultanée des deux problèmes peut s'avérer fort difficile. Deuxièmement, le choix d'un trajet écologique peut avoir des conséquences plus marqués sur l'agrément de conduite ; en effet, certains conducteurs pourraient être prêts à adapter *de façon modérée* leur style de conduite, mais pas à changer d'itinéraire. Il semble donc intéressant de considérer l'éco-planification comme un problème séparé⁶.

Ainsi, la définition d'*écoconduite* que nous retiendrons s'inspire de celle de Saerens [184] :

L'écoconduite est l'adoption d'un style de conduite, et des pratiques associées, adaptés avec l'objectif de réduire la consommation d'énergie d'un véhicule, tout en limitant d'autres effets négatifs sur l'environnement.

D'après cette définition, et en accord avec Mensing et al. [136], nous ne considérerons pas que un style de conduite associé, à un certain véhicule, comme *écologique*, si celui-ci entraîne un impact environnemental résiduel important, combien même il aurait une faible consommation d'énergie. Pour être clairs, si la manière de conduire véhicules ayant un moteur à combustion, se traduit par une augmentation conséquente des émissions de *polluants locaux*, nous ne considérerons pas que le conducteur ait appliqué l'écoconduite.

1.3.1 Écoconduite en situation réelle

De nombreuses études s'intéressent à la compréhension et adoption de l'écoconduite chez les conducteurs professionnels et particuliers. Nous présenterons ci-dessous une liste de travaux qui ne se prétend pas exhaustive.

Déjà dans les années 2000, Ericsson a étudié l'effet de certains paramètres, dont le *type de conducteur*, le *type de route* et les *conditions de trafic* sur le style de conduite [59]. Ses travaux ont mis en évidence l'influence majeure du type de route choisie, mais aussi un impact considérable du conducteur, sur le comportement du véhicule.

6. Une autre approche, qui nous paraît intéressante, est présentée sur Sciarretta [194], consiste à séparer l'écoconduite en systèmes (ou tâches) *pré-trajet*, *pendant le trajet* et *post-trajet*. Les systèmes d'éco-planification sont inclus dans la catégorie *pré-trajet*.

D'autres chercheurs se sont intéressés aux effets de l'adoption d'un VE sur les habitudes de conduite au bout de plusieurs mois [180], et d'autres aux stratégies de conduite appliquées par des *conducteurs expérimentés* d'un VE [79, 153].

Certaines études s'intéressent aussi aux *aspects psychologiques et cognitifs* associés à l'écoconduite. Par exemple, sur [150] on a étudié la propre perception des conducteurs concernant leur pratique de l'écoconduite. L'étude montre une certaine réticence à appliquer la conduite écologique chez certains individus, ainsi que de l'ambiguïté dans sa pratique effective chez d'autres. Sur [134], il est mis en évidence une méconnaissance des stratégies à appliquer pour réduire sa consommation en conduisant, même chez des conducteurs manifestant de l'intérêt pour l'environnement et l'écoconduite.

Dans un registre différent, sur [203] on a associé certaines stratégies propres à l'écoconduite à des niveaux cognitifs propres à l'être humain. Le lecteur verra que nous avons utilisé des catégories proches dans un autre contexte ; toutefois, nous avons pris une certaine distance par rapport à cette proposition.

Enfin, certains se sont intéressés aux difficultés dans l'adoption d'un style de conduite écologique chez des conducteurs particuliers [54] et professionnels [2] ; aussi, on constate une difficulté chez les conducteurs à garder sur la durée un style de conduite écologique efficace [3, 16].

1.4 ÉTAT DE L'ART : AUTOMATISATION DE L'ÉCOCONDUITE

Objectif de la section

Décrire ce qui a été fait jusqu'à présent

Lorsqu'on parle de *conduite écologique*, il est nécessaire de définir le type de voiture qu'on va utiliser. En effet, la pratique de l'écoconduite varie en fonction du type de GMP concerné [58, 135, 195]. Par exemple, il semblerait que le plus pertinent pour réduire la consommation lors de la conduite d'un véhicule ayant une motorisation purement thermique soit de privilégier des fortes accélérations [136, 195] ; en revanche, cela pourrait se traduire par une augmentation des émissions polluantes [136]. Il n'est pas sûr que les mêmes pratiques soient valables dans le cas des VE ; en tout cas, au tout début de cette thèse, il semblait exister des idées plutôt paradoxales dans les publications associées à ce sujet.

* * *

Concernant, les études en *Optimisation énergétique* en lien avec l'écoconduite, et celles associées à l'*Automatisation de la conduite*, il peut être utile de les organiser selon les horizons temporel et spatial considérés. Des classifications de ce type sont présentées sur [176, 194]. Nous proposerons ici trois catégories, associées aux processus cognitifs du conducteur, qui seront justifiées plus tard. Encore une fois, nous ne ferons que présen-

ter un survol des études dans la matière, sans nous limiter aux VE, et qui sera enrichi par la suite. Nous avons en particulier :

- **Eco-itinéraires** : nous regroupons dans cette catégorie des études concernant l'ensemble d'un trajet. La littérature présente principalement deux types d'études :
 - certaines considèrent que la route à suivre est connue. Dans ce cas, l'optimisation porte sur le comportement dynamique du véhicule, et elle est assez souvent basée sur la Programmation Dynamique (PD) [126, 127, 136, 143] ; quelques une de ces publications portent directement sur les VE [125, 135]. Dans certaines de ces études on tient compte des contraintes associées au trafic [137] et même à l'infrastructure (notamment la présence de feux tricolores) [12].
Assez souvent, les travaux dans cette catégorie permettent de tirer de principes ou *stratégies générales* à appliquer au volant de son véhicule ; cependant, sur [149] on présente une approche analytique basée sur le Principe du Minimum de Pontriaguine (PMP), où les informations sur l'ensemble de l'itinéraire sont contenues implicitement dans les co-états, étant plus proche s'une application embarquée.
 - dans d'autres études, on considère le trajet comme une variable d'optimisation. Ce type de problème est souvent appelé *Eco-routage* et considéré indépendamment de l'écoconduite (qui, dans ce cas, se limite à l'optimisation de la dynamique du véhicule). Nous avons comme exemples de ce type de problème [50, 49, 93, 195, 232].
- **Eco-segments** : nous considérons ici des approches où un trajet donnée est découpée en plusieurs portions, associées en général à des éléments *fixes* de l'infrastructure : changements de vitesse réglementaire, virages, feux tricolores, entre autres. Il y a un certain nombre de publications présentant des approches de ce type dont [56, 55, 112, 194, 195, 196, 197]. Elles ont l'avantage de permettre d'intégrer simultanément des données issues des systèmes de navigations, et celles obtenues par les capteurs du véhicule. Les temps de calculs associées sont également plus raisonnables ; certaines sont même directement compatible avec le temps réel comme c'est le cas de [160].
- **Eco-manœuvres** : c'est, en même temps, le niveau le plus spécialisé et celui qui est le plus proche de l'application en temps réel. Dans ce type de problème, les horizons spatial et temporel sont d'à peine quelques mètres et quelques secondes, respectivement. Il s'agit aussi de celui qui est le plus proche des processus cognitifs humains associés aux actions *transitoires* de conduite et des consignes à envoyer aux actionneurs du véhicule.

Un travail séminal dans cette catégorie est la thèse de Saerens [184], où il traite un certain nombre de scénarios de conduite, en les formulant comme des problèmes de commande optimale. Il tient compte aussi de manière explicite, de ce qu'il appelle « facteurs humains, » qui correspondent à des contraintes ergonomiques. D'autres travaux dans cette catégorie intègrent des systèmes de Commande Prédicative avec

prise en compte de la pente [107], et d'autres basés sur le suivi de véhicules [117, 192]. Il existe même des études où l'optimisation des dynamiques longitudinale et latérale sont considérées simultanément [176].

Il nous semble, toutefois, que ce domaine pourrait bénéficier considérablement de l'étude du comportement et de la manière de raisonner de conducteurs en situation réelle.

* * *

Enfin, il devient de plus en plus évident l'énorme potentiel pour les Véhicules Autonomes et Connectés (VAC) d'intégrer des *fonctions d'écoconduite*, en profitant des nouvelles informations disponibles sur le trafic et l'infrastructure, ainsi que de les appliquer directement sur le véhicule les résultats des algorithmes, garantissant des meilleures performances que celle d'un conducteur humain. Parmi les publications dans la matière nous pouvons citer [12, 143, 195, 218, 221, 224].

1.5 APPORT DE LA PSYCHOLOGIE COGNITIVE À LA CONCEPTION DE SYSTÈMES D'AIDE À LA CONDUITE

Objectif de la section

Analyser ce qui se passe dans l'esprit du conducteur lorsqu'il est à bord de son véhicule

Nous partons d'un constat : certaines personnes sont capables d'avoir un style de conduite écologique, qu'elles peuvent utiliser en situation réelle, en présence de trafic, et cela leur permet d'arriver d'un point A à un point B, selon leurs souhaits et leurs besoins. L'état de l'art que nous venons de présenter montre que, même si de gros progrès ont été faits ces dernières années, nous sommes encore loin de savoir faire tout cela avec des systèmes automatisés. Ainsi, il est tout à fait naturel de se poser la question suivante :

Que se passe-t-il dans les méandres de la pensée, dans les profondeurs de l'esprit humain, qui rend un conducteur capable d'exécuter une tâche aussi complexe que l'éco-conduire, et de le faire bien ?

Nous croyons qu'un système automatisé imitant la structure cognitive d'un être humain, aurait de bonnes chances de pouvoir éco-conduire de manière efficace. De plus, du fait que le paradigme d'action serait de la même nature que celui utilisé par le conducteur, il est vraisemblable qu'il trouverait le comportement du système intuitif et acceptable.

Déjà en 1984, John A. Michon [140] s'adressait aux assistants du *General Motor Symposium* en leur expliquant l'apport que la psychologie cognitive pouvait avoir à la conduite autonome, ou au « robot conducteur, (*robot driver*) » pour utiliser la formulation de l'époque.

Depuis, de nombreuses études se sont appuyées sur la psychologie cognitive pour proposer des modèles du conducteur [103, 187, 186, 228].

Un autre aspect qui a fortement attiré l'attention des chercheurs est l'influence des motivations, des émotions et des sentiments sur le comportement du conducteur [212, 220]. Une branche de ces études, assez prolifique depuis quelques années, se concentre sur la catégorisation et la caractérisation du style de conduite [129, 185].

L'importance sur la conduite de ces deux aspects, les processus cognitifs et les composantes émotionnelles, semble indéniable. Ainsi, certains proposent des *modèles cognitivo-émotionnels du comportement du conducteur* [124].

Un désavantage que beaucoup de ces modélisations du conducteur présentent, et que Michon critiquait déjà à l'époque, est la difficulté de les utiliser pour concevoir un système automatisé. Dans la synthèse des modèles de comportement du conducteur de Hamdar [83], faite en 2012, le constat était le même : on n'avait pas encore un modèle de type commande qui soit suffisamment représentatif de la dimension cognitive de la conduite.

Dans les dernières années⁷, certaines études ont proposé des approches permettant de représenter des aspects cognitifs ou émotionnels de la conduite, voire les deux, tout en étant exploitables pour la conception de SAC, parfois dénotés par le sigle en anglais *ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems)*. Par exemple, sur [103] les auteurs présentent un modèle du conducteur, représentatif du style de conduite, dans lequel des niveaux cognitifs différents sont représentés par des systèmes linéaires interdépendants.

Aussi, sur [18] les chercheurs ont étudié l'influence de certains paramètres *globaux* du profil temporel d'accélération associé à certaines manœuvres de conduite, et montré leur pertinence pour distinguer entre les différents styles de conduite. Bien qu'il n'y ait pas de modèle explicite du conducteur, les informations présentées peuvent être appliquées d'une manière assez directe par un SAC (cf. section 1.4).

Dans cette section, nous présenterons certains des résultats et modèles issus de la psychologie cognitive, et décrirons comment s'en servir pour définir des préconisations pour la conception de SAC. Finalement, quelques éléments de modélisation générale de la conduite sont proposés, en indiquant des implications pour une fonction d'écoconduite automatique. Dans la Partie IV nous présenterons une structure de système d'écoconduite basé sur les informations présentées dans cette section. L'étude et la modélisation du ressenti du conducteur seront réservées à la Partie II.

1.5.1 Mécanismes cognitifs pour la résolution de problèmes

En ce qui concerne la capacité à résoudre des problèmes, l'être humain, occupe sans doute une place à part dans tout le règne animal. Certes, certains oiseaux, lorsqu'ils volent, peuvent trouver une formation qui leur permet de réduire l'effort à fournir, mais il ne construisent pas de voitures ni d'autoroutes et ils ne prennent pas l'avion ; en milieu naturel, les grands singes sont capables de se servir d'objets en guise d'outils et même d'en

7. Ce document a été rédigé entre 2019 et 2020.

fabriquer (en combinant des objets différents) [114], mais ils ne font pas des ordinateurs et, encore moins, des accélérateurs de particules. Cette remarquable capacité humaine serait, au moins en partie, associée à la taille du cortex pré-frontal qui est largement plus développé que chez les autres animaux⁸ [8].

Aussi, les capacités cognitives humaines sont largement supérieures à celles des systèmes d'intelligence artificielle modernes. On pourrait avoir le sentiment que ce n'est plus le cas, surtout lorsqu'on entend parler d'algorithmes capables de vaincre les champions dans des jeux millénaires, tel les échecs ou le GO. Par exemple, en 2015 AlphaGo, une *machine* développée par *Google DeepMind*, a battu cinq fois d'affilé le champion Européen de GO [200]. Cependant, d'après J. Chen, professeur de sciences informatiques de la *George Mason University*, il est probable que l'avantage d'AlphaGo soit plutôt dû à la puissance de sa base de données qu'à des capacités d'évaluation de la situation plus avancées [29]. Aussi, comme Steve McGough, expert en mégadonnées de la *Newcastle University*, signale, en parlant du même sujet : « *si vous changez l'une des règles, le grand maitre [de Go] sera capable de se servir de toute son expérience pour gagner*⁹[87]. »

En effet, de nos jours, il est possible de concevoir des systèmes capables de vaincre des experts humains dans l'exécution d'une tâche précise. Cependant, ces systèmes ne pourront le vaincre sur rien d'autre [87]. Ils seront incapables d'utiliser leurs expériences précédentes et de les appliquer à un domaine nouveau, ce que les humains savent faire depuis des millénaires. Les humains sont capables de résoudre des problèmes qu'ils n'ont jamais vu ; ce qui va bien au delà de tout ce que les systèmes d'apprentissage de machine savent faire aujourd'hui.

Nous allons considérer certaines caractéristiques qui expliquent, en partie, le succès de la cognition humaine. Nous reprendrons la plupart de ces concepts du chapitre 8 de l'ouvrage de référence *Cognitive Psychology*, d'Anderson [8], en y ajoutant quelques résultats issus d'autres publications scientifiques. Ensuite, nous proposerons comment ces éléments pourraient être intégrés afin de représenter les tâches cognitives associées à l'écoconduite.

1.5.1.1 Caractéristiques essentielles de la résolution de problèmes

Il y a trois caractéristiques essentielles sur la manière des être humains à résoudre des problèmes [8]¹⁰:

1. **Orientation vers des objectifs :** Les humains ne sont pas de simples dispositifs déterministes, avec des entrées et des sorties, mais ils sont des créatures orientées par

8. Seuls certains grands singes ont de proportions relatives du cortex pré-frontal qui seraient comparables à celles de l'humain. Cependant, étant donné que le cerveau humain est bien plus grand que celui des grands singes, la taille absolue du cortex pré-frontal est, de loin, la plus conséquente du règne animal [8].

9. La citation exacte est : « *if you changed one of the rules, the grand master would be able to take all their experience and use that to win* [87]. »

10. On les retrouve aussi chez certains animaux, mais les humains les appliquent avec plus d'efficacité et sont plus compétents dans la résolution de problèmes.

des objectifs [8, 174]. Cela veut dire que, dans deux situations similaires, un même sujet peut agir différemment en présence des entrées identiques, si dans chaque situation il souhaite atteindre un objectif différent.

Lors de la conception d'un système automatisé, avoir une définition claire et **expli-cite** de l'objectif à atteindre permet de mieux cerner la pertinence d'une action. Cela permet aussi d'introduire des notions de priorité sur chaque but, afin de faire des arbitrages et des dérogations dans des situations où il y aurait des objectifs paradoxaux.

2. **Décomposition en sous-objectifs** : Les problèmes doivent être décomposés en *sous-tâches*, ou *sous-objectifs* permettant d'atteindre l'objectif global [8]. Grâce à cela, plutôt que de résoudre directement un problème extrêmement compliqué, on devra faire face à une suite de problèmes beaucoup plus faciles à analyser et dont la solution est plus simple.

Un autre avantage associé à la décomposition d'un problème en sous-objectifs est la réduction de la capacité de stockage d'information nécessaire pour exécuter une tâche [202]. En effet, grâce à un tel découpage, on n'aura pas besoin de retenir dans le cerveau simultanément toute l'information nécessaire à la résolution du problème ; à chaque instant, on peut se contenter de garder la structure global du problème, et l'information nécessaire à la résolution du sous-problème courant.

3. **Application d'opérateurs** : la décomposition du problème en sous-objectifs permet au *résolveur de problèmes* d'appliquer des *opérateurs* déjà connus, et *maîtrisés*, afin de pouvoir atteindre ces sous-objectifs. Un *opérateur* est une action qui fait passer le problème d'un état vers un état différent. Ainsi, la solution globale d'un problème peut être comprise comme une suite d'opérateurs.

L'ensemble de ces trois caractéristiques explique une grosse partie du succès des êtres humains pour la résolution de problèmes. Un *résolveur de problèmes* humain aurait à sa disposition un *répertoire d'opérateurs*, qui lui demanderaient chacun un certain effort et qu'il maîtriserait dans une plus ou moins grande mesure ; aussi, il serait motivé pour atteindre un objectif donné. Même s'il n'a jamais eu à résoudre ce problème, et s'il n'en connaît pas une solution directe, il peut décomposer le problème en une suite d'objectifs intermédiaires. Chaque sous-objectif donnerait lieu à des sous-problèmes (potentiellement décomposables aussi en sous-objectifs) qui peuvent être résolus grâce aux opérateurs qu'il maîtrise déjà. Ce mécanisme permet de mieux comprendre le pourquoi de la grande flexibilité des humains pour la résolution de problèmes différents, qui est manquante dans la plupart de machines « intelligentes. »

1.5.1.2 Représentation d'un problème comme un *espace d'états*

La représentation de la résolution de problèmes que nous allons montrer [8] a été principalement développé par Allen Newell et Herbert Simon [155, 202, 201].

La résolution d'un problème peut être exprimée comme la recherche d'un *espace du problème*, consistant en plusieurs *état du problème*. Cette proposition nous conduit à introduire les notions suivantes :

- **État** : représentation du problème comme un *degré* de sa solution [8]. Un état est une situation que l'environnement du problème peut atteindre et qui peut être plus ou moins éloigné de la solution [202]. Nous pouvons distinguer trois catégories d'état :
 - **État initial** : situation initiale du problème.
 - **États intermédiaires** : les situations que l'environnement du problème peut prendre entre l'état initial et la résolution du problème.
 - **État cible** : Objectif du problème ; situation à atteindre.
- **Espace du problème** : (ou **espace d'états**) l'ensemble d'états que le résolveur de problèmes peut atteindre. L'espace du problème englobe les situations que l'environnement du problème pourrait avoir, dans la recherche de la situation souhaitée, qui correspond à l'état cible [202]. L'espace du problème est défini ici du point de vue du résolveur de problèmes et est donc déterminé par la représentation du problème que le sujet se fait. Il est alors différent de *l'environnement de la tâche*, qui englobe la totalité de situations possibles.
- **Opérateurs** : les opérateurs sont des actions capables de faire changer la situation, en relation au degré de solution du problème.

Le défi du résolveur de problèmes consiste à trouver une séquence faisable d'opérateurs, permettant de faire évoluer l'environnement du problème de l'état initial à l'état cible [8]. Ainsi, l'espace du problème peut être représenté par un diagramme de graphes et chaque solution du problème peut être représentée par un chemin sur le graphe qui relie l'état initial à l'état cible.

Chaque sujet, dans une situation donnée, aura accès à un certain nombre d'opérateurs, qu'il maîtrisera plus ou moins bien. Ainsi, le choix et l'efficacité d'un certain opérateur dépendra du niveau de maîtrise du sujet [140]. Nous proposons ce type d'approche pour qualifier la *robustesse* d'une solution lors de la résolution d'un problème. Aussi, en associant un coût à chaque opérateur, le *coût global d'une solution* peut être quantifié comme la somme des coûts individuels de chacun de ses opérateurs. C'est un des gros avantages de cette représentation.

1.5.1.3 Méthodes de sélection des opérateurs

Les êtres humains utilisent principalement trois stratégies qui orientent la sélection d'opérateurs adéquats pour résoudre un problème : [8]

- **Évitement de revenir en arrière** : (*backup avoidance*) le résolveur de problèmes a une tendance à éviter tout opérateur qui défait l'effet des opérateurs utilisées préalablement. Cette méthode donne des orientations sur les opérateurs à éviter, mais pas à choisir.

- **Réduction de différences :** (*difference reduction*) les humains ont une tendance à privilégier l'opérateur non utilisé préalablement réduisant au minimum la différence entre l'état actuel et la cible. C'est la méthode utilisée généralement face à des situations peu connues, choisissant donc souvent des opérateurs qui transforment l'état actuel en un nouvel état qui ressemble le plus possible à l'état cible. Cette méthode est parfois appelée *méthode d'escalade*.

La méthode de réduction de différences n'offre pas de garantie de succès. Elle peut conduire à des minima locaux ou, encore pire, à des séquences d'opérateurs qui ne permettent pas de résoudre le problème. Par exemple, Kohler (1927) [111], a mis des poules en face de nourriture, avec une barrière leur bloquant le passage ; plutôt que de contourner la barrière, les animaux sont directement allés vers la nourriture jusqu'à ce que la barrière les bloque, pour après reste coincés, sans savoir quoi faire ; cependant, certaines poules ont fait des mouvements hasardeux et ont réussi à contourner l'obstacle.

En général, les humains ont des difficultés pour résoudre des problèmes, lorsqu'il y a des étapes qui demandent d'augmenter la différence entre l'état actuel et l'état cible.

- **Analyse des moyens et des buts :** (*means-ends analysis*) il s'agit d'une méthode plus sophistiquée de sélection d'opérateurs. Elle se focalise sur faciliter l'accès à des opérateurs qui ne peuvent pas être exploités immédiatement. Ainsi, si un opérateur nécessaire pour atteindre l'état cible n'est pas momentanément disponible, plutôt que de l'écarter, on se focalisera sur le rendre disponible. Temporairement, le moyen deviendra le but. En conséquence, le résolveur de problèmes, ignorera momentanément la cible finale et se focalisera sur l'habilitation du moyen, qui devient le nouvel objectif. S'il y a des opérateurs bloqués nécessaires à accomplir l'objectif nouveau, les rendre accessibles peut devenir un nouveau sous-objectif. L'analyse des moyens et des buts peut être, en effet, utilisée de manière récursive [8].

Cette méthode a été utilisée pour la première fois dans un programme informatique par Newell & Simon (1959), dans leur système nommé GPS (Résolveur généraliste de problèmes, de l'anglais *General Problem Solver*) [156]. Il existe deux aspects forts intéressants dans leur implémentation. D'une part, GPS utilise une *liste d'opérateurs*, qu'il a à disposition pour résoudre les problèmes ; certains de ces opérateurs peuvent avoir des pré-requis pour pouvoir être utilisées. D'autre part, le code fonctionne de manière récursive, ce qui veut dire que, si les conditions pour pouvoir appliquer un certain opérateur ne sont pas respectées, l'habilitation de l'opérateur peut être formulée comme un nouveau problème que GPS devra résoudre.

La combinaison de ces stratégies permet aux humains d'avoir une assez grande flexibilité dans les types de situations qu'ils sont capables de résoudre. De plus, ils peuvent combiner plusieurs opérateurs déjà maîtrisés, ce qui leur ouvre des nouvelles possibilités et leur fait gagner en efficacité [140].

Cependant, on peut remarquer que dans les méthodes présentés les notions de qualité ou d'économie de l'effort et des ressources ne sont pas explicitement considérés. L'automatique peut offrir des vrais avantages dans l'exécution de tâches jusqu'à présent réservées aux humains, à condition que l'on sache comment s'y prendre. En effet, un système automatisé, qui reprendrait une approche de résolution de problèmes inspirée de la cognition humaine, pourrait réaliser des tâches assez complexes, avec une bonne flexibilité face à des nouvelles situations, tout en considérant explicitement les enjeux associés au coût de la solution. De plus, un tel système pourrait présenter une bien meilleure répétabilité dans l'exécution de tâches que celle propre aux humains.

Un exemple où l'application des notions que nous venons de présenter pourrait s'avérer très fructueux est l'écoconduite. Sur la section I.1.6, nous proposerons quelques idées sur comment des concepts issus de la psychologie cognitive pourraient être appliqués à la réduction de la consommation énergétique nécessaire pour se rendre à une certaine destination, avec un véhicule donné.

1.5.2 Apprentissage et expertise

On dit que l'une des caractéristiques permettant d'identifier un expert dans un domaine, est le fait que, en le regardant faire, on a l'impression que c'est facile. Je peux confirmer cette affirmation en ce qui concerne la musique : en regardant et écoutant des vidéos de guitaristes virtuoses, comme Yngwie Malmsteen, ou Brian May ou, dans un autre registre, Paco de Lucía, on pourrait croire que ce qu'ils font n'est pas si compliqué que ça. Pourtant, si on essaie de jouer comme eux, on sera à même d'apprécier leur génie. Ils jouent des choses fort compliquées, avec une précision machinale, et à des vitesses de folie ; et d'autres tellement subtiles, raffinées ; et pour tout compléter, souvent ils font plusieurs choses en même temps !

En observant des humains exécuter des tâches qu'ils maîtrisent très bien, une finesse dans l'exécution est mise en évidence, se traduisant par le fait qu'ils font les choses très rapidement, avec peu d'effort et en se trompant très peu. Ci-dessous, nous présenterons certains phénomènes cognitifs permettant d'expliquer, au moins en partie, cette observation. La plupart des informations sont issues du chapitre 9 d'Anderson (2005) [8].

Le but de cette section est d'en tirer quelques principes, applicables à des systèmes automatisés, qui permettraient d'exécuter des tâches complexes de manière rapide et efficace. Nous étudierons ici les phénomènes permettant à des gens de devenir des experts dans un domaine.

1.5.2.1 Phases de l'acquisition d'une compétence

Fitts & Posner (1967), puis Rasmussen (1983) et Anderson (2005), distinguent trois étapes dans l'acquisition de compétences [8, 68, 174]. Nous les présentons dans l'ordre chronologique :

- **Phase cognitive** : pendant cette phase, l'*apprenti* acquiert une connaissance décla-

rative de la compétence ; il enregistre dans sa mémoire un certain nombre de faits pertinents pour l'exécution de la tâche. Ces faits peuvent être associés, par exemple, aux actions qu'il devra exécuter et à l'ordre de celles-ci. Ces informations définissent essentiellement les opérateurs nécessaires à l'exécution de la tâche. On parle ici de *connaissance déclarative*.

Pendant la phase cognitive, les apprentis ont besoin de se rappeler des faits au fur et à mesure qu'ils réalisent la tâche.

- **Phase associative :** deux phénomènes ont lieu pendant cette phase. D'une part, les erreurs dans la compréhension, et dans l'exécution de la tâche sont progressivement identifiés et éliminés. Deuxièmement, des connexions entre les différents éléments associés à la compétence sont créés et/ou sont renforcés. A la fin de cette phase, on obtient une *procédure réussie* pour l'exécution de la tâche.

Dans certains cas, la *connaissance procédurale* vient remplacer la connaissance déclarative ; on aura la compétence, mais on ne sera plus capable de dire comment on fait, à part par le biais de la démonstration. Dans d'autres cas, on peut garder la connaissance déclarative ; on pourra reformuler les étapes et d'autres faits associés à la tâche. Cependant, la connaissance procédurale sera prépondérante lors de l'exécution de la performance.

- **Phase autonome :** dans cette phase, la vitesse dans l'exécution de la tâche augmente. Cette dernière devient tellement automatisée que l'on n'a pratiquement plus besoin de faire attention pendant son exécution ; cela permet de se concentrer sur d'autres choses.

L'expertise permet aux humains d'être performants dans l'exécution de tâches. Dans un système automatisé, si à chaque fois que l'on essaie de résoudre un problème on part de zéro ; le système risque d'être fortement désavantagé et peu performant. Ainsi, un levier pour palier à ce défaut, et donc pour avancer vers un SAC capable d'écoconduire, est de s'inspirer des mécanismes permettant à un apprenti de passer de la phase cognitive à la phase autonome, en devenant en experts. A présent, nous présenterons certains de ces phénomènes, tirés encore une fois de [8].

1.5.2.2 Mécanismes pour l'acquisition d'une compétence

Lors de l'exécution répétée d'une activité, plusieurs phénomènes cognitifs ont lieu, rendant la tâche de plus en plus facile et nous permettant de devenir plus compétents : *Procéduralisation, Apprentissage tactique, Apprentissage stratégique et Perception/Représentation du problème* [8]. Pour faciliter la compréhension, nous illustrerons les explications par des exemples issus de situations réelles, qui semblent plutôt intuitifs.

- **Procéduralisation :** c'est le processus à travers lequel les gens passent d'une utilisation explicite des connaissances déclaratives à l'application directe des connaissances

procédurales. Le degré dans lequel un apprenti s'appuie sur des connaissances déclaratives décroît fortement avec le temps. Avec l'expérience, un certain nombre de transformations s'opèrent dans la manière d'exécuter des tâches :

- L'application des protocoles et des postulats associés à la tâche s'accélère.
- Il n'y a plus besoin de reformuler verbalement les postulats et les protocoles. L'apprenti n'a plus besoin de faire appel dans sa mémoire de travail à une représentation explicite, déclarative, du protocole à suivre.
- Lors qu'on apprend à exécuter une tâche, l'application des postulats et des protocoles se fait par partie, de manière découplée ; on a besoin d'identifier chaque postulat, un à un. Avec de l'expérience, cela n'est plus nécessaire ; on peut exécuter la totalité de la tâche, de manière fluide. Le protocole peut être exécuté d'une traite, comme s'il s'agissait d'un tout.

Grâce à l'entraînement, l'apprenti devient expert. Il est désormais capable d'exécuter des tâches complexes très rapidement, avec une étonnante facilité et précision.

* * *

La quantité d'effort et le niveau d'attention que demande l'exécution d'une tâche décroissent fortement avec l'expérience. Qin et al (2003) ont utilisé des techniques d'imagerie neuronale, en particulier de l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf)¹¹, pour contrôler l'activité cérébrale des participants qui résolvait des équations dans un système algébrique qui leur était inconnu [173]. Au cinquième jour de l'étude, on a trouvé une diminution de l'activité métabolique du cortex pré-frontal ventrolatéral par rapport aux niveaux du premier jour. Cette partie du cerveau semble être associée à la recherche de l'information déclarative [8, 173]. Ainsi, avec l'entraînement, les participants ont vu réduire l'effort à appliquer pour la résolution des tâches, alors qu'ils avaient augmenté leur précision et la complexité de tâches qu'ils pouvaient gérer, tout en améliorant leur temps d'exécution.

Un exemple du phénomène de procéduralisation, tiré de [140], est celui du changement de vitesse avec une transmission mécanique. Lors de l'apprentissage, le conducteur novice devra focaliser toute son attention à chacune des étapes nécessaires au changement du rapport (*relâcher la pédale d'accélération ; appuyer sur la pédale d'embrayage ; déplacer le levier des vitesses jusqu'à la position de neutre ; passer le levier de vitesse jusqu'au rapport suivant ; relâcher la pédale d'embrayage et, simultanément, appuyer sur la pédale d'accélération*). Au début il devra consacrer toute son attention à l'exécution de chacune des étapes, et il sera assez lent et enclin à commettre des erreurs. Cela correspond à la phase cognitive de son apprentissage. Avec le temps et l'expérience, cependant, il deviendra de plus en plus efficace et il n'aura plus besoin de

¹¹. L'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) est une technique médicale qui permet de générer des images représentant le fonctionnement du cerveau. Elle est basée sur l'envoi d'ondes radio vers le cerveau générant des champs magnétiques aux endroits où il y a du sang, chargé en fer. L'IRMf génère ainsi une mesure de la quantité de sang envoyée vers chaque zone du cerveau, et donc du niveau d'activité de chaque zone [8].

reformuler chacune des étapes. Il aura uniquement besoin de penser à l'objectif à atteindre (p.ex. *passer de la première vitesse à la deuxième vitesse*). Et il sera même en mesure d'intégrer cette opération lors de l'exécution d'une tâche plus compliquée, comme le dépassement d'un véhicule.

Il est possible de s'inspirer sur ce principe pour la conception de systèmes automatisés : lorsqu'on se place aux niveaux supérieurs de la fonction automatisé, il y aurait juste besoin de penser aux objectifs de la tâche (*veux-je que mon véhicule puisse accélérer rapidement?...*) ; plus besoin de considérer chaque détail de l'exécution de la tâche (*dois-je déplacer le levier des vitesses à gauche ou à droite?...*). Trouver une formulation et un découpage fonctionnel adéquat peut s'avérer un défi ; cependant, une fois réalisé, l'exécution de l'algorithme sera beaucoup plus efficace. Les tâches les plus détaillées, peu coûteuses en temps de calcul, pourraient être exécutées de façon assez récurrente, alors les tâches plus globales, et dont le coût est plus élevé, pourraient être exécutées moins fréquemment.

- **Apprentissage tactique :** lorsqu'un apprenti s'entraîne sur des problèmes différents, il finit par apprendre des procédures, c'est-à-dire, des séquences d'actions nécessaires à la résolution de problèmes dans ce domaine. Ce phénomène est appelé *apprentissage tactique*, une *tactique* étant une méthode pour accomplir un but [8].

Un expert dans un domaine, aura acquis, avec le temps, un *répertoire de compétences*, ou *répertoire procédural* qu'il pourrait utiliser à sa guise, en fonction de ses besoins [140]. Pour chacune de ces compétences, un long processus d'apprentissage et de maîtrise aura eu lieu. De plus, il sera à même d'adapter et combiner des opérateurs, des procédures, pour accomplir des tâches nouvelles ou plus complexes.

Un exemple de cela, est un guitariste qui, au cours du temps, aura acquis un *répertoire* des chansons qu'il saura très bien jouer. Ces chansons demanderont elles-mêmes la maîtrise des compétences plus spécifiques : savoir faire certaines rythmiques, connaître certaines gammes. . . . Chaque morceau impliquera un certain nombre de séquences devant être exécutées de la bonne manière et dans le bon ordre. Cependant, avec une quantité suffisante d'entraînement, le guitariste sera en mesure de les exécuter de manière réussie.

Ce n'est donc pas parce qu'une tâche est exécutée de manière rapide et fluide qu'elle est simple. Cette idée ne devrait pas être négligée lors de la conception d'un système automatisé. En particulier, l'utilisation de séquences bien maîtrisées offre un levier pour améliorer la performance et la rapidité dans l'exécution d'une tâche. Plutôt que de devoir décider, au niveau maximal de détail, chaque aspect de la résolution d'un problème, un algorithme pourrait choisir, dans un répertoire procédural, un protocole adapté à la situation et le moduler pour répondre correctement au besoin.

- **Apprentissage stratégique :** les problèmes complexes ne se répéteront pas exactement de la même manière ; par contre, des gros problèmes peuvent présenter des

structures similaires et des éléments communs, ce qui rend possible d'organiser un type généralisé de solution, capable de répondre à des problèmes de nature similaire. Le mécanisme permettant d'organiser la manière de résoudre une *famille de problèmes* est connu sous le nom d'*apprentissage stratégique*. L'utilisation de l'apprentissage stratégique permet d'aboutir à une approche optimisée permettant la résolution de problèmes issus d'un domaine spécifique.

Si l'on pense à notre guitariste, une fois qu'il aura un bon niveau, il pourra organiser son répertoire de chansons selon les émotions que celles-ci transmettent. Des morceaux rythmés, avec des gammes majeures, seront bien adaptés à des ambiances joviales ; *a contrario*, des morceaux lents, sur des gammes mineures, seront plus adaptés à des moments solennels, voire tristes. A ce moment, plutôt que de réfléchir à ce que ces doigts doivent faire, le musicien pourra penser au choix des chansons en fonction du besoin et du contexte, aux *objectifs* de sa performance¹².

Un système automatisé basé sur des principes cognitifs pourrait, plutôt que de se limiter à accomplir une tâche, trouver une solution optimisée par rapport à un certain nombre de critères. Face à un problème, une fois que l'on a choisi une procédure adaptée, on pourrait la moduler pour la rendre optimale par rapport à un certain nombre de critères : coût, rapidité, robustesse. L'écoconduite est un domaine qui pourrait bien bénéficier d'une telle approche.

- **Perception/représentation du problème :** un autre aspect associé à la maîtrise d'un domaine est le développement d'une *représentation efficace des problèmes*, basée sur quelques *caractéristiques* riches en information. Les experts apprennent à identifier des principes implicites communs à des situations assez différentes au niveau superficiel, ce qui leur permet d'avoir une représentation commune tenant compte des principes fondamentaux des problèmes.

Henri Poincaré a dit que « *la mathématique est l'art de donner le même nom à des choses différentes* » [170]. Richard Feynman a dit quelque chose de similaire au sujet de la physique qui, d'après lui, tend à synthétiser des « *phénomènes de plus en plus nombreux en un nombre de plus en plus restreint de théories*¹³ » [66]. Ces deux grands savants ont posé le doigt sur une caractéristique qui serait propre à l'esprit humain : quelque chose au plus profond de nous, tend à voir un tout mystérieux qui relie des choses qui, au premier regard, sont différentes ; à percevoir des connexions cachées au plus profond de ce qui nous entoure.

En appliquant ce principe à l'automatique : un bon algorithme, un bon système automatisé, devrait être capable de répondre, en faisant les mêmes calculs, à des problèmes qui, à la surface, sont complètement distincts. Pour se faire, la bonne représentation, le fait de trouver quel est le bon nom qu'il faut donner à des choses

12. On ose espérer qu'il ne choisira pas les mêmes chansons s'il va jouer dans un mariage, que s'il allait jouer dans un enterrement !

13. Dans la traduction de Françoise Balibar et Alain Laverne (1987).

différentes, semble incontournable. Dans la section I.1.7 et dans la Partie IV de ce document, nous discuterons quelles entrées et sorties d'un système d'écoconduite permettraient de généraliser un grand nombre de situations de conduite différentes.

1.5.3 Des neurones aux pensées : organisation de la cognition humaine

Lorsqu'on s'intéresse à la cognition humaine, une tentation dans laquelle on peut facilement tomber, est d'ignorer de quoi le cerveau est fait. Anderson (2007) compare cela à faire la spécification de l'architecture d'un bâtiment sans tenir compte des matériaux avec lequel il sera construit [9]. De la même manière, si lors de la conception d'un système automatisé nous n'imaginons pas son exécution dans un ordinateur, en temps réel avec des contraintes industrielles, nous pouvons aboutir à un développement impossible à implémenter. Pour qu'il puisse bien accomplir sa fonction, un algorithme doit correctement s'inscrire dans un environnement logiciel et matériel, en ayant les bonnes interfaces avec les fonctions voisines. Cette section s'intéresse à ce que l'étude de l'organisation de la cognition dans le cerveau, peut nous apprendre pour mieux structurer nos algorithmes.

* * *

Le Système Nerveux Central (SNC), dont le cerveau fait partie, est composé en grande partie par des neurones. Un neurone est une cellule capable de cumuler et de transmettre de l'activité électrique [8]. Parmi toutes les variétés de cellules humaines, le neurone est l'une des plus spécialisées et, en même temps, versatiles [98]. Les neurones représentent l'information en termes de deux variables continues : le potentiel de leur membrane et leur cadence de décharge [8]. Cela correspond à deux paramètres qui varient de façon continue ; en les regardant d'un autre angle, les neurones ont un comportement plus simple : ils peuvent varier de façon continue entre des états de totale excitation et de totale inhibition. Ils garderaient une certaine analogie avec les interrupteurs qui composent nos ordinateurs, les transistors, qui eux sont discrets (il peuvent uniquement faire des 0 et des 1) [8]. Il est fort remarquable que ces petites cellules sont derrière l'intégralité de la connaissance humaine. Toutes les symphonies et toutes les berceuses, tous les romans et toutes les pièces de théâtre, toutes les inventions et toutes les équations, toutes les armées et tous les vaccins, ont été un jour encodés par des neurones !

Pour comprendre comment les neurones font pour encoder les pensées, il faut réaliser qu'ils sont très nombreux : on estime que le cerveau humain contient environ 100 milliards de neurones [8]. Et ils sont inter-connectés, et communiquent entre eux, en formant des réseaux [98]. Ainsi, un groupe de neurones sera capable de coder des informations qu'un seul neurone ne pourrait pas [8].

Pour donner un exemple, lorsqu'on lit un poème, il est nécessaire d'effectuer un grand nombre de tâches. Il faut d'abord reconnaître les différentes lettres qui forment les mots, puis reconnaître ces mots et identifier comment ils interagissent les uns avec les autres, pour former des phrases ; il faut voir quel est le sens de ces phrases et comment elles sont en relation les unes avec les autres ; identifier des figures de style et les images données

par le poète ; ensuite il faut voir quel est le sens du poème, ainsi que quelles sont les émotions qu'il cherche à éveiller.

Pour encoder tout ça, les neurones sont organisés par groupes ; ils forment des structures différentes. Certaines seront dédiés à la reconnaissance de caractéristiques des traits sur le papier. A partir de ces caractéristiques, d'autres groupes de neurones seront en mesure de reconnaître des lettres (par exemple, un A est composé par trois traits droits, deux en diagonal et un horizontal, dans certaines positions) [8]. Ensuite, d'autres structures neuronales pourront identifier des mots et, pour cela, on n'a même pas besoin de reconnaître chacune des lettres ; il suffit d'avoir un nombre suffisant de lettres et un peu de contexte (voire par exemple [8, 217]). Ensuite, d'autres réseaux de neurones identifieront les phrases. Avec ces informations, différentes parties du cerveau feront des choses différentes : certaines structures s'occuperont de donner du sens aux phrases, d'autres identifieront les images que le poète cherche à transmettre, d'autres encore réveilleront des émotions chez le lecteur. . .

Cet exemple nous montre deux des clés des capacités cognitives humaines : la *modularité* et l'*architecture cognitive* [9]. Pour exécuter des tâches très complexes, le cerveau les décompose en sous-tâches plus simples, qui seront elles-mêmes découplées en sous-tâches (cf. section I.1.5.1.2). Grâce à ce découpage en *modules*, les neurones peuvent s'organiser par groupes *spécialisés* dans la résolution de chaque tâche. De plus, en ayant la bonne *architecture*, les différents modules seront reliés afin d'avoir des résultats plus rapides et robustes [9] (comment dans l'exemple de la reconnaissance de mots et de lettres, où quelques lettres suffisent pour reconnaître un mot et, en même temps, le fait de voir le mot aide à identifier les lettres [217]).

Pour transposer ces principes pour la conception d'un système automatisé, on doit garder la notion de *modules*. Une tâche complexe devrait être décomposée en des tâches plus simples, qui seront exécutées par des modules individuels, mais inter-connectés. Ils doivent être organisés dans une *architecture*, selon des niveaux de complexité différents. Les modules de plus bas niveau devraient pouvoir être utilisés par les modules supérieurs, afin de réduire le nombre de calculs nécessaires à la réalisation d'une tâche. L'application de cette notion à l'écoconduite fera l'objet du Chapitre IV.1.

* * *

Nous devons considérer une dernière notion : les informations que chaque module doit traiter ne sont pas de la même nature. Des modules de bas niveau serait directement reliés à des informations sensorielles, alors que des modules plus complexes se baseraient sur des informations issues des couches inférieures. De ce fait, le *sens* (la *signification*) des informations consommées par chaque module ne seraient pas le même.

Rasmussen (1983) distingue trois niveaux d'encodage de l'information pour l'exécution de tâches [174] :

- **signaux** : l'information sensorielle dans les niveaux cognitifs les plus bas, n'aurait pas de *signification* ou de *sens*, autres que des données physiques directes ; elle serait réduite à des signaux spatio-temporels.

- **signes** : ils peuvent faire référence à des états, des objectifs ou des tâches à réaliser. Ils permettent de sélectionner ou de modifier des règles associées au séquençement de routines.
- **symboles** : ils permettent de raisonner par rapport à l'information, afin de prédire ou d'expliquer des problèmes, ou des situations, avec lesquelles on n'est pas familiarisé.

Si le fait de découper les niveaux cognitifs en trois, et de donner des définitions précises paraît un peu arbitraire, nous retiendrons deux idées : premièrement, à chaque niveau cognitif (et donc à chaque module) correspondrait de l'information organisée différemment et dont le sens varierait. Deuxièmement, au plus bas niveau cognitif, les informations prendraient la forme de signaux spatio-temporels, sans en faire une interprétation. Cela semble compatible avec le fait que certains neurones du SNC sont directement connectés à des cellules sensorielles (voir par exemple, la section I.1.2.2).

* * *

Ci-après, nous présenterons une approche basée sur la discussion précédente, permettant d'appliquer les principes cognitifs que nous avons présentés à l'éco-conduite.

1.6 ANALYSE COGNITIVE DE LA CONDUITE ÉCOLOGIQUE

Objectif de la section

Proposer une représentation de l'écoconduite inspirée des principes cognitifs humains

Aller d'un point A à un point B, à bord de sa voiture, peut sembler une tâche banale, tellement on le fait habituellement. Cependant, lorsque des chercheurs et des ingénieurs ont commencé à travailler sur la conduite automatisée, la réalité est venue s'imposer : conduire une voiture est une tâche monstrueusement difficile ! Autant de choix à faire : *quel rapport de vitesse choisir ? ... dois-je tourner à gauche ou à droite ? ... je m'insère tout de suite sur le rond-point, ou j'attends ? ... où est-ce que je devais aller, déjà ? ...* ; et tellement des choses à considérer : *telle route est fermée, et sur telle autre il y a un bouchon ... si je prends cette sortie, il y aura plus de feux ... une voiture veut me doubler, donc je ne dois pas changer de voie ... il pleut, donc la route peut glisser ...* Si à tout cela on ajoute le fait de devoir réduire la consommation d'énergie, on peut vite se sentir dépassé et déclarer forfait.

Pourtant, plein de gens exécutent toutes ces tâches tous les jours, avec une efficacité épatante, très souvent sans s'en rendre même pas compte, en écoutant la radio ou en parlant. Et certains le font de telle manière à avoir une consommation d'énergie réduite. Comment cela se fait-il ?

Nous pensons que les principes cognitifs présentés dans les sections précédentes permettent, au moins en partie, d'expliquer la capacité humaine de bien conduire. Ainsi,

nous proposerons une approche de modélisation du problème de conduite, basée sur des principes cognitifs et permettant d'identifier des leviers d'optimisation énergétique. Cela nous aidera à identifier des stratégies d'écoconduite, ainsi que des verrous à lever pour pouvoir les appliquer correctement.

* * *

Tel qu'il a été discuté précédemment, les humains sont *orientés par des objectifs*, et il se représentent les problèmes comme un *espace d'états*. Ainsi, une première étape consiste à déterminer quel est l'objectif de la conduite.

Si l'on ignore des objectifs ludiques associés à la conduite, le fait de conduire répond à l'objectif de réduire la distance entre soit et une autre entité (un endroit, un objet, une personne...). A titre d'exemple, on peut citer Newell & Simon (1972) [9, 157]:

« Je voudrais amener mon fils à l'école maternelle. Quelle est la différence entre ce que j'ai et ce que je veux? Une distance. Qu'est-ce qui change les distances? Mon automobile... »

Ainsi, au niveau macroscopique, l'objectif global du problème de conduite est de réduire la distance entre le conducteur et quelque chose. Formulé autrement :

L'objectif global de la conduite est de se rendre d'un point de départ à un point d'arrivée, tous les deux définis au préalable.

1.6.1 Espace d'états du problème global de conduite

Résoudre le problème de se rendre du point de départ au point d'arrivée, peut s'avérer difficile si on se trouve loin de la destination. Pour trouver une solution, on peut décomposer le problème en *sous-objectifs*, qui correspondraient à des destinations intermédiaires par lesquelles on doit passer afin de se rendre à l'endroit souhaité¹⁴. Ainsi, la résolution du problème revient à déterminer quel est l'*itinéraire* à suivre.

Avec la démocratisation des systèmes de navigation, la définition du bon itinéraire a été déléguée à des machines, à l'exception quasiment de courts trajets dans des zones avec lesquelles on est familiarisé. Cependant, l'analyse de comment les humains résolvaient ce problème peut nous renseigner sur des enjeux pour le conducteur dans la planification de son itinéraire. La discussion peut aussi nous donner des idées pour l'implémentation d'algorithmes d'éco-planification du trajet (*eco-routing*, en anglais).

Pour trouver l'itinéraire, nous pouvons générer une représentation du problème sous la forme d'un *espace d'états*. D'après Pailhous (1970) [164], puis Michon (1985) [140], les taxis parisiens auraient une manière assez particulière de résoudre ce problème, que nous pouvons formuler comme suit :

→ **SI** le point d'arrivée est situé dans la même zone routière où l'on se trouve, **ALORS** on doit s'y rendre en suivant la plus courte route convenable

¹⁴. Cela rappelle assez clairement des idées de Bellman [20]

- **SI** la destination ne se trouve pas sur la zone routière actuelle **ET** que l'on se trouve dans une zone routière familière, **ALORS** aller au point de la zone actuelle qui est le plus près de la destination, **PUIS** se rapprocher de la destination en suivant les panneaux de signalisation
- **SI** la destination ne se trouve pas sur la zone routière actuelle **ET** que l'on ne se trouve pas dans une zone routière familière, **ALORS** aller au point de la zone actuelle qui est le plus près de la destination, **PUIS** continuer de conduire, en minimisant l'*angle* entre la trajectoire actuelle et la direction vers le point d'arrivée.

Cette heuristique peut s'avérer assez efficace, en général ; en revanche, elle pourrait poser des problèmes dans certains cas, notamment en présence des voies fermées. Elle nous renseigne aussi sur la représentation que le conducteur se fait de l'espace du problème, et en particulier sur le fait que le conducteur divise la ville par *zones*, ou *réseaux routiers*. Nous proposons donc la définition de l'espace d'états suivante :

- **Espace du problème** : l'espace urbain, ou extra-urbain, dans lequel on doit évoluer, est divisé en zones routières. Ces zones correspondent à des secteurs urbains (des quartiers, des communes, des zones industrielles. . .) ; elles peuvent être aussi des parties du réseau routier (des ceintures périphériques, des tunnels, des autoroutes. . .). Si l'on souhaite se rendre à une destination plus lointaine, les zones seraient, par exemple, des villes principales par lesquelles il faudrait passer. Les différentes zones sont reliées entre elles par des points de connexion.
- **États** : ils correspondent à des secteurs de l'environnement urbain ou extra-urbain.
 - **État initial** : zone ou réseau routier où se trouve le point de départ.
 - **États intermédiaires** : différentes zones par lesquelles on pourrait passer pour aller à la destination.
 - **État cible** : zone routière dans laquelle se trouve la destination ; cet état comprend aussi le point d'arrivée, l'endroit précis où l'on souhaite se rendre.
- **Opérateurs** : il s'agit des points qui relient les différentes zones entre elles. Lorsqu'on se trouve dans une zone, il y a un certain nombre d'endroits, à la frontière de la zone, qui permettent de rejoindre les zones environnantes. Aussi, il est souvent possible d'atteindre une même zone voisine à plusieurs endroits ; en fonction du point de connexion choisi, on aura plus ou moins de temps de trajet, on devra faire face à des niveaux de trafic différents et on aura une consommation énergétique associée.

La figure 1.1 illustre l'espace du problème de planification du trajet, ainsi que le processus décisionnel du conducteur. D'abord, il identifie sa position actuelle et où doit-il se rendre ; il doit déterminer la zone et le point où il se trouve, ce qui correspond à l'état initial, ainsi que la zone et le point d'arrivée, qui forment l'état cible (figure 1.1a). Ensuite, on doit identifier les zones par lesquelles on peut passer pour atteindre l'état cible ; chaque zone peut donner lieu à un sous-objectif, que l'on devra atteindre pour arriver à l'objectif

global (figure 1.1b). En fonction des zones choisies, différents points de connexion permettront de passer d'un état à un état voisin (figure 1.1c) ; il y aura potentiellement plusieurs points qui permettront d'accéder à la même zone. Le fait de passer par une zone impliquera des conditions de la route et du trafic, des durées de trajet, et une consommation énergétique différentes. Lorsqu'il fait le trajet, chaque conducteur peut avoir des objectifs différents (aller au travail, se promener le week-end...), des motivations diverses (*intérêt pour l'environnement, nécessité d'être à l'heure...*), et être dans des conditions qui varient (*fatigue, énervement...*). En fonction de ce qu'il cherche, il peut, par exemple, choisir un itinéraire rapide, ou un autre qui lui permet de réduire sa consommation énergétique (figure 1.1d).

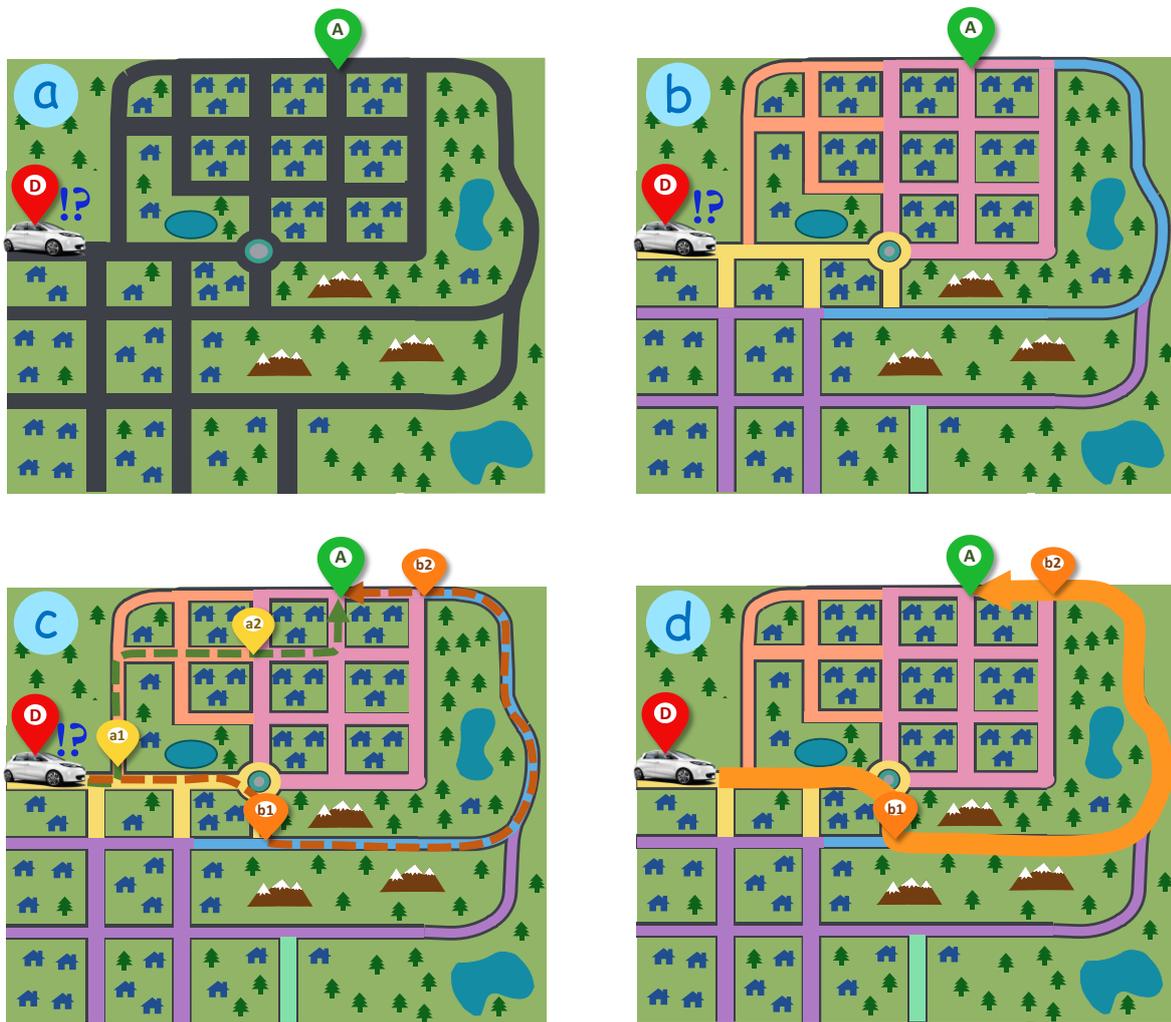


FIG. 1.1 – Espace du problème de planification du trajet et procédure de sélection des opérateurs. (a) L'objectif global est de se rendre du point de départ D au point d'arrivée A. (b) division en zones (états) de l'espace routier. (c) pour passer, à une zone voisine il est nécessaire de trouver un point (opérateur) dans la zone actuelle permettant d'y accéder ; pour une même destination, il peut y avoir plusieurs choix d'itinéraire possibles. (d) On choisit son itinéraire en fonction de ses objectifs : y arriver rapidement, avoir une circulation fluide, réduire sa consommation...

Dans l'exemple de la figure 1.1c, le conducteur peut choisir entre deux itinéraires : soit il peut suivre l'itinéraire $[D \rightarrow a_1 \rightarrow a_2 \rightarrow A]$, que l'on nommera *trajet a*, soit il peut faire $[D \rightarrow b_1 \rightarrow b_2 \rightarrow A]$, dit *trajet b*. Pour le trajet a, il devra passer par une zone urbaine, en parcourant une plus courte distance ; par contre, en fonction de l'heure de la journée, cela peut impliquer qu'il y aura beaucoup de trafic. D'autre part, s'il emprunte le *trajet b*, il contournera le trafic en prenant une route extra-urbaine et, en plus, il pourra rouler plus vite. Ainsi, le *trajet b* sera plus rapide et moins pénible que le *trajet a*. Si nous considérons l'aspect énergétique, en supposant que le conducteur est à bord d'un VE, pour le *trajet a* on roulera à faible vitesse, ce qui permettra d'avoir un bon rendement du GMP ; de plus, le fait d'avoir un VE permettra d'« éteindre » la machine électrique à chaque arrêt, ce qui diminuera fortement les pertes au ralenti. Par contre, sur le *trajet b*, on roulera plus vite, avec un rendement du GMP inférieur, et plus de pertes à l'avancement. De plus, on parcourra une plus longue distance, ce que conduira à une plus grande dépense énergétique. Dans notre exemple, le conducteur a choisi le trajet qui lui permettait d'arriver le plus vite, avec le meilleur agrément de conduite, en dépit de la consommation énergétique (figure 1.1d).

Tel que l'exemple nous le montre, la consommation d'énergie est loin d'être le seul critère que les conducteurs prennent en compte au moment de choisir leur itinéraire. D'autres aspects tels que le temps de trajet, ou le niveau de trafic sont aussi importants. Cette représentation du problème permet de considérer les différentes motivations du conducteur. Une façon de le faire consiste à associer, pour chaque zone z , des densités kilométriques à la consommation d'énergie, ρ_E^z , à la durée du trajet, ρ_τ^z , et à l'impact sur l'agrément de conduite, ρ_{ag}^z . Cela est illustré par la figure 1.2a.

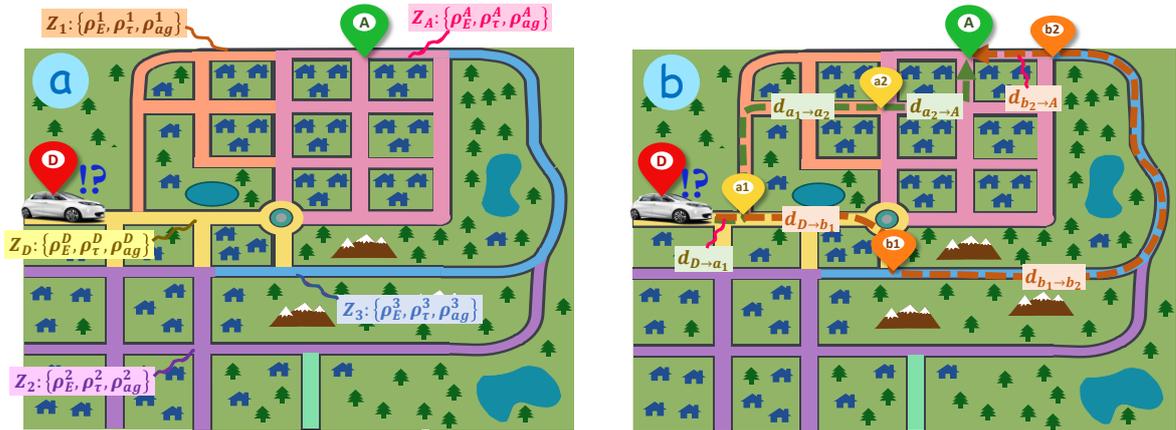


FIG. 1.2 – Estimation de coût par itinéraire (a) A chaque zone est associé un coût kilométrique (b) on calcule les distances entre les points d'entrée et de sortie de chaque zone, ainsi que celles des segments initial et final. E : Consommation d'énergie ; τ : durée de trajet ; ag : pénalité sur l'agrément de conduite

Ensuite, le choix d'opérateurs, c'est-à-dire, des points de la carte par lesquels il faut passer, implique qu'on parcourra une certaine distance dans chaque zone. Ainsi, au *trajet a* de notre exemple correspondront les distances $d_{D \rightarrow a_1}$ (distance du trajet entre D et a_1),

$d_{a_1 \rightarrow a_2}$ et $d_{a_2 \rightarrow A}$; et au trajet b les distances $d_{D \rightarrow b_1}$, $d_{b_1 \rightarrow b_2}$ et $d_{b_2 \rightarrow A}$ (1.2b). Pour calculer l'impact d'un trajet sur l'un des critères, il suffit de faire la somme des produits entre la densité kilométrique associée au critère et chaque zone et la distance à parcourir dans chaque zone. L'équation 1.1 présente le calcul de la consommation estimée associée au trajets a et b, ΔE^a et ΔE^b , respectivement. Cette approche peut être appliquée au cas général, sans grande difficulté, en adaptant la notation.

$$\begin{aligned}\Delta E^a &= \rho_E^D \cdot d_{D \rightarrow a_1} + \rho_E^1 \cdot d_{a_1 \rightarrow a_2} + \rho_E^A \cdot d_{a_2 \rightarrow A} \\ \Delta E^b &= \rho_E^D \cdot d_{D \rightarrow b_1} + \rho_E^3 \cdot d_{b_1 \rightarrow b_2} + \rho_E^A \cdot d_{b_2 \rightarrow A}\end{aligned}\quad (1.1)$$

Le même principe peut être utilisé pour estimer la durée du trajet et son impact sur l'agrément (par le biais d'un indicateur *ad hoc*). En faisant ainsi, il est possible de tenir compte de tous les critères associés aux motivations du conducteur. Cela pourrait se faire, au moins, de deux façons différentes: on peut associer un *coût global du trajet*, qui serait une pondération des coûts associés à chaque critère. Une autre approche consiste à fixer des seuils de durée maximale et d'impact sur l'agrément tolérable, moyennés sur la distance du trajet (à vol d'oiseau); ensuite, on pourrait trouver le trajet le plus écologique *acceptable* par le biais d'une optimisation sous contraintes. Cette dernière approche a le gros avantage d'avoir une mise au point beaucoup plus intuitive.

Cette modélisation du choix d'itinéraire présente deux grands atouts: le *faible coût d'exécution* et la *robustesse*. En effet, le calcul de la consommation associée à chaque zone revient à faire un produit de deux variables, relativement faciles à calculer. De plus, la représentation par zones de l'espace routier, permet d'associer un coût au segment du trajet, en se basant sur des informations faciles à avoir (p.ex. l'heure de la journée, les conditions météorologiques, le type de routes présentes dans la zone). Le fait d'avoir peu de paramètres rend cette méthode assez robuste pour obtenir une estimation *grossière* du coût du trajet.

Ce n'est pas un hasard si cette méthode présente ces avantages. Elle est basée sur le fonctionnement du cerveau, qui est capable de faire des calculs *grossiers* mais fort *pertinents*, avec très peu d'effort. De plus, en appliquant le principe à un système embarqué, il est possible de combler l'une des limitations de la cognition humaine: la taille du tampon de stockage d'informations (mémoire court-terme¹⁵) [8, 60] et la taille de la base de données (mémoire long-terme) [29]. Cela devrait permettre d'avoir des résultats plus performants que ceux d'un utilisateur humain.

Une fois le trajet choisi, on doit déterminer comment se déplacer entre les différents points intermédiaires. Cela revient à trouver à quelle vitesse il faut rouler et peut être formulé aussi sous la forme d'un espace d'états.

15. Pour donner un exemple, l'intervalle de chiffres qu'une personne normale est capable de retenir est d'environ 7 ou 8 chiffres; à peine de quoi retenir un numéro de téléphone. En revanche, avec de l'entraînement, on est capable de beaucoup améliorer sa mémoire. Après plus de 200h d'entraînement, un étudiant a été capable de retenir environ 80 chiffres différents! [8, 60]

1.6.2 Espace d'états du problème de détermination de vitesse stabilisée pendant le trajet

Pour atteindre les différents points de l'itinéraire, on doit se déplacer dans son véhicule. Pour passer d'un point du trajet au suivant, le véhicule doit avoir une vitesse non-nulle. Les contraintes imposées par l'infrastructure et le trafic font que cette vitesse variera en fonction du temps. Cependant, il peut être assez difficile de décider à l'avance l'évolution de la vitesse à chaque instant ; pour cela il faudrait savoir ce que les autres véhicules feront, et nous ne disposons pas à l'avance de cette information. Par contre, on peut décider la vitesse que l'on maintiendra dans les phases stabilisées, quand le trafic le permettra. Cela revient à se demander : « est-ce que dans cette zone-là je vais rouler vite ? où je vais plutôt rouler doucement ».

Étant donnée que la vitesse est limitée, soit par la loi, soit par le trafic, une solution triviale à ce problème consiste à rouler, tant que possible, à la vitesse limite autorisée. Cependant, si l'on désire réduire sa consommation d'énergie, on peut considérer de rouler à des vitesses inférieures. Ci-dessous, nous présentons l'espace d'états associé à ce problème.

- **Espace du problème** : les états correspondent aux destinations intermédiaires, aux points sur la carte qui ont été déterminés dans l'étape précédente. L'opérateur pour aller d'un point au suivant est de conduire à une certaine vitesse entre ces deux points.
- **Etats** : ils correspondent aux points intermédiaires de l'itinéraire
 - **État initial** : position de départ.
 - **États intermédiaires** : points par lesquels il faut passer pour se rendre à la destination
 - **État cible** : point d'arrivée.
- **Opérateurs** : vitesse à laquelle on se déplace. A ce niveau de l'analyse nous considérons uniquement la vitesse lors des phases stabilisées du trajet.

La Figure 1.3 présente deux choix possibles d'opérateurs (vitesses stabilisées) qui permettent de répondre à ce problème. Tel que nous pouvons le voir, dans les deux cas, on passe par les mêmes états (points sur la carte) pour atteindre l'objectif ; par contre, pour passer d'un état au suivant, on choisit des opérateurs (vitesses stabilisées) différentes. Il existe donc une pluralité d'opérateurs différents permettant de changer l'état du problème (arriver au prochain point de l'itinéraire) ; cependant, en fonction du choix des opérateurs, le trajet aura des impacts différents sur le conducteur et sur son environnement. Par exemple, le conducteur de la figure 1.3a, qui a une conduite sportive, aura *potentiellement* un temps de trajet réduit¹⁶, et probablement plus de sensations fortes¹⁷ ; par contre, il aura aussi une consommation d'énergie plus importante. *A contrario*, le conducteur de la figure 1.3b, aura *peut-être* plus de temps de trajet et une conduite plus calme (ce qui

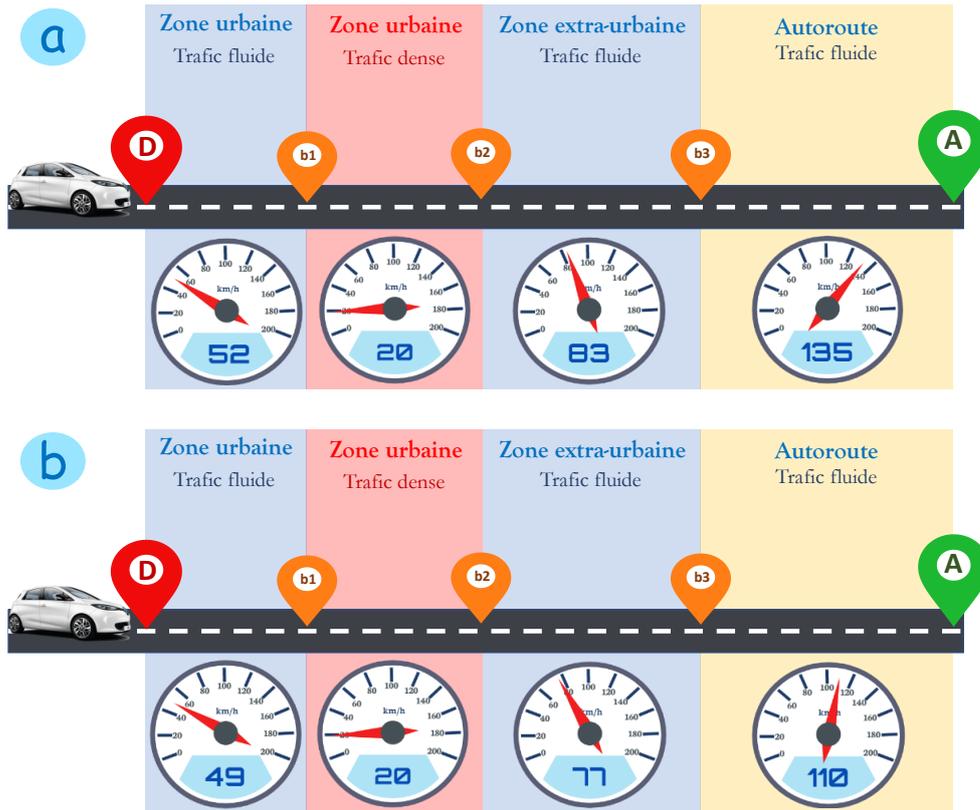


FIG. 1.3 – Espace du problème de détermination de vitesse stabilisée pendant le trajet (a) Exemple de conduite sportive. (b) Exemple d'écoconduite.

est peut être ce qu'il recherche), tout en ayant une consommation réduite. Par contre, s'il décide de trop réduire sa vitesse, il risque de gêner la circulation.

La figure montre aussi que, en dehors du passage sur l'autoroute, où l'on peut rester sur la voie des camions, la différence de vitesse entre les deux styles de conduite n'est pas très importante. Cela est compatible avec les résultats de [59], où il est montré que le type de route a une plus forte influence sur le style de conduite que le type de conducteur. En effet, les contraintes réglementaires et les conventions sociales font que, en général, les gens sont assez prévisibles par rapport à la vitesse à laquelle ils roulent lors des phases stabilisées. Cela est particulièrement vrai dans des zones à fort trafic où l'on ne peut quasiment que subir la vitesse imposée par le trafic.

Il existe plusieurs solutions permettant de déterminer les vitesses optimales lors des phases stabilisées. Souvent, ces solutions passent par la formulation d'un problème de commande optimale, dont la solution permet, entre autres, de déterminer des valeurs optimales de vitesses stabilisées [194, 197]. Nous tenons juste à signaler l'importance de la prise en compte des contraintes associées au trafic et à l'infrastructure lors de la détermi-

16. Cela pourrait ne plus être vrai en présence du trafic. On en discutera plus tard dans ce document.

17. Il est nécessaire de nuancer cette affirmation, dans la mesure où ce sont l'accélération et sa dérivée, l'à-coup, qui semblent être les principaux responsables des sensations de conduite. Cela sera longuement discuté dans des sections postérieures.

nation de ces vitesses, afin de garantir la pertinence des solutions proposées. De même, il est d'intérêt d'adapter la stratégie de réduction de vitesse en fonction du type de scénario, urbain, extra-urbain ou autoroutier.

1.6.3 Espace d'états du problème d'un changement de vitesse

Pendant la conduite, il est rare de garder la même vitesse tout au long du trajet. L'infrastructure et le comportement des véhicules environnants peuvent contraindre le conducteur à faire varier sa vitesse. Nous proposons ici une approche qui permet de formuler l'espace du problème des changements de vitesse.

- **Espace du problème** : les états seront des vitesses stabilisées, et les opérateurs des profils d'accélération.
- **Etats** : ils correspondent à des vitesses stabilisées, suffisamment longues pour pouvoir être perçues comme telles par le conducteur.
 - **État initial** : vitesse initiale.
 - **États intermédiaires** : valeurs de vitesse intermédiaires qui peuvent être nécessaires, ou qui peuvent aider, à atteindre la vitesse cible.
 - **État cible** : vitesse que l'on doit attendre en fin de manœuvre. En plus de la vitesse, l'état cible peut contenir d'autres facteurs de type spatial (p.ex : *être à vitesse nulle derrière un feu rouge*).
- **Opérateurs** : Les opérateurs correspondront à des profils d'accélération, qui permettront de passer d'une vitesse stabilisée à une autre.

La Figure 1.4 illustre deux exemples de situations dans lesquelles le trafic ou l'infrastructure imposent un changement de vitesse. Sur la figure 1.4a, nous avons un cas où l'infrastructure impose de varier sa vitesse ; en particulier, un changement réglementaire de vitesse fait que le véhicule passe de 30 km/h à 50 km/h. Dans ce cas, l'état initial correspond à la vitesse initiale du véhicule (30 km/h) ; l'état final correspond à la nouvelle vitesse réglementaire (50 km/h), qui devrait être atteinte, dans l'idéal, avant d'arriver sur le panneau (ce qui correspond à un objectif de position). L'opérateur permettant de passer de l'état initial à l'état cible, est un profil d'accélération dont l'aire sous la courbe doit être positive. Il existe une notion de gravité associée au non-respect de l'objectif de vitesse, qui dépend du signe de la différence. En effet, si l'on finit à une vitesse légèrement inférieure à la limite de vitesse, le conducteur ne sera pas forcément gêné (pourvu que l'écart soit faible) ; par contre, si l'on dépassait la vitesse réglementaire, on pourrait avoir une amende. De même, le fait d'atteindre la cible de vitesse légèrement après le panneau, n'engendrera généralement pas de conséquences importantes.

La Figure 1.4b représente une situation où l'on est contraint de varier sa vitesse à cause des véhicules environnants. Le cas représenté est celui d'un accostage sur un véhicule qui avance à une vitesse inférieure. Dans ce cas, l'état initial est la vitesse initiale du

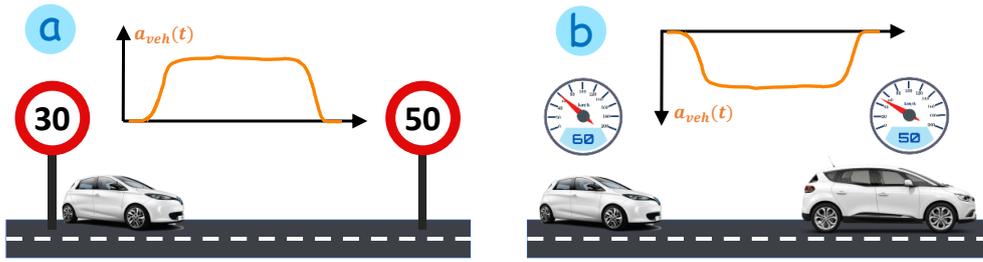


FIG. 1.4 – Espace du problème de changement de vitesse - manœuvres simples (a) Transition imposée par l'infrastructure (et/ou la réglementation) ; dans l'exemple, un changement de vitesse limite. (b) Transition imposée par le trafic ; dans l'exemple, accostage derrière un véhicule.

véhicule hôte ; l'état cible consiste à atteindre la même vitesse que le véhicule précédent, tout en respectant une inter-distance de sécurité. L'opérateur correspond à un profil de décélération à intégrale négative. Dans ce cas, la nature des objectifs n'est pas la même. D'une part, les écarts entre la vitesse finale et la vitesse cible impliquent des conséquences plus sérieuses : dépasser l'objectif de vitesse pourrait se traduire par une collision entre les véhicules ; par contre, finir à une vitesse inférieure à la cible, impliquerait que la distance avec le véhicule cible ne cesserait d'augmenter, ce qui pourrait favoriser l'insertion d'un troisième véhicule, générant du désagrément. Aussi, la contrainte spatiale n'est plus associée à un point fixe sur la route, mais à une position relative entre les deux véhicules. La sévérité associée au respect de l'inter-distance est plus importante que dans le cas du panneau, dans la mesure où une trop faible distance relative peut être anxiogène, voire dangereuse.

Les deux cas que nous venons de présenter ont en commun le fait qu'il est possible d'atteindre l'objectif avec une *manœuvre*¹⁸ simple, dont la valeur de l'accélération ne s'annule pas en dehors de l'instant initial et l'instant final. Il existe, cependant, des situations de conduite dont l'exécution demande d'atteindre des états intermédiaires, pouvant être représentées par l'ajout de sous-objectifs dans l'espace du problème. Nous avons comme exemple une manœuvre de dépassement, qui commence par une accélération et un changement de voie jusqu'à une vitesse supérieure à celle du véhicule de devant, suivi par une potentielle phase de roulage à vitesse stabilisée, pour ensuite décélérer au moment de se rabattre.

Un autre exemple, représenté sur la Figure 1.5, est celui du rapprochement à un véhicule roulant sur la même voie. Dans ce cas, on doit se rapprocher du véhicule précédent qui, au début de la situation, roule à une vitesse supérieure. L'état initial du problème correspond donc à la vitesse initial du véhicule hôte, v_0 , ainsi qu'à la distance relative initiale entre les deux véhicules, Δx_0 , (*phase 1*, sur la figure). Afin de réduire l'inter-distance, on doit atteindre une vitesse supérieure à la celle du véhicule cible (*phase 2*) ; cette vitesse, v_{int} , correspond à un état intermédiaire. Une fois qu'on s'est suffisamment rapproché, on devra réduire sa propre allure pour égaliser celle du véhicule précédent. L'état cible cor-

18. La notion de manœuvre sera formellement définie dans le Chapitre II.2.

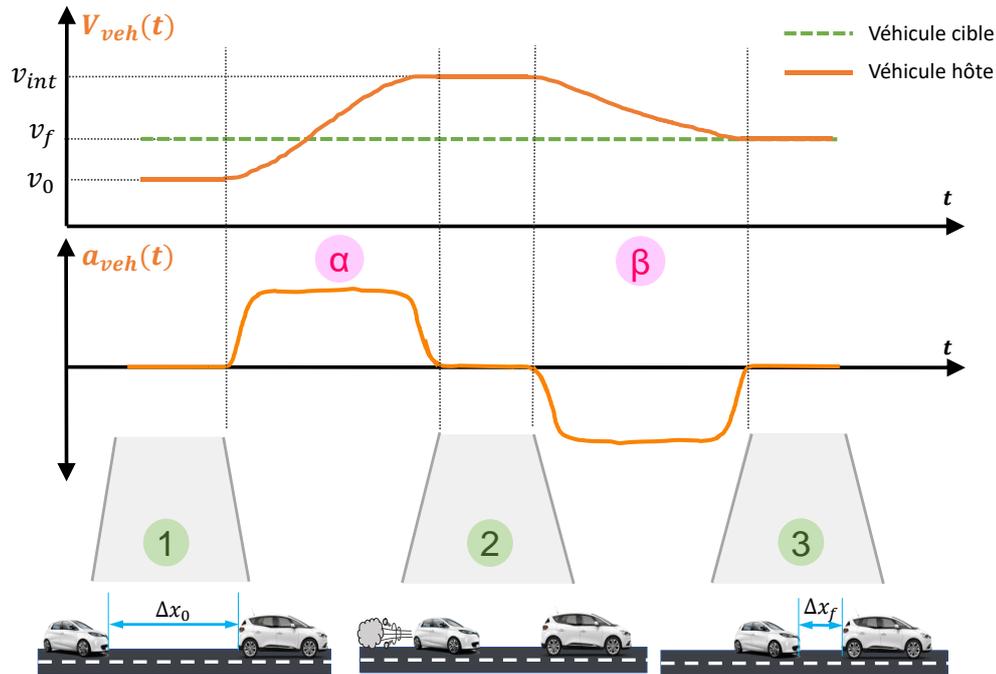


FIG. 1.5 – Espace du problème de changement de vitesse - manœuvres complexes. L'exemple sur la figure représente le rapprochement d'un véhicule au véhicule précédent, suivi d'un accostage. On distingue trois phases stabilisées (1-3) et deux phases transitoires (α et β).

respond donc à la vitesse du véhicule précédent, v_f (phase 3), ainsi qu'une inter-distance finale, Δx_0 , qui doit être acceptable pour le conducteur. Les opérateurs permettant d'atteindre les états sont un profil d'accélération (phase α) et un profil de décélération (phase β).

La détermination d'un opérateur, c'est-à-dire, d'un profil d'accélération, permettant de modifier la vitesse du véhicule, peut être un problème difficile à résoudre, d'autant plus si l'on considère qu'il doit respecter aussi les attentes du conducteur en termes de comportement dynamique de son véhicule. Sur la partie IV, nous proposerons une approche, basée sur les principes de la cognition humaine, qui permet de trouver et exécuter une solution satisfaisante, pouvant être embarquée pour des applications temps-réel.

1.7 DISCUSSION : APPORTS DE L'APPROCHE COGNITIVE

Objectif de la section

Synthétiser ce que nous avons vu jusqu'à présent et explorer ses implications

Nous venons de considérer le fonctionnement de la cognition humaine, ce qui nous a permis de proposer une approche pour la représentation de problèmes d'écoconduite, basée principalement sur les travaux de Newell et Simon, d'Anderson et de Michon. La

discussion a mis en évidence l'importance de découper l'écoconduite en sous-problèmes, avec des niveaux de détail et de difficulté différents.

Nous avons proposé de découper l'écoconduite en trois sous-problèmes complémentaires : le conducteur doit décider comment se rendre à destination, ce qui revient à la *définition de l'itinéraire à suivre* ; puis, il doit savoir comment il se déplacera entre les différentes étapes de son itinéraire, ce qui revient à la *détermination des vitesses stabilisées* ; finalement, il devra déterminer comment changer sa vitesse entre deux phases stabilisées, ce qui correspond à la *détermination des profils d'accélération*. Nous avons mis en italiques les solutions à ces problèmes, exprimées sous la forme de séquences d'opérateurs. Étant donné que différentes séquences d'opérateurs peuvent résoudre un même problème, nous pouvons dire que l'écoconduite, dans ce cadre, revient à *trouver la séquence d'opérateurs permettant de répondre à un problème de conduite, tout en minimisant la consommation d'énergie*.

Les catégories des problèmes que nous proposons semblent compatibles avec les stratégies d'écoconduite que les gens reportent. Par exemple, Mcilroy & Stanton (2016) ont montré que, lorsqu'on demande à des conducteurs dans le Royaume Uni d'indiquer des stratégies d'écoconduite, ils reportent séparément l'éco-planification de son itinéraire, la réduction de sa vitesse moyenne et le fait d'accélérer et de décélérer doucement ; par ailleurs, certains reportent indépendamment les actions sur les accélérations de celles sur les décélérations [134]. Des conducteurs allemands ont donné des réponses similaires [79]. Ces études viennent supporter la pertinence du découpage proposé.

La considération de sous problèmes permet de trouver des solutions spécifiques, capables de répondre correctement à chaque situation, tout en prenant en compte les objectifs et les motivations du conducteur. Aussi, cette approche permet de trouver des solutions relativement simples, ce qui contribue à la réduction de leur coût de calcul et simplifie donc leur implémentation pour des applications industrielles.

Il pourrait y avoir des découpages plus fins des problèmes d'écoconduite. Un exemple assez intéressant est la proposition de partager un itinéraire en segments de route, ce qui permet de garder la notion de découpler un problème en sous-problèmes [56, 55, 194, 197]. Cependant, les catégories que nous avons présentées semblent suffisantes pour montrer le potentiel de la méthode, tout en donnant des exemples qui peuvent se traduire par des applications industrielles. Aussi, certains auteurs considèrent que d'autres décisions que le conducteur doit faire, comme le choix de son véhicule ou la fréquence d'entretien, font partie de l'écoconduite [204]. On imagine que l'approche proposée peut représenter ce genre de problèmes, en permettant la prise en compte des enjeux économiques, de temps à investir, et autres. Cependant, cela sort du cadre de cette thèse.

* * *

Les trois types de problèmes différent ont des portées différentes en termes de durées et de distances considérées. De ce fait, les solutions à chaque niveau auront des impacts plus ou moins forts sur le trajet. Par exemple, le fait de choisir un itinéraire éco-responsable, peut avoir des conséquences assez fortes sur le temps de trajet et sur les conditions de roulage, alors que le choix d'UN profil d'accélération aura un impact négli-

geable sur le trajet. Ainsi, en général, plus un choix aura un impact perceptible pour le conducteur, plus le fait qu'il l'accepte ou pas dépendra de ses motivations.

Parmi les problèmes que nous avons considérés, le choix de l'itinéraire est celui qui a le plus fort impact sur le ressenti du conducteur. Quelqu'un fortement motivé pour réduire son empreinte écologique, ou qui souhaite réduire le coût du trajet, acceptera plus facilement de passer par une route de campagne au lieu de prendre l'autoroute, que celui qui souhaite réduire la durée de son trajet. Aussi, une personne pourrait plus facilement accepter un trajet un peu plus long pendant le week-end que pendant la semaine, quand elle se rendra au travail ; si la même personne doit se rendre à un rendez-vous pour lequel elle est en retard, la proposition d'un long trajet risque de lui générer un fort désagrément.

Cela nous montre l'importance pour une fonction d'éco-planification de trajet de la prise en compte des motivations du conducteur au moment de choisir un trajet. Ainsi, si l'on propose à l'utilisateur une fonction calibrable, où il puisse facilement régler le niveau de priorité accordé à l'écoconduite, il pourrait l'apprécier plus et s'en servir plus fréquemment. Une fonction d'éco-planification de trajet qui tient compte pertinemment des motivations du conducteur et capable de faire des compromis, risque d'avoir plus d'impact sur le long terme qu'une fonction trop contraignante dont le conducteur ne se servirait qu'en cas d'urgence.

En rapport avec le potentiel énergétique associé au choix de l'itinéraire, le choix de la route semble avoir plus d'impact sur la façon de conduire que le type de conducteur [59]. Ainsi, le choix du trajet aurait le plus grand impact sur la consommation d'énergie lors d'un roulage. Raison de plus pour chercher à rendre les fonctions d'éco-planification plus pertinentes, si l'on veut inciter les conducteurs à choisir des trajets plus écologiques.

Concernant le choix des vitesses pendant les phases stabilisées, deux questions se posent : *qu'est-ce qu'on peut se permettre de faire ?* et *combien ça peut apporter de point de vue énergétique ?* La première question est difficile à répondre. Le type de rue et le fait d'être ou pas en heure de pointe ont des effets significatifs sur la valeur moyenne de vitesse du véhicule [59] ; de même, il y a eu des différences significatives dans la vitesse moyenne, selon le type de conducteur. Parmi ces facteurs, le type de rue a largement été la caractéristique la plus influente. Même les conducteurs les plus calmes, devaient garder une vitesse cohérente avec le type de route. Cela montre que, même si l'on souhaitait réduire sa consommation, il est nécessaire de garder une cohérence entre la vitesse proposée et le contexte de conduite. Une solution de vitesse qui n'est pas pertinente vis-à-vis de la situation de conduite, risque de se traduire par un fort désagrément. Cette situation réduit le potentiel énergétique des stratégies se focalisant sur la variations des vitesses pic. Sur le Chapitre III.2 nous apporterons des éléments de réponse à la deuxième question, concernant le potentiel énergétique.

Même si le choix sur les niveaux d'accélération est principalement influencé par le type de route, le type conducteur semble avoir une plus forte incidence sur l'accélération que dans le cas de la vitesse [59]. Aussi, sur [79], la plupart des conducteurs ont déclaré appliquer des stratégies associées à la variation de l'accélération ; ce qui n'a pas été le cas

sur le fait de conduire à vitesse réduite, même s'ils étaient au courant de cette stratégie. Il semblerait donc qu'il y aurait plus de marge de manœuvre pour qu'un système automatisé vienne faire varier l'accélération ; ce type de fonctions pourraient donc avoir dans la pratique un plus fort potentiel de gain énergétique. Par contre, tel qu'il sera discuté postérieurement, le profil d'accélération a un plus grand impact sur l'agrément *viscéral*¹⁹ de conduite que le choix des valeurs stabilisées de vitesse. De ce fait, pour qu'une telle fonction puisse voir le jour et être acceptée par les conducteurs, la prise en compte de l'agrément de conduite est incontournable. La partie II sera justement consacrée à discuter les critères d'agrément de conduite à respecter.

Le potentiel énergétique des stratégies jouant sur l'accélération sera discuté aussi sur le Chapitre III. 2.

* * *

Un avantage supplémentaire de la décomposition de l'écoconduite en sous-problèmes est la possibilité d'appliquer les solutions de manière indépendante. Tel que nous l'avons discuté, tout les conducteurs ne seront pas prêts à changer d'itinéraire, même si c'est la stratégie qui semble présenter le plus grand potentiel écologique. Cependant, même si un conducteur a choisi un trajet sous-optimal de point de vue énergétique, on pourrait toujours lui proposer de l'exécuter à des vitesses stabilisées réduites, afin de réduire sa consommation. Et, dans le cas où ne voudrait pas accepter de réduire sa vitesse de pointe, il serait peut être prêt à accepter d'avoir une conduite moins agressive.

La modularité des solutions peut aussi s'avérer avantageuse dans certaines situations de conduite. Par exemple, dans un embouteillage le conducteur aurait très peu de marge de manœuvre sur sa vitesse de pointe ; par contre, il peut toujours choisir de suivre *doucement* le véhicule d'en face, en gardant des faibles niveaux d'accélération et de décélération.

En relation avec l'écoconduite automatisée, qui est certainement dans l'ère du temps, l'approche de découpage en sous-problèmes permet aussi d'imaginer une introduction progressive des stratégies d'éco-conduite. En effet, la conception, développement, industrialisation et commercialisation d'un système d'écoconduite complètement autonome, capable de choisir de façon automatique son propre itinéraire, puis de l'exécuter, semble être un objectif hors d'attente, du moins dans le court terme. Les tâches plus globales (p.ex. l'exécution de l'itinéraire) demandent d'être capable réaliser les tâches plus spécifiques (p.ex. savoir changer la valeur de vitesse stabilisée du véhicule) ; en revanche, les solutions générales pourraient être *proposées* au conducteur pour qu'il les exécute lui-même. Aussi, les tâches plus spécifiques n'ont pas intrinsèquement besoin que les tâches plus complexes soient réalisées de façon automatique, pourvu que le conducteur *humain* puisse les assurer.

De ce fait, nous proposons les trois niveaux suivants d'implémentation, présentés déjà sur la section I.1.4, et qui se veulent pertinents vis-à-vis de l'état de l'art et d'une logique de développement industriel. Cette logique devrait simplifier aussi l'acceptation par le conducteurs du niveau croissant de délégation de conduite. Même si nous les appliquons

¹⁹. La notion d'*agrément viscéral de conduite* est expliquée sur la section II.1.5.

dans le cadre de l'écoconduite, ces niveaux peuvent s'appliquer à la conduite autonome en général. Nous considérons, par ailleurs, que la capacité à maintenir une vitesse constante est déjà un acquis technologique, compte tenu de la démocratisation du *régulateur de vitesse* ; on peut le considérer le premier pas dans cette logique d'implémentation.

1. **Éco-manœuvres** : la conduite impose de réagir à des situations et des évènements qui, en général, ne sont pas connus d'avance. En effet, l'infrastructure et le trafic contraignent constamment le conducteur à faire varier sa vitesse. Ainsi, il est incontournable pour un SAC de pouvoir réaliser des manœuvres de conduite, en prenant en compte les différentes contraintes dues au contexte de roulage. Il doit aussi répondre aux attentes de l'utilisateur en termes d'agrément de conduite. Différents types d'*éco-manœuvres* peuvent avoir un impact différent sur la dynamique du véhicule ; ils peuvent jouer sur la dynamique longitudinale du véhicule, sur la dynamique latérale, ou sur les deux. Les éco-manœuvres peuvent aussi être associées à des situations de conduite différentes (p.ex. un arrêt devant un feu, un changement de vitesse limite, un dépassement. . .).
2. **Éco-segments** : une fois que l'on saura exécuter correctement un nombre suffisant d'éco-manœuvres, on pourrait les intégrer de manière cohérente, afin de pouvoir parcourir des segments complets du parcours. Ces segments peuvent être définis selon l'environnement routier dans lequel on évolue, et pourraient être délimités, entre autres, par des croisements des voies, par la position des feux et par des changements de vitesses et de pente [56, 55, 194, 197]. On pourrait envisager, dans un premier temps, de se concentrer sur des fonctions d'éco-segments qui agiraient dans des contextes plus simples, comme le roulage sur autoroute, pour ensuite s'intéresser à des situations plus complexes.
3. **Éco-itinéraires** : une fois qu'on aura des éco-segments répondant à la diversité de situations de conduite auxquelles on pourrait être confronté, la dernière étape consiste à les assembler pour construire des itinéraires à faible consommation, respectueux des objectifs et des motivations des conducteurs.

Un gros avantage de cette séquence de conception, combinée à une architecture inspirée de la cognition humaine, est la possibilité de réutiliser des opérateurs (c'est-à-dire, des fonctions préalablement conçues), pour répondre à des nouveaux besoins. Cela permet de réduire les coûts et les durées de conception. Cette logique semble être plus ou moins présente dans les feuilles de route des constructeurs automobiles, avec l'introduction progressive des fonctions d'aide à la conduite. Par contre, elle semble être un peu moins présente dans les travaux académiques, quoi qu'il y ait des exceptions.

Un autre atout de l'approche est le fait que chaque opérateur tient compte des contraintes du problème auquel il doit répondre, ce qui éviterait aux fonctions plus complexes de devoir s'en occuper. Cela est inspiré du phénomène de procéduralisation humaine et, pour que ça puisse marcher, cette logique devrait être *explicitement* considérée dans l'architecture fonctionnelle des algorithmes à concevoir.

En ce qui concerne l'état de la recherche, un grand nombre de travaux se focalisent sur la solution d'éco-itinéraires, en se basant souvent sur des cycles de conduite qui seraient représentatifs du comportement global du conducteur (des exemples sont [125, 126, 135, 137, 136]). D'autres traitent les éco-segments, en se basant souvent sur des informations issues de la navigation, (par exemple, [56, 55, 194, 197]). Ces approches ne considèrent pas *explicitement* les contraintes dues au trafic, et les informations que l'on pourrait obtenir à partir de capteurs qui sont disponibles sur le marché²⁰. Aussi, souvent, les algorithmes proposés peuvent être gourmands en coût de calcul, ce qui leur empêche de pouvoir s'adapter en temps-réel aux changements dans le scénario de conduite dus, par exemple, au trafic. Aussi, les formulations utilisées ne permettent souvent pas de considérer l'intégralité des contraintes sécuritaires et d'agrément de conduite.

Certaines études s'intéressent aux éco-manœuvres comme, par exemple, [144, 145, 184]. Il nous semble, cependant, que ce sujet mérite un traitement plus conséquent. Cela est d'autant plus vrai que, pour pouvoir implémenter des éco-segments et des éco-itinéraires, on doit être capable réaliser des éco-manœuvres, avec prise en compte de *toutes* les contraintes dues au trafic et à l'infrastructures, ainsi que de celles imposées par l'agrément de conduite. Pour pouvoir être appliqué à des situations réelles, les algorithmes d'éco-manœuvres doivent, en plus, pouvoir s'adapter en permanence aux changements dans la situation de conduite, tout en respectant un minimum de continuité dans les actions du véhicule, pour éviter de déranger le conducteur.

Ainsi, dans le cadre de cette thèse, nous focaliserons nos efforts sur l'étude des éco-manœuvres de conduite, avec prise en compte des contraintes d'infrastructure et de trafic, ainsi que des contraintes d'agrément de conduite. De plus, nous considérerons, lors de la conception de l'algorithme, les principes cognitifs présentés sur ce chapitre, afin de renforcer l'efficacité et la bonne modularité, lui donnant le potentiel d'être réutilisé par d'autres fonctions. La facilité de calibration est un autre aspect que nous devons prendre en considération.

L'ensemble de l'exposé se focalisera sur les VE. Cependant, les principes proposés peuvent être adaptés pour leur application sur d'autres type de GMP.

* * *

La suite de cette discussion sera organisée de la manière suivante :

- La **Partie II** s'intéresse à l'ergonomie de conduite. Pour cela, nous présenterons, sur le **Chapitre II.1**, quelques résultats et concepts issus de l'état de l'art en *Physiologie* et en *Ergonomie automobile*, afin de déterminer des critères d'agrément de conduite ; ensuite, sur le **Chapitre II.2**, nous proposerons une modélisation du conducteur permettant de tenir compte des aspects ergonomiques. Finalement, dans le **Chapitre II.3** nous confronterons nos hypothèses au comportement du conducteur en situation

²⁰ Mensing et al. (2013) est clairement une exception [137]. Par contre, les auteurs cherchent à déterminer le potentiel de l'écoconduite en considérant les contraintes dues au trafic, plutôt qu'à proposer un algorithme embarquable. Sciarretta et Vahidi (2020) proposent aussi un algorithme dans ce sens, embarquable cette fois-ci [195].

- réelle ; pour ce faire, nous proposerons une méthodologie pour l'analyse d'enregistrements de roulages réels.
- La **Partie III** est consacrée à la modélisation énergétique du véhicule et des manœuvres de conduite, ainsi qu'à l'analyse du potentiel et les source de gains d'énergie de l'écoconduite. Le **Chapitre III.1** présentera les modèles énergétiques utilisés, ainsi qu'une méthodologie permettant de générer une représentation graphique simplifiée des manœuvres de conduite ; celle-ci devrait aider à l'analyse des situations de roulage. Finalement, le **Chapitre III.2** s'intéresse au potentiel de gain de l'écoconduite, ainsi qu'à leur origine.
 - La **Partie IV** propose un algorithme pour la réalisation d'éco-manœuvres de conduite, avec prise en compte des critères d'agrément. Le **Chapitre IV.1** présente la structure globale de l'algorithme, basée sur des principes cognitifs présentés sur ce chapitre, ainsi que sa formulation dans le langage de l'*Automatique*. Le **Chapitre IV.2** s'intéresse à l'optimisation des manœuvres de conduite, avec prise en compte des critères d'agrément. Le **Chapitre IV.3** traitera l'adaptation des consignes cinématiques aux évolutions du contexte de roulage et présentera une stratégie de commande permettant de générer des consignes pour les actionneurs du véhicule, respectueuses de l'agrément de conduite.
 - Pour clore cet exposé, la **Partie V** sera dédiée à la discussion, et a donner des conclusions et des perspectives.

II

Modélisation ergonomique du conducteur et des manœuvres

INTRODUCTION

D'après une enquête réalisée en 2017 par Ipsos et The Boston Consulting Group (BCG), les Européens passent en moyenne, de lundi à vendredi, 9h35 à se déplacer, tous moyens de transport confondus [215]. Ce temps étant non-négligeable, l'expérience vécue par ceux qui utilisent les transports routiers est de grande importance pour leur bien-être, que ce soit des conducteurs ou des passagers. Si un utilisateur subit une expérience désagréable, et a la possibilité de faire quelque chose pour y mettre fin, il est fort probable qu'il le fasse.

La problématique que nous voulons étudier, celle de la conduite écologique, nous impose donc de considérer ce que les gens sont prêts à accepter en termes de comportement de leur véhicule. Si jamais nous proposons à l'utilisateur une fonction qui vienne à l'encontre de ce qu'il recherche en termes d'agrément de conduite, sa réponse naturelle sera de l'éteindre. Cela veut dire que, pour obtenir une fonction pouvant avoir un impact réel sur la consommation, la question de l'acceptabilité par le conducteur doit être au centre de notre réflexion.

Lors des études sur l'*Optimisation énergétique automobile* et, en particulier, de celles portant sur l'optimisation de l'écoconduite, l'agrément de conduite est souvent relayé au second plan. Même s'il existe des études dans lesquelles il est considéré de manière explicite (cf. [117, 121, 122, 176], par exemple), cela reste plus l'exception que la règle.

Il y a pourtant, provenant d'autres domaines de la recherche, des études fort intéressantes concernant le ressenti et les habitudes des conducteurs. Des publications issues des revues de *Psychologie cognitive*, d'*Ergonomie*, de *Physiologie*, pour ne citer que quelques champs d'études, s'avèrent d'un grand intérêt pour la compréhension et la caractérisation de l'agrément de conduite. Cependant, probablement à cause de la distance entre les différents domaines de recherche, ne serait-ce qu'en termes de langage et de champs d'intérêt, ces informations ne semblent pas à la portée de la communauté de recherche en Optimisation énergétique automobile. Il nous semble donc pertinent de présenter une synthèse des informations, issues de domaines différents, ayant enrichi nos réflexions.

Ainsi, ce chapitre fait un exposé sur certains acquis de différents champs de la recherche ayant des répercussions sur l'agrément de conduite, ainsi que des implications et des applications pour l'optimisation et la commande longitudinale (et potentiellement latérale) d'une automobile. Nous présenterons aussi, au fur et à mesure de l'exposé, des interprétations de ces résultats, ainsi que des hypothèses, apportant un éclairage sur la question de l'agrément de conduite. La section I.1.6 a présenté comment s'inspirer des principes cognitifs du conducteur pour la conception de fonctions d'aide à la conduite. Le Chapitre II.1 s'intéresse à l'étude de la physiologie humaine et de l'ergonomie industrielle

pour définir des orientations pour la définition de contraintes d'agrément. Sur le Chapitre II.2 nous proposons une modélisation de la conduite permettant de tenir compte des informations présentées. Finalement, sur le Chapitre II.3 nous proposons une méthodologie pour l'analyse de roulages en situation réelle, que nous avons appliquée pour caractériser l'agrément de conduite et pour supporter certaines des hypothèses présentées dans les sections précédentes.

Le modèle que nous proposerons, comme tous les modèles, présente des avantages et des limitations, dont nous en parlerons un peu plus tard. Il nous semble, toutefois, que notre approche permet de tenir compte des spécificités de la conduite automobile, tout en étant utilisables pour des applications industrielles et, en particulier, pour la conception de fonctions de commande.

DE LA PHYSIOLOGIE À L'ERGONOMIE :

DÉFINITION DE CONTRAINTES

D'AGRÉMENT DE CONDUITE

1

Objectif du chapitre

Mieux comprendre pourquoi certaines manœuvres de conduite sont agréables, et d'autres non

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Etat de l'art en Physiologie et Ergonomie, associé à la perception du mouvement*
- *Conclusions et hypothèses pour la détermination des critères d'agrément de conduite*

En nous intéressant à ce qui rend une certaine expérience, un certain stimulus, agréable ou désagréable pour un être-humain, nous devons considérer comment son corps fonctionne c'est-à-dire, tenir compte de ce qui se passe dans son organisme lorsqu'il subit ledit stimulus.

Cette affirmation, loin d'être une évidence, est relativement récente dans la recherche médicale. Elle est associée à une doctrine de pensée née en Allemagne au milieu du XIX^e siècle, nommée *naturalisme*. Le naturalisme est surgi en réponse à une autre école de pensée, appelée *vitalisme*, proposant que la vie dans les organismes vivants est occasionnée par un principe vital, distinct de tous les autres principes physiques et chimiques ; l'étude du vivant devrait donc se faire de manière indépendante de l'étude des autres systèmes matériels. Le naturalisme, par opposition, assume que les interactions des organismes vivants sont animés *uniquement* par des forces physiques et chimiques ; tous les phénomènes naturels seraient donc explicables en termes d'interactions physiques [229].

S'il est possible ou pas d'expliquer toute la complexité de la vie à partir d'interactions physiques uniquement, cela reste une question ouverte. Pour considérer cette question,

il faudrait aller voir quelque part à la frontière entre les sciences, la philosophie et la spiritualité. Cela sort du cadre de cette étude. Cependant, l'évidence des deux derniers siècles montre que les phénomènes physiques à l'intérieur des organismes vivants ont un rôle indéniable pour comprendre leur fonctionnement et nous allons donc nous y intéresser.

Pour étudier la conduite, il faut considérer comment l'humain perçoit le mouvement. Au niveau sensoriel, il y a diverses informations permettant à un individu de savoir qu'il est en train de se déplacer. D'une part, lorsque nous nous déplaçons, nos yeux nous font percevoir que des objets autour de nous bougent, soit vers nous, soit en s'éloignant de nous ; cela nous indique l'intensité et la direction de notre propre déplacement. Aussi, nous pouvons avoir une idée de notre propre mouvement grâce à nos oreilles ; nous savons que le bruit que l'on entend dans un véhicule ne sera pas le même si l'on est en ville ou si l'on est sur autoroute.

La relation entre le mouvement et les stimuli visuels et sonores est assez intuitive. Cependant, lorsqu'on est en voiture, si l'on ferme les yeux et qu'on se bouche les oreilles, on peut encore percevoir son propre mouvement. Cela est montré sur [71], où des sujets ont subi des profils d'accélération différents, sous une totale obscurité et en présence de bruit sonore blanc (pour éviter que les sujets puissent utiliser l'ouïe pour détecter leur mouvement). Ils ont pu identifier dans quelle direction ils se déplaçaient. Cela met en évidence l'existence d'un autre sens que la vision ou l'ouïe, associé au ressenti du mouvement propre. En effet, notre organisme a une « Fonction Vestibulaire (FV), » nous rendant capables de percevoir notre propre mouvement, ainsi que le champ gravitationnel de l'endroit où nous nous trouvons.

Cette section s'intéresse à la FV, ainsi qu'à l'importance de sa considération lors de la conception de Systèmes d'Aide à la Conduite (SAC).

1.1 PERCEPTION DU MOUVEMENT : LE SYSTÈME VESTIBULAIRE

Objectif de la section

Comprendre comment un conducteur perçoit son propre mouvement

La FV est principalement associée au Système Vestibulaire (SV), localisé dans l'oreille interne [76]. Cependant, des expériences réalisées sur des patients ayant une perte de leur fonction vestibulaire, montrent que des informations autres que celles provenant du SV contribueraient aussi à la FV.

Nous pouvons citer, par exemple, les travaux présentés sur [71], où les mêmes expériences ont été réalisées sur des sujets sains et sur de sujets avec déficiences vestibulaires. L'étude montre que, même si des sujets avec perte vestibulaire avaient une sensibilité réduite par rapport aux sujets sains, ils étaient tout de même capables de détecter la direction de leur déplacement. De plus, lorsque le sujet ayant eu la moins bonne performance

pendant les tests s'est concentré sur la pression exercée sur son corps lors du déplacement, il a réussi à améliorer considérablement sa capacité à détecter la direction de son mouvement. Aussi, sur [128], des tests de conduite réalisés sur des personnes ayant une perte vestibulaire bilatérale (c'est-à-dire, dans les deux oreilles), n'ont pas montré des différences systématiques de coordination, d'acuité visuelle dynamique ou de performance de conduite, en comparaison avec des conducteurs sains d'âges similaires.

Ces études suggèrent que chez des personnes avec des dysfonctionnements du SV, la FV pourrait être assurée, par substitution sensorielle, à partir par exemple des informations visuelles, cutanées ou viscérales. Cependant, l'étude de Valko et al., en 2012 [222], montre une considérable réduction de sensibilité au mouvement chez des patients ayant une perte *totale* du SV (due à une ablation chirurgicale totale des deux oreilles internes). Lors de cette étude, les auteurs ont conclu que les « indices vestibulaires, » c'est-à-dire, les informations provenant du SV, sont prépondérantes lors de la détection du mouvement propre dans la pénombre. Cette conclusion est compatible avec la perte de sensibilité des sujets avec des déficiences bilatérales montrée en [71]. Le prépondérance du SV pour la perception du mouvement serait d'avantage vraie chez des personnes saines, et dont leurs autres sens seraient donc moins bien entraînés. En vue de ces informations, dans le cadre de cette thèse, lorsque nous étudierons la FV, l'accent sera mis sur le SV, en négligeant majoritairement l'apport des autres sens.

Cela dit, des études telles que celle de Hlavacka et al. (1996) montrent que la perception du propre mouvement chez l'humain, est le résultat de l'interaction entre le SV et la proprioception (la capacité à déterminer la position des différentes parties du corps, les unes par rapport aux autres) [91]. Ainsi, dans le cas de la conduite automobile, des facteurs tels que la position du conducteur dans le siège et la pression que sa ceinture exerce sur lui, peuvent altérer la perception du conducteur sur l'acceptabilité de certains événements, et donc sur l'agrément de conduite [95]. Dans la discussion à venir, cela ne sera pas traité de manière explicite, notre centre d'intérêt restant le SV. Cependant, lorsque nous nous intéresserons aux études sur l'ergonomie automobile, la question sera implicitement traitée dans la mesure où les sujets ont subi, en plus des stimuli vestibulaires, des sensations proprioceptives représentatives de la réalité.

* * *

Le SV est le système d'orientation des organismes vertébrés [76]. Chez l'humain, il est composé de cinq organes sensoriels situés dans chaque oreille interne (pour un total de dix organes, si l'on compte les deux oreilles), le rendant capable de mesurer, avec une bonne redondance, les accélérations linéaires et angulaires de la tête, dans les six degrés de liberté de mouvement dans l'espace. Le SV est localisé au labyrinthe de l'oreille interne, à proximité de la cochlée (associée au sens de l'ouïe), et il est relié au nerf cochléo-vestibulaire (ou nerf crânien VIII) [76, 108].

Fonctionnellement, le SV est constitué de deux sous-systèmes principaux : les canaux semi-circulaires, au nombre de trois (horizontal, antérieur et postérieur), associés aux rotations de la tête, et les Organes Otolithiques (OOs) (utricule et saccule) associés aux

mouvements linéaires (translations). La Figure 1.1 présente l'emplacement de ces deux sous-systèmes à l'intérieur du labyrinthe de l'oreille interne.

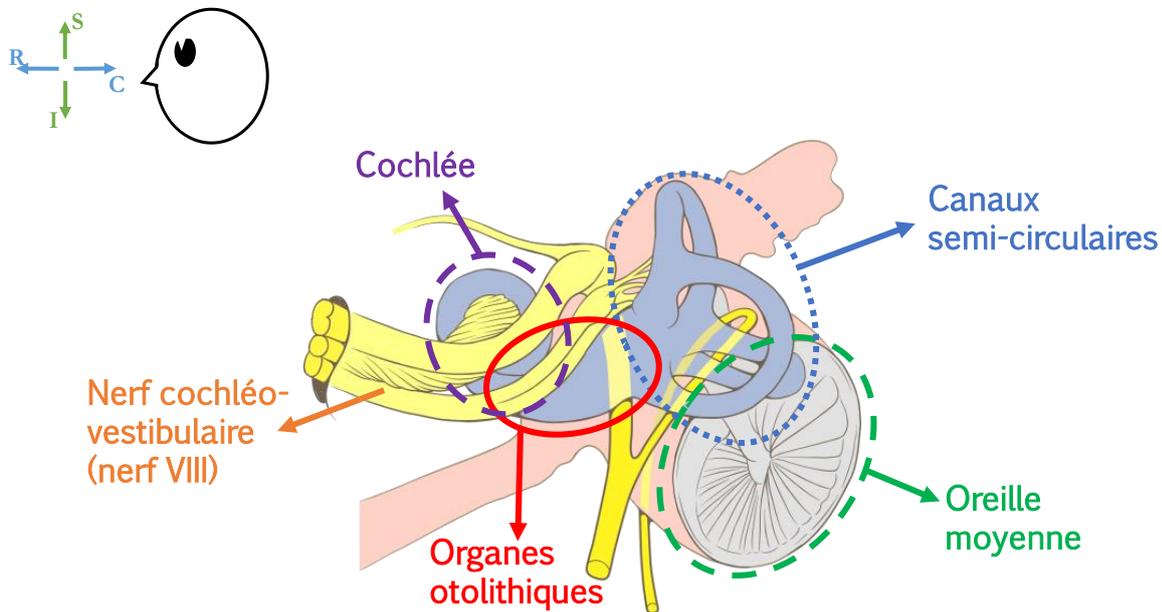


FIG. 1.1 – Anatomie interne de l'oreille¹. La figure en haut à gauche représente l'orientation de l'organe par rapport à la tête d'une personne ; les flèches indiquent les directions anatomiques associées : R : rostrale ; C : caudale ; S : supérieure ; I : inférieure.

Les canaux semi-circulaires sont des capteurs bio-mécaniques de forme grossièrement toroïdale [76, 99, 108]. Chaque canal peut être assimilé à un tuyau flexible, rempli d'un liquide nommé *endolymphe* ; les différents canaux étant reliés entre eux. Lorsque la tête subit une accélération angulaire, l'inertie de l'endolymphe le fait se déplacer à l'intérieur des canaux, ce mouvement se traduisant par une force qui excite des cellules sensorielles.

Chaque canal semi-circulaire est particulièrement sensible aux rotations sur son plan d'orientation [76]. En plus, les trois canaux sont orientés sur des plans grossièrement orthogonaux [99] et, grâce à leur configuration dans la tête, on peut se faire une représentation tri-dimensionnelle de l'accélération rotationnelle, en amplitude et en orientation [76, 99, 108].

Les structures du SV associées à la perception des mouvements linéaires, ou translationnels, sont les OO. Dans la plupart des vertébrés gnathostomes (ceux qui ont des mâchoires), on a trois types d'organes otolithiques de chaque côté : l'utricule, le saccule et le lagena [109, 199, 123], ce qui est assez intuitif si on considère que l'on peut se déplacer

1. Adapté à partir du travail de: Patrick J. Lynch; illustrator; C. Carl Jaffe; MD; cardiologist Yale University Center for Advanced Instructional Media Medical Illustrations by Patrick Lynch, generated for multimedia teaching projects by the Yale University School of Medicine, Center for Advanced Instructional Media, 1987-2000. Patrick J. Lynch, <http://patricklynch.net>

Cette œuvre est mise à disposition sous licence Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions 2.5 Générique. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/> ou écrivez à Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

en trois dimensions dans l'espace. Il est cependant remarquable que, parmi les vertébrés gnathostomes, il existe une classe d'organismes ne possédant que deux OO: nous, les mammifères!² Pourtant, les mammifères avons bien la capacité de percevoir le mouvement en trois dimensions. Postérieurement, nous en discuterons comment est-ce possible car cela a probablement d'importantes implications concernant l'agrément de conduite.

Chaque OO est constitué par une pièce de forme plus ou moins elliptique, nommée *macula*, laquelle est recouverte par une membrane gélatineuse qui se nomme *Membrane Otolithique (MO)* [76, 108, 123, 166, 226]. Dans la partie supérieure de cette membrane, on trouve des petites particules (entre $0,5 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$) de carbonate de calcium que l'on appelle *otolithes* (ou *otoconies*) et que l'on peut assimiler à des petits cailloux. Noyées dans la membrane, nous trouvons des touffes de cils (des petits poils) des cellules sensorielles. Lesdites cellules sensorielles sont solidaires à la base de la macula. Chaque cellule sensorielle a deux types de cils : l'unique cil à l'extrême de la cellule se nomme *kinocil* et tous les autres cils d'une cellule sont appelés *stéréocils*. La macula baigne dans de l'endolymphe. La Figure 1.2 illustre la structure d'un OO.

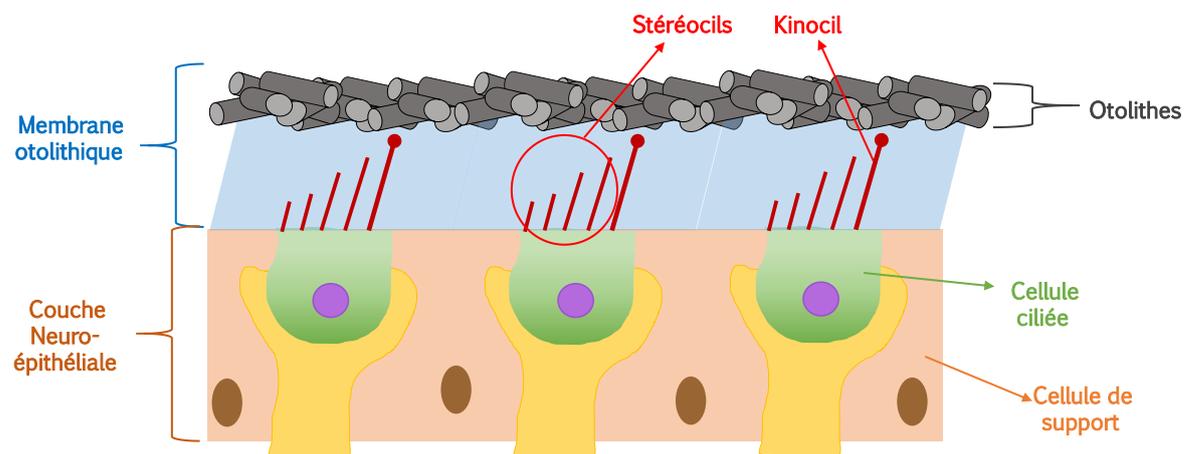


FIG. 1.2 – Anatomie des organes otolithiques (OO) [154, 76, 108, 123, 166, 226]

Lorsqu'on subit une accélération dans l'axe de sensibilité d'une certaine cellule ciliée, les otolithes (les petits cailloux), qui présentent une inertie relativement conséquente, ont une tendance à rester sur place, alors que la base de la macula se déplace. En ce faisant, les otolithes font déformer la MO, produisant une inclinaison des cils sensoriels. Cette inclinaison est traduite par les cellules sensorielles sous forme de signaux électriques envoyés sur le nerf crânial VIII, ce qui permet au cerveau d'interpréter une accélération [76]. Le signal varie selon que les stéréocils s'inclinent vers le kinocil ou en s'éloignant de lui, ce qui permet à l'organisme de distinguer des accélérations positives et négatives.

De par leur configuration physique, les OOs ne sont pas sensibles à des mouvements à vitesses constantes. En effet, lorsque la tête subit une accélération linéaire, il y a un effort tranchant au niveau de la MO qui tend à remettre en place les otolithes et donc

2. Il existe une exception à cette affirmation : en effet, les monotrèmes (ordre animal auquel appartient l'ornithorynque) s'orienteraient à l'aide de lagenas [109]

les cils sensoriels. Lors d'une accélération constante, l'équilibre devrait être atteint à une certaine inclinaison, ce qui produira un stimulus sur les cellules sensorielles concernées (Figure 1.3). En revanche, si l'accélération est nulle, l'effort tranchant dans la MO finira par remettre en place les otolithes et les cils seront donc droits, ce qui se traduit par le fait que les cellules ciliées ne seront pas stimulées.

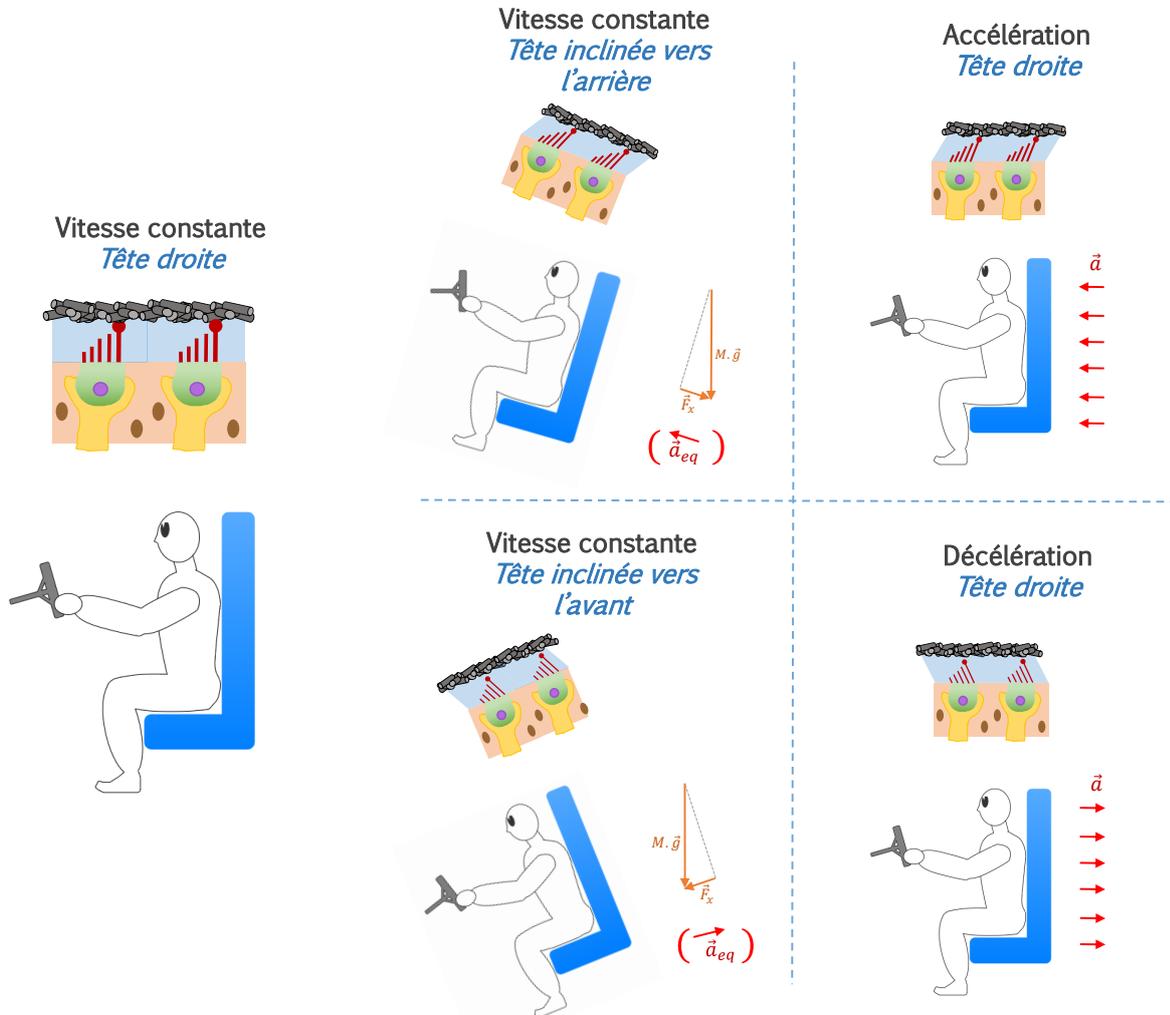


FIG. 1.3 – Mécanismes d'activation du système vestibulaire, en particulier de l'utricle. Inspiré de [76, 172]

Ainsi, la vitesse du véhicule n'est pas la principale responsable de la réponse sensorielle du système vestibulaire. De ce fait, lorsqu'on s'intéresse à l'agrément de conduite, on se doit de considérer l'accélération du véhicule, plus représentative du fonctionnement des organes otolithiques et donc du ressenti du conducteur. Donc, si l'on souhaite concevoir un SAC pertinent de point de vue ergonomique on doit s'intéresser au profil d'accélération du véhicule, plutôt qu'à celui de vitesse. Toutefois, comme un conducteur reçoit aussi des stimuli visuels et auditifs lui permettant de repérer sa vitesse, celle-ci joue un rôle assez important dans le fait qu'un conducteur qualifie une manœuvre d'agréable ou désagréable.

Une autre caractéristique des OO est le fait que des stimuli de nature *différente* peuvent

générer une réponse similaire. Notamment, lorsque la tête est inclinée, la pesanteur exerce une force sur les otolithes produisant une inclinaison des cils, ce qui donnera lieu à une réponse du SV (Figure 1.3). De plus, lorsqu'on accélère alors que la tête est inclinée, la réponse du SV est différente de celle qu'aurait eue lieu avec uniquement l'accélération. En conséquence, l'inclinaison de la route peut altérer la perception de l'agrément de conduite associée à une manœuvre.

Afin de pouvoir tenir compte de ces phénomènes, et d'autres particularités de la perception humaine, lors de la conception d'un SAC, il nous semble utile de considérer avec un peu plus de précision la physique derrière le fonctionnement des OO. Cela sera fait dans la section suivante.

1.2 MÉCANISMES D'EXCITATION DES ORGANES OTOLITHIQUES

Objectif de la section

Comprendre les mécanismes physiologiques associés au ressenti du mouvement

Le SV traduit des informations mécaniques associées au mouvement de l'individu en des signaux exploitables par le Système Nerveux Central (SNC), les OO étant les principaux contributeurs en ce qui concerne les translations. Ce processus, nommé *transduction*, se fait en trois étapes, illustrées par la Figure 1.4 :

- 1 Excitation mécanique des touffes des cils et polarisation des cellules sensorielles
- 2 Excitation des neurones afférents
- 3 Intégration des informations dans le noyau vestibulaire

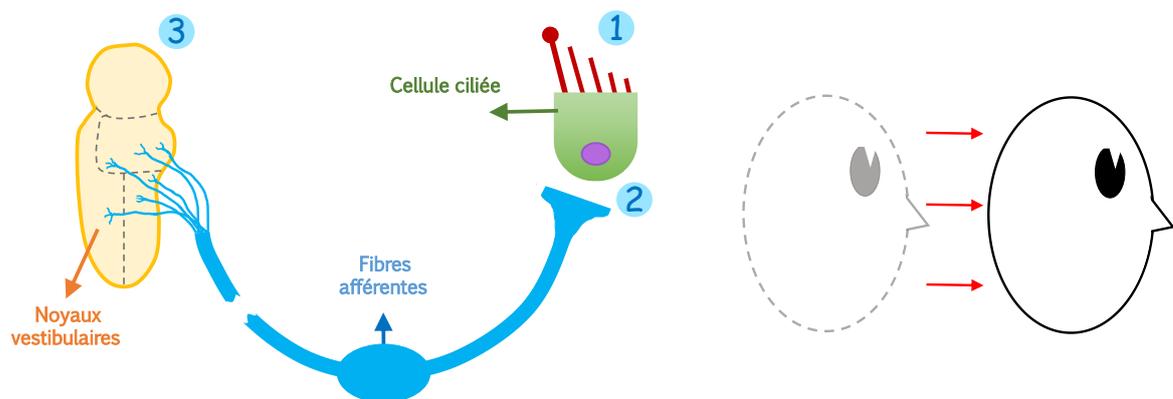


FIG. 1.4 – Étapes de transduction d'un signal vestibulaire. 1) Excitation mécanique des cils sensoriels ; 2) Excitation des neurones afférents ; 3) Intégration des informations dans les noyaux vestibulaires. Inspiré de [76]

Ci-après, nous présenterons brièvement comment chacune de ces étapes a lieu, ce qui permettra par la suite d'analyser les implications sur l'agrément de conduite, et de préparer le terrain pour une modélisation de la conduite représentative de la perception du conducteur.

1.2.1 Excitation mécanique des organes otolithiques et polarisation des cellules sensorielles

Tel que nous l'avons dit précédemment, la première étape de la transduction du mouvement de la tête en des signaux exploitables par le SNC est de nature mécanique, et elle consiste en la flexion des cils sensoriels lorsque la tête subit une accélération. Pour mieux comprendre comment cela se produit, nous devons nous intéresser aux phénomènes mécaniques ayant lieu dans les OO.

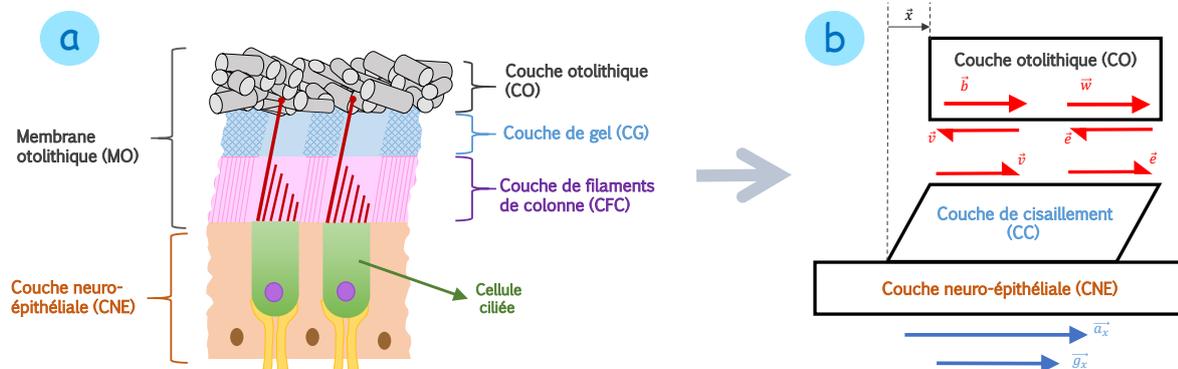


FIG. 1.5 – Composition mécanique et modélisation des organes otolithiques ; A) Différentes couches de la macula d'un OO [47, 78, 101]. B) Modélisation mécanique d'une macula otolithique [78].

Dorénavant, nous nous focaliserons sur l'utricule car c'est l'OO associé au mouvement sur le plan horizontal, et il est donc l'organe vestibulaire le plus important en ce qui concerne la conduite d'une automobile. Cependant, les informations données restent, pour la plupart, valables aussi pour le saccule.

Mécaniquement, la macula utriculaire est composée de plusieurs couches, avec des propriétés mécaniques différentes [47, 78, 101], qui sont représentées sur la Figure 1.5a. La base de la macula, nommée Couche Neuro-Epithéliale (CNE) sert de support à toutes les autres structures de l'OO. La CNE contient les corps cellulaires des cellules sensorielles ciliées. Elle est rigidement attachée à l'os temporal [78, 101, 166, 167], ce qui veut dire qu'elle subit à peu près les mêmes accélérations que la tête. Ensuite, reliée à la CNE, il y a la MO, qui est elle-même composée de trois couches³ [78] : la première, la Couche de Filaments de Colonne (CFC, *column filament layer*) est directement reliée à la CNE et contient les stéréocils ; comme son nom laisse deviner, elle est composée de filaments de gel de saccharide, et grâce à cela l'endolymphe (qui est liquide) peut la traverser et être en contact des stéréocils. La deuxième couche, située en-dessus de la CFC, est la Couche de Gel (CG, *gel layer*), composée du gel de saccharide solide. Finalement, supportée par la

CG, il y a la Couche Otolithique (CO, *otoconial layer*), qui contient les otolithes (les petits cailloux); ces derniers possèdent une densité, et donc une inertie, bien plus importantes que celle des autres couches de la MO [101].

Tout cet ensemble peut-être modélisé comme une masse, qui représente la CO, qui se déplace par rapport à la CNE, alors qu'une couche viscoélastique, représentant en même temps la CFC et la CG, tend à la remettre à sa place [78] (Figure 1.5b). Cette dernière est parfois appelée Couche de Cisaillement (CC, *shear layer*). En isolant la CO, on trouve quatre forces agissant sur celle-ci :

- **force hydrodynamique** (\vec{b}) : force due à l'interaction de la masse avec l'endolymphe. Elle inclue en même temps la poussée d'Archimède et la force due au mouvement de l'endolymphe⁴.
- **force de pesanteur** (\vec{w}) : composante du poids de la CO sur le plan de l'utricule.
- **effort tranchant visqueux** (\vec{v}) : force de cisaillement de nature visqueuse dans la CC ; elle tend à freiner la CO lorsqu'elle se meut.
- **effort tranchant élastique** (\vec{e}) : force de cisaillement de nature élastique dans la CC ; elle tend à remettre la CO à sa place.

En se plaçant sur un référentiel solidaire à la tête du conducteur, donc non-galiléen, la dynamique de l'utricule équivaut à un système masse-ressort-amortisseur dont le comportement est donné par (1.1), où x correspond au déplacement de la CO, relatif à la CNE ; m_{co} est la masse de la CO ; c_{cc} et k_{cc} sont respectivement les coefficients de frottement visqueux et élastique de la CC ; g_x est la composante de l'accélération de la pesanteur sur le plan de l'utricule ; a_x est l'accélération subie par la tête sur ce même plan et F_{co} est la force subie par la CO due à la pesanteur et à l'accélération. La valeur de F_{co} est directement proportionnelle à la différence entre a_x et g_x . Pour avoir plus de détails sur cette modélisation, le lecteur est invité à consulter [78].

$$m_{co} \frac{d^2x}{dt^2} (t) + c_{cc} \frac{dx}{dt} (t) + k_{cc} x (t) = F_{co} (a_x - g_x) \quad (1.1)$$

A ce stade, nous pouvons déjà en tirer quelques conclusions en relation avec le ressenti du conducteur :

- de par sa structure mécanique, l'utricule devrait filtrer les informations associées à l'accélération du conducteur, ce qui devrait permettre à son corps d'avoir une information pertinente sur la valeur de l'accélération, peu sensible aux fortes variations de l'accélération.

3. Il existe dans la littérature scientifique une certaine variabilité dans la nomenclature utilisée pour se référer à ces couches. Dans ce document, nous avons décidé d'utiliser la nomenclature donnée sur [78]

4. Dans le modèle présenté en [78], on considère uniquement la poussée d'Archimède dans la définition de \vec{b} ; cependant, nous considérons important de mentionner la composante de force due au mouvement du fluide car, tel qu'il sera présenté postérieurement, elle semble essentiel pour la perception de certains stimuli.

- du fait des efforts élastiques que la CC oppose au déplacement de la CO, lorsque l'accélération de la tête est nulle, et que l'on est sur du plat, il ne devrait pas avoir de déplacement relatif entre la CO et la CNE, ce qui confirme notre observation précédente sur le fait que la vitesse en ligne droite n'est pas perçue par le SV.
- la composante de l'accélération de la pesanteur agissant sur l'utricule exerce un effet de la même nature que celui dû à l'accélération de la tête. Cela est cohérent avec l'expérience de Clément et al. [34], où des astronautes, positionnés sur une plateforme tournante, ont subi des accélérations centrifuges, latérales et verticales⁵, et ont cru que leur corps était incliné. Cela montre l'étroite relation entre le ressenti dû à l'inclinaison et celui produit par une accélération linéaire. Cette information nous permet d'émettre l'hypothèse qu'il est possible de modéliser l'effet de l'inclinaison de la route sur l'agrément de conduite comme un terme analogue à une accélération qui viendrait s'ajouter à l'accélération longitudinale du véhicule.

* * *

Le déplacement des otolithes par rapport à la CNE produit la flexion des cils de certaines cellules sensorielles. Lorsque cela se produit, un processus de transduction mécano-électrique a lieu, grâce au déplacement d'ions de potassium (K^+) et / ou d'ions de calcium (Ca^{2+}) vers l'intérieur de la cellule, à travers de passages dans les cils sensoriels, dits canaux de transduction [26, 76]. Lorsque les stéréocils se penchent vers le kinocil, c'est-à-dire, si la touffe ciliaire bascule vers les cils les plus grands, les canaux de transduction s'ouvriront, permettant la circulation d'ions à l'intérieur de la cellule ; celle-ci sera excitée, ce qui fera qu'elle aura un potentiel électrique plus important. Si les stéréocils basculent dans la direction opposée du kinocil, vers les cils le plus petits, les canaux se refermeront et les espèces chimiques ne pourront plus rentrer, alors la cellule sensorielle sera inhibée et son potentiel électrique sera faible. Au repos, une partie des canaux reste ouverte, et la cellule garde un certain potentiel électrique, ce qui lui permet probablement de gagner en sensibilité et réactivité [72], ainsi que de pouvoir détecter des accélérations positives et négatives [26]. La Figure 1.6 illustre ces phénomènes.

Aussi, les touffes ciliaires ont un mécanisme d'adaptation qui leur permet de répondre à des stimulations mécaniques répétées et rapprochées dans le temps [26, 72]. Ce mécanisme consiste en la refermeture automatique de canaux de transduction après un certain temps. Cela est essentiel pour préparer la cellule à réagir à des nouvelles stimulations.

* * *

Précédemment, nous avons mentionné le fait que chez les mammifères il y a uniquement deux OO, le saccule et l'utricule ; malgré cela, nous sommes bien capables de distinguer des translations dans les trois dimensions de l'espace. Cela est possible grâce à la configuration des maculas des OO. Pour pouvoir expliquer le mécanisme en jeu, il nous faut d'abord signaler que les cellules sensorielles ont une direction de polarisation.

5. Quand nous disons accélérations latérale et verticale nous le faisons par rapport au référentiel du conducteur ; pour être plus rigoureux, on devrait considérer des directions anatomiques et plutôt parler d'accélérations *intra-aurale* et *crânio-caudale*

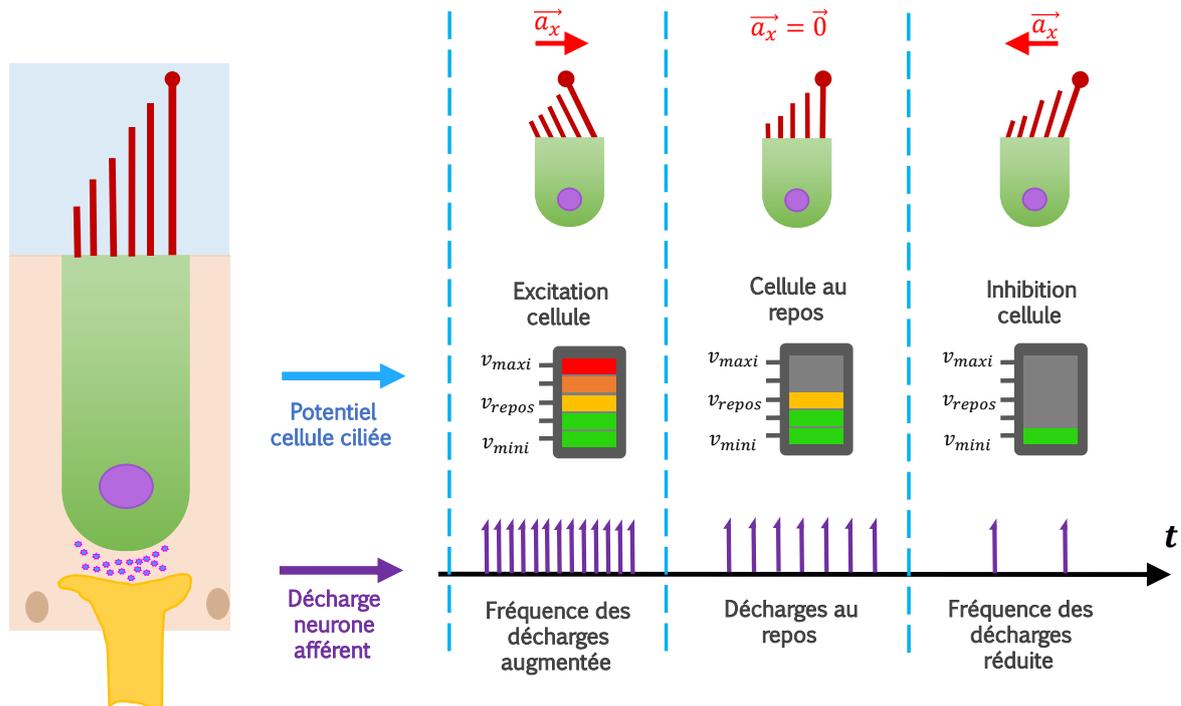


FIG. 1.6 – Transduction mécano-électrique dans les cellules ciliées ; polarisation des cellules et décharge vers les neurones afférents (Adapté de : [26, 76]).

En effet, si les touffes ciliaires basculent suivant l'orientation du kinocil, que se soit en se rapprochant ou en s'éloignant de lui, l'effet sur la polarisation de la cellule sera plus important que si elles s'inclinent dans une autre direction.

Contrairement à ce que les figures 1.3 - 1.6 pourraient faire croire, les cellules ciliées ne sont pas orientées de façon homogène sur la macula. Mais elles ne sont pas non plus orientées arbitrairement ; bien au contraire, l'axe de polarisation de chaque cellule ciliée est orienté par rapport à une zone centrale étroite, connue sous le nom de *striola* [57, 76] (Figure 1.7a).

La striola, qui ressemble à une ligne en forme de C, divise chaque macula en deux zones de surfaces similaires⁶ [46, 53], nommées Extrastriola Latérale (ESL, *Lateral extrastriola*) et Extrastriola Médiale (ESM, *Medial extrastriola*)⁷ [231]. Dans la macula utriculaire, les touffes ciliées sont orientées vers la striola⁸, ce qui veut dire que de chaque côté de celle-ci la polarisation est inversée [53, 226, 108]. Ainsi, lorsque l'individu subit une accélération, certaines cellules seront inhibés et d'autres seront excitées. Grâce à cela, on

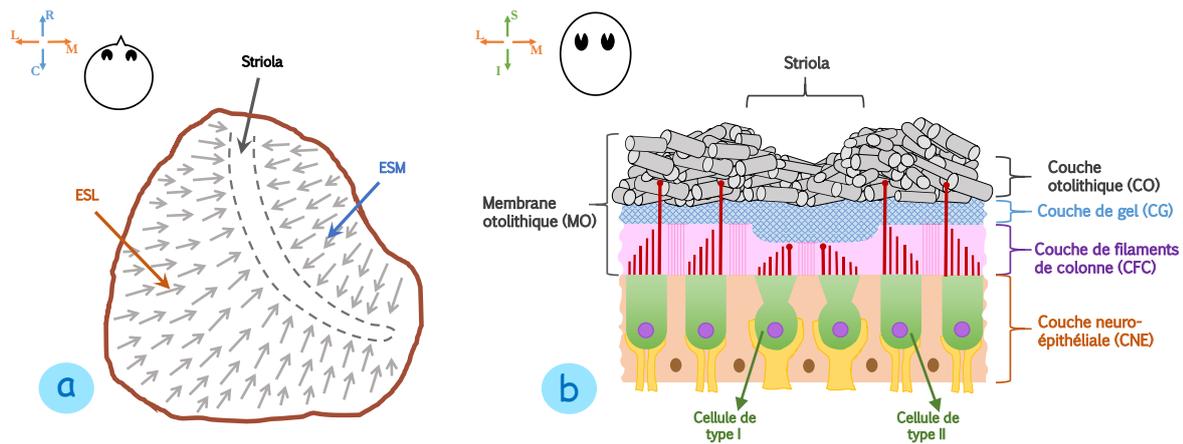


FIG. 1.7 – Structure de la macula utriculaire (Basé sur : [46, 47, 76, 100, 101, 165, 226]) ; (a) localisation de la striola sur la macula utriculaire, les flèches représentent les axes de polarisation des cellules sensorielles ; (b) anatomie de l'utricule au voisinage de la striola. ESL : Extra-striola latérale ; ESM : Extra-striola médiale.

aura une réponse physiologique différente selon que l'on soit en train d'accélérer ou de décélérer.

Lors d'une accélération vers l'avant, les cellules activées ne seront pas les mêmes que celles qui seraient activées si l'on accélérât latéralement. En fait, les cellules qui seront plus fortement excitées sont celles dont l'axe de polarisation est orienté vers le point de la striola dont la tangente est perpendiculaire à la direction d'accélération. De plus, étant donnée que la striola a une forme courbée, lorsqu'on se déplace dans n'importe quelle direction sur le plan d'orientation de l'utricule, certaines cellules seront excitées, et le mouvement pourra donc être ressenti. Cela est représenté sur la Figure 1.8. Le saccule présente un fonctionnement similaire, mais à la verticale. C'est ce mécanisme qui permet aux mammifères de percevoir leur mouvement dans les trois dimensions⁹.

Sur Xue et al. [231], on montre que, chez la tortue, les cellules sensorielles dans l'ESL et celles de l'ESM auraient de propriétés différentes¹⁰. Il est donc possible que ces animaux n'aient pas la même sensibilité aux accélérations et aux décélérations. Nous n'avons pas trouvé d'étude qui le prouve, mais il est possible que ce soit le cas aussi chez les mammifères.

6. les deux surfaces seraient similaires chez les mammifères ; cependant, cela ne semble pas être le cas chez tous les animaux. Par exemple, les images présentées sur [231] laissent penser que, chez la tortue, les deux sections extra-striolaires ont des surfaces assez différentes. Nous faisons l'hypothèse que, du fait que les reptiles possèdent trois OO différents, chacun de ses organes pourrait présenter un niveau de spécialisation plus important que chez les mammifères.

7. L'ESL est la zone qui est du côté de l'oreille et l'ESM est celle du côté du milieu de la tête.

8. Alors que dans la macula sacculaire les cellules sont orientées dans le sens inverse [53].

9. En fait, sur [57] on montre assez joliment que, sous certaines hypothèses, grâce à l'ensemble des quatre striolas de la tête, on aurait accès à une cartographie assez complète de tout le domaine d'accélération. Étonnamment, il y aurait tout de même un angle mort pour lequel les accélérations ne seraient pas ressenties !

10. Plus précisément, le ratio entre la hauteur du kinocil serait beaucoup plus important pour certaines cellules de l'ESL

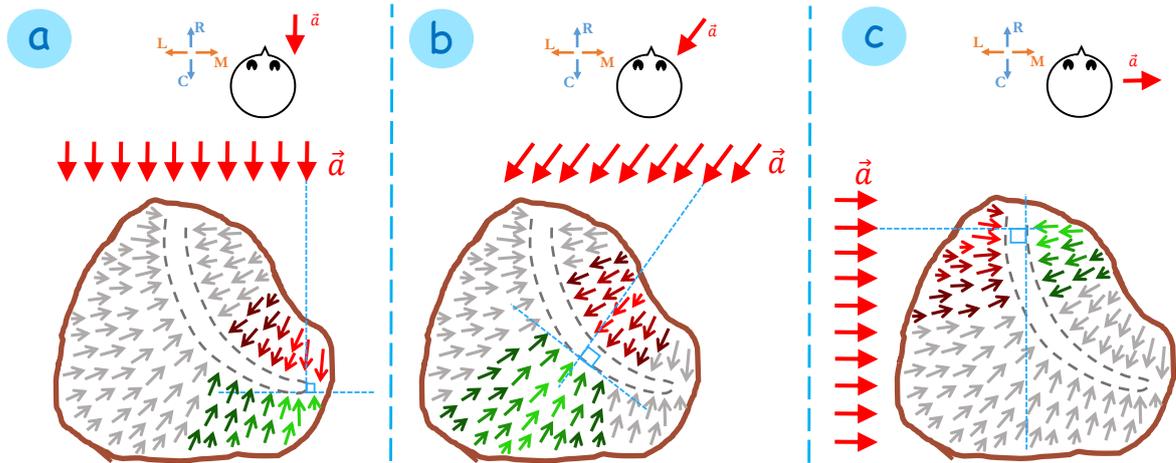


FIG. 1.8 – Polarisation directionnelle de la macula ; les flèches vertes correspondent aux cellules excitées, les rouges aux cellules inhibées et les grises aux cellules au repos. Les flèches les plus claires sont celles le plus fortement activées. (a) accélération longitudinale ; (b) accélération en biais ; (c) accélération latérale.

Concernant l'agrément de conduite, nous pouvons en tirer deux conclusions :

- le conducteur est capable de distinguer ses accélérations et ses décélérations. De plus, la sensibilité du conducteur pourrait varier entre les accélérations et les décélérations. Il y a deux arguments qui supporteraient cette hypothèse : d'une part, les zones de l'utricule des deux côtés de la striola n'ont pas la même géométrie ; aussi, les cellules sensorielles de chaque côté auraient potentiellement de propriétés, et donc de sensibilités, différentes.
- l'utricule est le principal organe responsable de la perception du mouvement sur le plan horizontal. Il est donc sensible en même temps aux accélérations longitudinales et latérales. Il est donc possible que, au moment de décider si une manœuvre respectera l'agrément de conduite ou pas, les accélérations dans les deux directions doivent être considérées simultanément.

* * *

Il existe deux types de cellules ciliées : les cellules de type I et celle de type II [108] (Figure 1.9). Les cellules de type I présentent une base arrondie, entourée d'une fibre nerveuse sensitive afférente en forme de calice. Les cellules de type II sont en forme de colonne, en contact avec une fibre nerveuse afférente en bouton. Il a été montré que les récepteurs otolithiques de type I répondent à des déplacements à 100 Hz (et probablement à des fréquences plus importantes) [44, 208], ce qui indique une haute sensibilité de ces dernières aux hautes fréquences.

Même s'il existe des cellules des types I et II sur toute la macula, la striola a une plus haute concentration de récepteurs de type I et les régions extra-striolaires ont principalement des cellules de type II [44, 45, 101, 167]. Les cellules extra-striolaires de type II auraient un plus long kinocil [231, 44] qui viendrait s'insérer sur la CO, et qui serait donc solidaire avec celle-ci. D'autre part, dans la striola, les touffes ciliées des récepteurs de

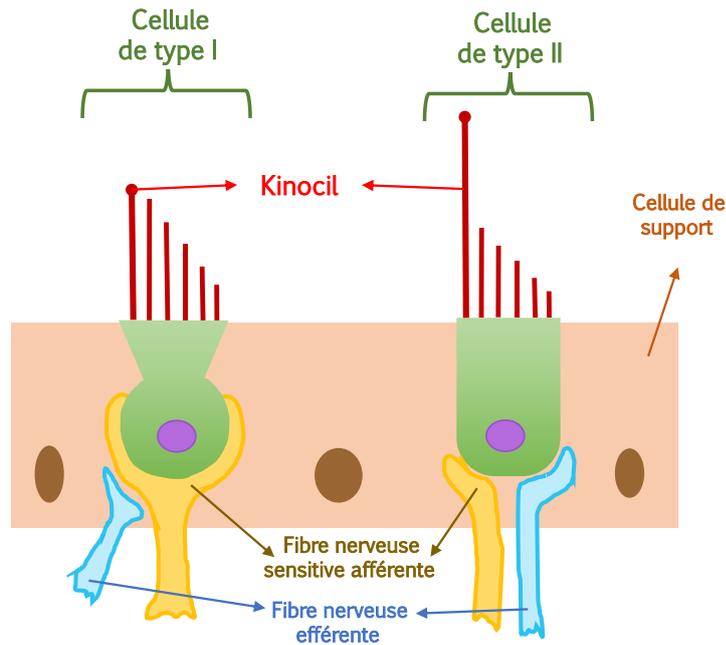


FIG. 1.9 – Types de cellules ciliées (Adapté de : [108, 138]).

type I seraient placées dans des cavités dans la MO, remplies d'endolymphe, sans être en contact avec la CO, et les cils seraient à peine solidaires entre-eux, voire pas du tout. Cela est montré sur la Figure 1.7b.

Grâce à cette configuration de l'utricule, les récepteurs en dehors de la striola subiraient les mouvements de la CO, ce qui leur permettrait de profiter de ses effets de filtre. De ce fait, ces récepteurs seraient moins sensibles aux stimuli de haute fréquence, ainsi qu'aux transitoires d'accélération.

D'autre part, il existerait un mécanisme d'excitation complètement différent pour les cellules sensorielles de la striola. Étant donné que les touffes sensorielles se trouvent dans des cavités à l'intérieur de la MO, elles ne subiraient pas les mêmes forces que celle-ci. Notamment, elles ne seraient pas soumises aux efforts tranchants visqueux et élastiques de la CC (\vec{v} et \vec{v} , sur la Figure 1.5). Cela voudrait dire qu'il seraient libres de bouger sous les effets de la force de pesanteur (\vec{w}) et encore plus des forces hydrodynamiques dues au mouvement de l'endolymphe (\vec{b}). En particulier, ce seraient des ondes de pression du fluide les principales responsables de l'excitation des cellules sensorielles de la striola¹¹ [43]. Étant donné que le liquide qui entoure les cils est beaucoup plus sensible aux variations sur l'accélération que la MO, on peut supposer que cela rend les cellules situées sur la striola beaucoup plus sensibles aux transitoires d'accélération. Cette hypothèse est défendue par différents chercheurs, comme par exemple sur [43, 45, 78, 231].

¹¹. Nous pensons que ces phénomènes pourraient être modélisés comme un objet qui subirait une poussée d'Archimède alors qu'il se trouve dans un champ gravitationnel variable dans le temps, dans la direction d'accélération du conducteur. Le champ de pesanteur correspondrait à l'accélération du conducteur et la variation du champ à l'à-coup (sa dérivée); l'objet correspondrait à un cil sensoriel. La variation du champ de pesanteur produirait un mouvement des particules de liquide qui, en tapant sur l'objet, lui transmettraient

Ainsi, Curthoys et al. (2017) proposent, concernant les mouvements translationnels, de distinguer deux types de systèmes vestibulaires : le SVS et le SVT [45]. Le SVS serait associé aux zones extra-striolaires de la macula et serait dédiée à la perception des stimuli vestibulaires stabilisés, tels que des accélérations constantes ou de basses fréquences et l'inclinaison de la tête. Le SVT serait associé la striola et s'occuperait de la perception des stimuli vestibulaires transitoires et de hautes fréquences, tels que des vibrations, des accélérations de haute fréquence, et l'à-coup (la dérivée de l'accélération). Il est important de signaler qu'en réalité il y a tout un spectre de régularité dans la sensibilité à l'intérieur des maculas ; mais toutefois, la distinction entre les parties stabilisée et transitoire (correspondant aux extrêmes de ce spectre) est convenable pour la compréhension et caractérisation du fonctionnement des OOs. Sur [45], on propose un certain nombre d'arguments pour justifier l'existence de ces deux systèmes dont quelques uns seront repris plus tard sur ce document.

Il semble que cette distinction entre le SVS et le SVT est une propriété générale, qui serait valable pour tous les organes du SV [45, 211].

Xue et al. (2006) proposent que les différences de hauteur des touffes ciliées des cellules striolaires et extra-striolaires influeraient, en plus, sur leur plage d'opération¹² [231]. Cela veut dire que des touffes ciliées hautes peuvent subir une plus grande déformation avant que la réponse de la cellule sature, en comparaison à des touffes plus petites. Étant donné que la hauteur des touffes ciliées extra-striolaires est plus importante, cela voudrait dire qu'elles ont des plages de fonctionnement plus conséquentes que celles associées à des cellules de la striola.

Étant donné que l'à-coup produirait donc une saturation plus rapide des cellules ciliées, par rapport à l'accélération, nous nous permettons de suggérer que cela expliquerait l'observation empirique (voir par exemple [18, 89]) que l'agrément de conduite est plus fortement influencée par l'à-coup que par l'accélération. En effet, lorsqu'on est dans une situation où l'on se déplace avec un fort à-coup et que, donc, tous les récepteurs sensibles à une certaine direction sont simultanément activés au maximum de leur capacité, le corps ne serait plus en mesure de savoir si l'à-coup continue d'augmenter ou pas. Cette situation non-souhaitable pour l'organisme pourrait déclencher une réponse physiologique de désagrément afin de conduire le sujet à rechercher un état d'équilibre (ou d'*homéostasie*).

Ainsi, nous pouvons en tirer deux conclusions par rapport à l'ergonomie automobile :

- Les conducteurs sont sensibles à l'accélération et à l'à-coup. Cette proposition est supportée par la configuration des OOs, qui permettrait à certains récepteurs spécia-

leur énergie cinétique, ce qui correspondrait à un effort supplémentaire subit par celui-ci. Il se peut que cette force soit reliée de façon explicite à la valeur de l'à-coup, ce qui montrerait que les OOs seraient capables de mesurer directement l'à-coup (et pas uniquement des accélérations à de très hautes fréquences).

Cela sort du domaine d'intérêt de cette thèse, ainsi que du domaine de compétences de son auteur. Cette modélisation ne sera donc pas traitée ici.

12. La plage d'opération est définie comme le déplacement du sommet de la cellule ciliée nécessaire pour produire 90% de la réponse de la cellule.

- lisés d'être activés par des accélérations stabilisés, et à d'autres récepteurs spécialisés d'être excités par des transitoires d'accélération et, potentiellement, par de l'à-coup.
- L'à-coup aurait une plus forte influence sur l'agrément de conduite que l'accélération. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les cellules sensorielles du SVT, qui sont sensibles à l'à-coup, auraient une plage d'opération réduite, et donc une plus forte prédisposition à saturer. Ainsi, lorsque le conducteur subit une valeur importante d'à-coup, beaucoup de ses cellules ciliées satureraient et cela lui produirait du désagrément.

1.2.2 Excitation de neurones afférents

Nous venons de voir qu'il y a des structures spécialisées associées à la perception des phases transitoires et stabilisées d'accélération, permettant de convertir les stimuli mécaniques des cellules ciliées en des potentiels électriques. Désormais, nous étudierons les mécanismes par lesquels ces informations sont communiquées au SNC pour pouvoir être exploitées. Cela alimentera une discussion sur les seuils de sensibilité aux variations de l'accélération et de l'à-coup lors de la conduite. Aussi, cela apportera des arguments supplémentaires à certaines des hypothèses faites précédemment.

Afin de récupérer les informations provenant des cellules ciliées, la base de chaque cellule est en contact avec un *neurone afférent primaire*. Un neurone afférent, ou neurone sensoriel, est chargé de conduire l'information provenant d'un organe sensoriel vers le SNC [98].

Le point de contact entre un neurone afférent et une cellule sensorielle se nomme « synapse afférente. » D'après leur morphologie, il existe trois types de synapses afférentes, ou terminaisons nerveuses, pour des cellules ciliées utriculaires [13, 45, 74], notamment :

- **afférent en calyce** : ce type d'afférent recouvre la base de la cellule sensorielle (comme sur la partie gauche de la Figure 1.9). Elles sont systématiquement connectées à des récepteurs de type I et peuvent être en contact avec une, deux, voire trois cellules ciliées.
- **afférent en bouton** : ce type d'afférent touche la cellule sensorielle sur une petite surface de sa base (comme sur la droite de la Figure 1.9). Elles sont systématiquement connectées à des récepteurs de type II et une même terminaison nerveuse peut être en contact avec entre quinze et une centaine de récepteurs sensoriels, sur une distance de 25 à 75 μm .
- **afférent dimorphique** : sur ce type d'afférent, il y a en même temps des terminaisons nerveuses en calice et en bouton. Elles possèdent entre une et quatre terminaisons en calice, en contact avec des cellules de type I, et entre une et cinquante terminaisons en bouton, connectées à des cellules de type II.

Fait remarquable, les afférents en bouton, qui sont peu nombreux, sont uniquement présents sur la périphérie de la zone extra-striolaire et les afférents en calice sont confinés

à la striola [74]. Cela semble indiquer que les signaux issus de ces deux types de terminaisons nerveuses pourraient avoir des fonctions particulières dans les tâches de perception, associées peut-être au SVS et au SVT, respectivement. En particulier, les afférents du SVT seraient plus sensibles aux stimuli. D'autre part, les afférents dimorphiques sont présents en même temps sur la striola et sur la zone extra-striolaire [74].

* * *

Une autre façon de classifier les afférents neuronaux est de considérer le type de signaux qu'ils envoient vers le SNC. Toutefois, avant d'expliquer cette distinction, il est nécessaire de présenter l'origine et la nature de ces signaux.

Le transfert de l'information issue des récepteurs sensoriels se fait grâce au transfert de glutamate de la cellule ciliée vers la terminaison nerveuse du neurone afférent [26]. Ce phénomène se traduit par une décharge au niveau de la terminaison nerveuse. Si la cellule ciliée n'est pas stimulée, l'afférent reçoit tout de même des impulsions à une fréquence dite *de repos*. Lorsque la cellule sensorielle est excitée, et que le potentiel de la cellule augmente, la fréquence des décharges augmente elle-aussi; de même, la fréquence des décharges diminue lorsque la cellule est inhibée [26, 76]. Cela est illustré sur la Figure 1.6. En général, pour caractériser la réponse d'un afférent on considère le *taux de décharge*, qui correspond au nombre d'impulsions par seconde au niveau de la terminaison nerveuse.

Lors d'une accélération de la tête, certaines terminaisons nerveuses recevraient donc des décharges plus fréquemment, et d'autres en recevraient avec une fréquence réduite. Ainsi, si le taux de décharge d'un certain afférent est supérieur à celui au repos, on sait que la cellule est excitée; de même, lorsque le taux est inférieur, on sait que la cellule est inhibée. Grâce à ce mécanisme, et à la configuration de la macula (permettant l'activation des cellules), le SNC peut déterminer l'amplitude et la direction du mouvement.

Les afférents peuvent être classifiés en fonction de la régularité des décharges qu'ils subissent lors que le stimulus ne varie pas. En effet, sur certaines terminaisons nerveuses les décharges ont lieu d'une façon assez régulière, alors que sur d'autres le taux de décharge varie fortement [74, 76]. On nomme *neurones réguliers* et *neurones irréguliers* ceux qui ont des décharges respectivement régulières et irrégulières [45]. Ces catégories sont utiles, mais il ne faut pas imaginer que le taux de décharge soit parfaitement régulier pour certaines neurones afférents, et parfaitement irrégulier pour d'autres; en réalité, les décharges peuvent être plus ou moins régulières, et certaines neurones correspondraient mieux aux *afférents réguliers*, et d'autres aux *irréguliers*. La Figure 1.10 représente de manière schématisée les réponses des neurones réguliers et irréguliers à des entrées de valeur constante. Notez bien que sur la figure l'intervalle moyen entre les impulsions est le même, la différence étant sur la dispersion dans les intervalles. Pour observer des signaux réels, le lecteur est invité à consulter, par exemple, [75, 74].

Il est fort intéressant de constater que les neurones réguliers sont majoritairement localisés sur les régions extra-striolaires, alors que les neurones irréguliers sont principalement confinés à la striola [45, 74]. Cela renforce l'idée de l'existence des deux types de système vestibulaire: les neurones réguliers, qui seraient associés au SVS, seraient spécialisés dans

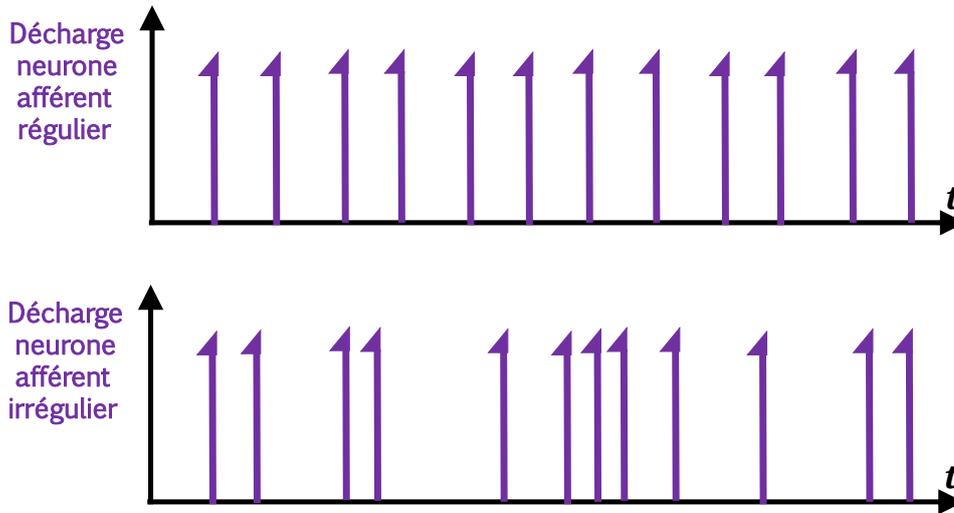


FIG. 1.10 – Représentation des signaux générés par les afférents réguliers et irréguliers, lors de l'application d'entrées de valeur constante

la perception des phases stabilisées d'accélération, alors que les neurones irréguliers, associés au SVT, se chargeraient de la perception des phases transitoires et des composantes de haute fréquences des accélérations [45]. En vue de cela, par la suite nous interpréterons ce que les résultats de certaines études et publications en physiologie peuvent nous apprendre sur l'agrément de conduite.

Premièrement, Fernandez et Goldberg ont étudié la réponse des afférents réguliers et irréguliers des OO lorsqu'on applique un trapèze de force centrifuge (assimilable à une accélération) sur un singe écureuil [64]. Ils ont constaté que, lors de l'application du stimuli, le taux de décharge de certains neurones réguliers reste relativement constant, et celui d'autres neurones réguliers présente un phénomène d'adaptation modéré ; en effet, au début il y a un pic dans la réponse, qui décroît progressivement. D'autre part, sur la réponse des neurones irréguliers on trouve un pic dans la valeur du taux de décharge qui dure quelques instants ; il est suivi d'un phénomène d'adaptation retardé mais plus intense. La Figure 1.11 montre de façon schématique une représentation moyennée des résultats de cette étude. Pour plus de détails, le lecteur est invité se référer directement à la source.

En regardant la Figure 1.11, on peut faire plusieurs constats : d'une part, on voit qu'il y a une différence assez marquée dans les réponses des deux types d'afférents, ce qui fait penser qu'ils ont des rôles différents pour la perception du mouvement. Cela montre l'existence des deux types de SV.

Deuxièmement, si on se focalise sur les neurones réguliers, on verra que, même si le stimuli est maintenu constant, la valeur de la réponse décroît lentement avec le temps. C'est le phénomène d'adaptation décrit précédemment. Cela suggère que, pour le SVS, ce n'est pas uniquement la valeur de l'accélération stabilisée qui détermine la perception du

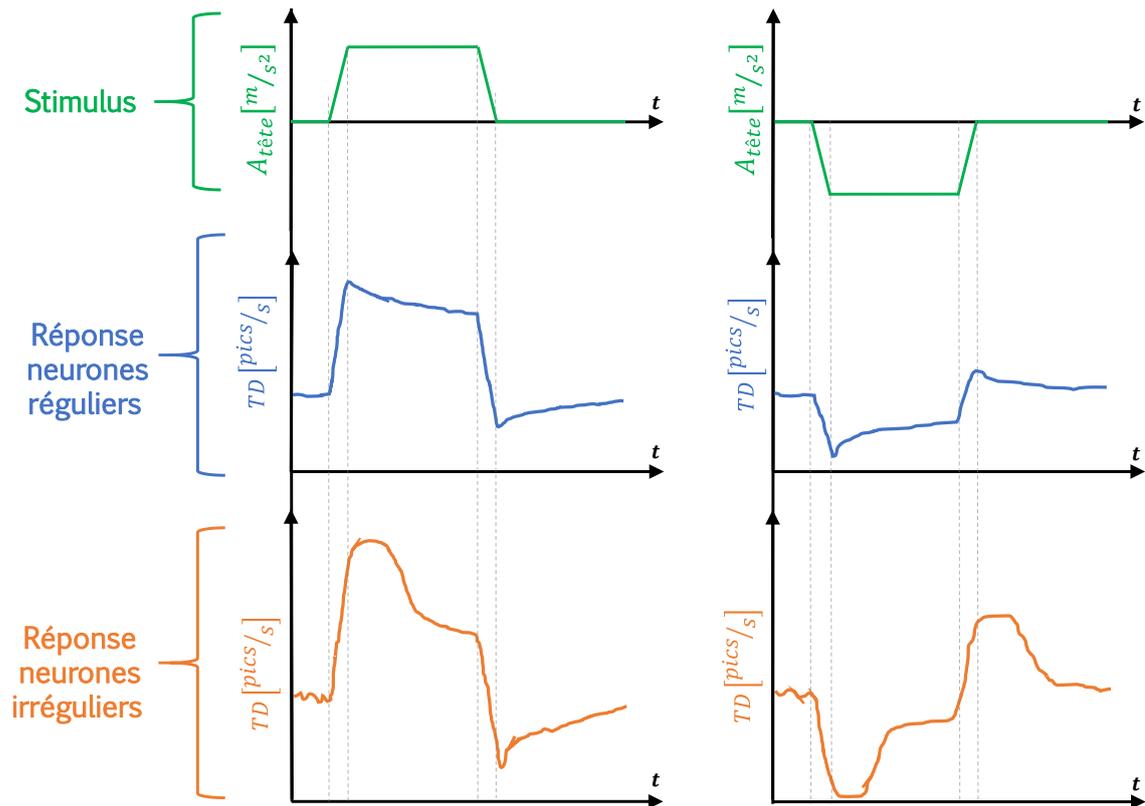


FIG. 1.11 – Réponse des afférents neuronaux régulier et irréguliers d'un singe écureuil lors de l'application des trapèzes d'accélération (Représentation faite à partir des résultats de [64]).

mouvement ; en effet, la durée de l'application du stimuli a une influence sur la réponse envoyée au SNC.

De même, chez les neurones irréguliers les pics de la réponse ont lieu au voisinage des phases transitoires d'accélération et sont légèrement retardés. Cela offre un argument supplémentaire à l'existence du SVT. Ces neurones semblent être spécialisées dans la perception des phases transitoires d'accélération. Lors de la phase d'adaptation, la réponse des neurones irréguliers ne s'annule pas, même si elle reste petite suggérant un certain rôle des neurones irréguliers dans la perception des accélérations stabilisées.

Sur cette même expérience [64], on peut constater que, dans le singe écureuil, il existe une dissymétrie dans la réponse des afférents lorsque l'accélération appliquée change de signe. En effet, l'augmentation du taux de décharge lorsque les récepteurs sont excités est plus importante que la diminution du taux de décharge lorsque ceux-ci sont inhibés. Si le même phénomène existait chez l'humain, cela viendrait renforcer notre hypothèse que la sensibilité des conducteurs n'est pas la même pour les accélérations que pour les décélérations.

Sur la revue de Goldberg sur les afférents vestibulaires [74] (où l'on discute des résultats présentés sur [75]) on s'intéresse à la variabilité dans les intervalles entre les décharges. Concernant les décharges au repos, la déviation standard des intervalles n'est pas nulle¹³. Cela est vrai même sur les afférents les plus réguliers, même si la valeur reste

petite. La variabilité dans les décharges au repos est, bien évidemment, beaucoup plus importante dans les neurones irréguliers. Si l'on considère la réponse lorsque les cellules sont excitées ou inhibées, la variabilité du taux de décharge est aussi non-négligeable.

Nous pensons que ce « bruit » dans le taux de décharge, n'est pas sans conséquence sur la perception du mouvement. Concernant les neurones réguliers, même si la variabilité est petite, cela voudrait dire que le conducteur ne serait pas en mesure des distinguer des faibles variations d'accélération; en effet, deux valeurs très proches d'accélération produiraient deux taux de décharge assez similaires, qui seraient noyés dans la dispersion dans le taux de décharge. Cela serait d'avantage vrai pour la sensibilité à l'à-coup, étant donné qu'il y a plus de dispersion dans les décharges irrégulières. Cependant, du fait de la redondance due à la présence d'un grand nombre de récepteurs sensoriels, il est possible que cette perte de sensibilité soit partiellement compensée.

Cette hypothèse sur la perte de sensibilité est compatible avec certains résultats empiriques en ergonomie automobile, dont nous discuterons plus tard, ainsi que sur les constats faits au niveau industriel.

Sur d'autres études (voir, par exemple, [45, 64, 65, 74]), on considère le gain dans la réponse des afférents. Le gain, pour une fréquence donnée, représente la variation dans le taux de décharge ayant lieu lors qu'on varie l'amplitude du stimulus d'accélération. Son unité est [$\text{pics}/\text{s.g}$]. On constate que le gain est considérablement plus important sur les afférents irréguliers que sur les réguliers. Cela rendrait le SVT plus réactif à des petites variations d'accélération. Sur [74], on propose que le faible gain au niveau des afférents réguliers leur permet d'avoir une plage de fonctionnement plus importante. Le fait que les afférents irréguliers auraient un gain plus important, impliquerait aussi qu'ils satureraient plus facilement, ce qui supporterait l'hypothèse que l'à-coup a un impact plus important sur l'agrément de conduite que l'accélération.

On observe aussi que le taux de décharge des neurones irréguliers présente de l'avance de phase [45, 65, 74, 198]. Par exemple, dans le cas du singe écureuil, cette avance de phase aurait un angle entre 20° et 40° [65]. Comme cela ne correspond pas à l'avance d'une dérivée pure, qui est 90° [159], certains interprètent cela comme une preuve que les afférents irréguliers répondraient en même temps à l'accélération et à l'à-coup [45, 57]. Si c'était le cas, cela montrerait la pertinence de l'hypothèse que le SVT, et donc le conducteur, seraient sensibles à l'à-coup.

* * *

En plus de fournir des nouveaux arguments supportant certaines des conclusions et des hypothèses précédentes, cette section nous permet de faire deux hypothèses supplémentaires sur l'agrément de conduite :

- L'agrément de conduite ne dépend pas uniquement de l'intensité de l'accélération (ou de l'à-coup), mais elle dépendrait aussi du temps d'exposition au stimulus.

13. Dit autrement, il existe du « bruit » dans les « signaux » envoyés par les neurones, et ce même au repos.

Cela est supporté par le phénomène d'adaptation observé lors des expériences de Fernandez et Goldberg [64].

- Le conducteur ne serait pas sensible à des petites variations d'accélération et d'à-coup. Il aurait donc une tolérance à des variations qui ne dépasseraient pas un certain seuil. Cela est supporté par la variabilité dans le taux de décharge des neurones afférents, observée sur [75, 74]. De plus, étant donné que la dispersion est beaucoup plus importante dans les terminaisons nerveuses associées au SVT, il est probable que le seuil de non-sensibilité à l'à-coup soit plus conséquent que celui associé à l'accélération.

* * *

Les axons des neurones afférents en contact avec le SV se combinent pour former le *nerf vestibulaire*, qui transmet l'information sur le mouvement de la tête aux *noyaux vestibulaires centraux*, qui font partie du SNC, afin qu'ils puissent l'exploiter ou la transmettre à d'autres parties du SNC [13, 76, 101]. La section qui suit s'intéresse à l'intégration de cette information.

1.2.3 Intégration des informations dans les noyaux vestibulaires

Nous avons vu qu'il y a un grand nombre d'indices qui montrent l'existence de deux fonctionnalités différentes dans le SV, le SVT et le SVS, qui seraient respectivement associées à la perception des phases transitoires et stabilisées d'accélération. Toutefois, une question est de savoir si ces deux informations sont traitées séparément par le SNC, ou si elles sont combinées. Cela nous intéresse car, si les phases transitoires et stabilisées sont traitées de manière spécifique, alors nous devrions aussi considérer ces phases de manière séparée au moment de décider si une manœuvre respectera ou pas l'agrément de conduite.

Tel que nous l'avons indiqué précédemment, les informations en provenance des OO sont transmises aux noyaux vestibulaires, qui sont localisés dans la *medulla oblongata* (ou *moelle allongée*) [13, 76]. Les noyaux vestibulaires sont quatre : supérieur, latéral, médian et inférieur ; chaque noyau ayant des fonctions différentes. Ils sont constitués par des réseaux de neurones vestibulaires de second-ordre [76]. Ils se chargent de déterminer la perception du mouvement et de la position du corps dans l'espace. En plus de cela, ils sont responsables de certains réflexes dont les *réflexes vestibulo-oculaires*, qui nous permettent de garder les yeux fixes, même si la tête bouge ; cela nous rend capables, par exemple, de lire des panneaux alors qu'on est en voiture. Sur la Figure 1.4, on voit une représentation des noyaux vestibulaires ; les lignes en pointillés représentent les quatre différents noyaux.

Vers la fin du siècle passé, il a été mis en évidence que les terminaisons des neurones afférents réguliers et irréguliers, en contact avec les noyaux vestibulaires, se superposent [31, 74, 211]. La découverte du chevauchement des signaux pouvait être interprétée comme une preuve que le SNC ne faisait pas de distinction entre les phases transitoires et stabilisées d'accélération. Cependant, des études *in vitro* des tissus composant les noyaux

vestibulaires ont montré qu'il existe deux types de neurones, qui répondent différemment à des stimuli similaires et qui semblent garder la distinction entre les phases stabilisées et transitoires, propres au SVS et au SVT, respectivement [45].

En effet, les neurones de second ordre peuvent être classifiés en *neurones toniques* et *neurones phasiques*¹⁴ [45, 169, 211]. Lors de l'application d'un échelon de courant à des neurones toniques, ceux-ci répondent avec un train régulier d'impulsions, maintenu tout au long de l'application du courant. Quand on applique le même stimulus à des neurones phasiques, ceux-ci répondent en envoyant quelques impulsions très rapides pour ensuite maintenir un assez faible potentiel électrique [211]. Cela est illustré sur la Figure 1.12, représentant la réponse de ces deux type de neurones.

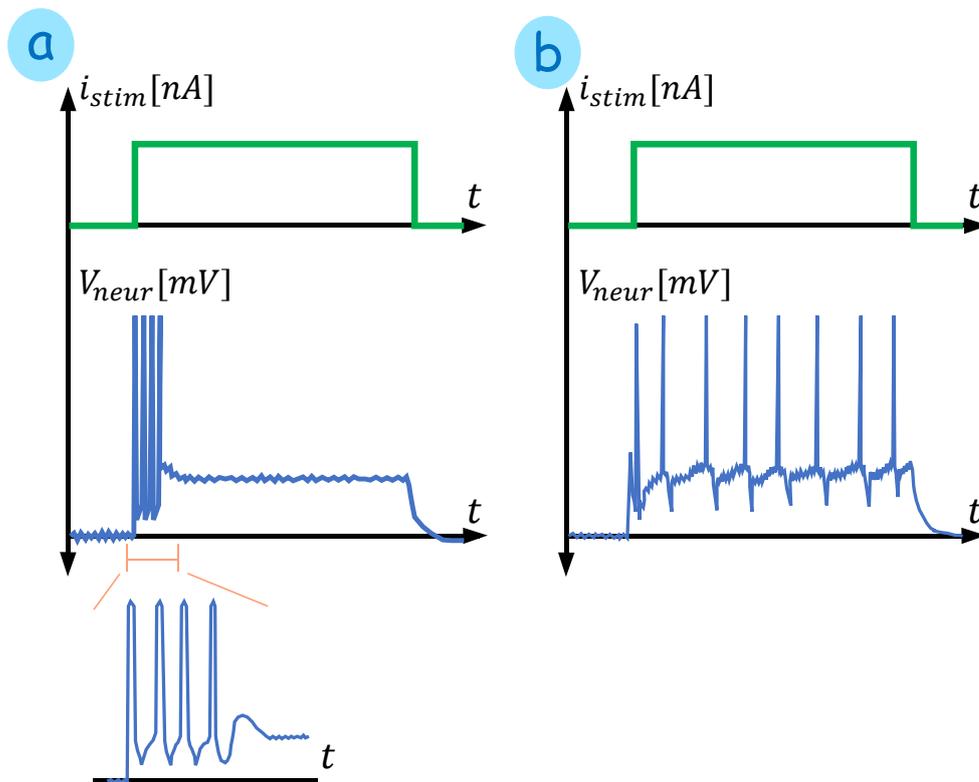


FIG. 1.12 – Représentation de la réponse des neurones phasiques et toniques (courbes bleues) à un stimulus de courant constant (courbes vertes). (a) neurone phasique ; (b) neurone tonique (Pour voir des vrais signaux temporels, consulter, par exemple [45, 169, 211]).

Sur une étude *in vitro* réalisée sur des neurones vestibulaires de second ordre de grenouilles, Pfanzelt et al. ont appliqué des trains d'impulsions à des neurones toniques et phasiques [169]. Les impulsions ont été modulées en fréquence, de tel sorte que la fréquence du signal reproduisait un demi-sinus ; ce type de stimulus se rapproche de celui que les neurones pourraient recevoir en condition réelle, *in vivo*. L'étude a montré que

¹⁴ Nous avons décidé de retenir le nommage utilisé sur [169, 211]. Sur [45], on parle plutôt de *neurones de type A* et de *neurones de type B* pour parler de neurones toniques et des neurones phasiques ; cependant, sur [74], on parle aussi de neurones de type A et de type B, mais il n'est pas clair qu'on fasse référence aux mêmes catégories.

le deux types de neurones répondent différemment à des stimuli similaires. En effet, les neurones toniques présentent une réponse qui correspond assez bien au stimulus. Au contraire, les neurones phasiques présentent une avance de phase assez considérable lors de l'application du stimulus, avec une réponse qui s'éteint alors que l'entrée continue d'être appliquée ; cela fait penser que ces neurones sont activés par les variations de l'entrée plutôt que par la valeur de celle-ci.

Ces études mettent en évidence que la séparation du SV dans une composante transitoire et une composante soutenue se propage jusqu'au SNC, responsable de traiter l'information [45]. En vue de cela, nous faisons l'hypothèse que, lors de la conduite automobile, les phases transitoires et stabilisées sont traitées séparément par le SNC et qu'elles ont donc des influences différentes sur l'agrément de conduite. Ainsi, au moment de juger si une manœuvre est acceptable par le conducteur, il nous semble nécessaire de faire la distinction entre les phases transitoires et stabilisées ; les premières seraient caractérisées principalement par l'à-coup et les deuxièmes par l'accélération.

1.3 ÉVALUATION DE LA FONCTION DES ORGANES OTOLITHIQUES : POTENTIELS MYOGÉNIQUES ÉVOQUÉS

Objectif de la section

Que nous apprend les études in vivo sur la perception du mouvement ?

Lorsqu'on s'intéresse aux études *in vivo*, comme par exemple, lors des examens médicaux, il est nécessaire de trouver des moyens de détecter et de quantifier l'activité du SV de manière peu invasive. Avant les années 1990, la manière la plus répandue pour le faire était d'attacher le patient à des plateformes compliquées et de le secouer, en mesurant certaines de ses réponses corporelles, tel le mouvement de ses yeux [44]. Cette pratique, comme on peut l'imaginer, posait un certain nombre de problèmes. Cependant, un gros changement a eu lieu grâce à la découverte que les projections des neurones vestibulaires produisent des potentiels électriques sur certains muscles, qui peuvent être mesurés en utilisant des électrodes [25, 44, 148, 182, 181]. Ces tensions électriques sont connues sous le nom de Potentiels Évoqués Vestibulaires Myogéniques (VEMP, *Vestibular Evoked Myogenic Potentials*). Pour tester le VEMP on peut soit appliquer du son à travers les oreilles du patient, soit appliquer des vibrations mécaniques sur la tête de celui-ci [181]. Dans cette section nous verrons comment l'étude de ces potentiels, et de l'équivalent pour des études sur des animaux, peuvent nous renseigner sur l'importance de la topologie de la manœuvre sur l'agrément de conduite.

En regardant la littérature, on constate que la plupart d'études sur le fonctionnement et les caractéristiques des potentiels évoqués sont réalisées sur des animaux. Dans ce cas, on parle plutôt de Potentiels Évoqués Vestibulaires à Courte Latence (VsEP, *Short-Latency*

Vestibular Evoked Potentials), qui peuvent être mesurés directement sur les nerfs faciaux, à travers des procédures chirurgicales [166, 167, 168]. Même si le protocole de mesure n'est pas le même, les résultats de ces tests semblent être représentatifs de ce qui se passe chez les humains, comme l'indique le fait que dans les revues sur les VEMP, on cite souvent ces tests¹⁵[44, 181]. Il existe, tout de même, des études qui s'intéressent directement à la mesure du VEMP chez les humains, dont [182]. Les résultats de cette étude sont compatibles avec la discussion qui suit.

Le VsEP est représentatif de l'activité utriculaire, ce qui convient très bien à nos intérêts car, comme vu précédemment, l'utricle est probablement l'organe vestibulaire ayant la plus forte influence sur l'agrément de conduite. Le lien entre le VsEP et l'utricle a été montré par Chihara et al., qui ont évalué la réponse du VsEP à des stimuli suite à la destruction des différents organes de l'oreille interne chez le cochon d'Inde [33]. La destruction sélective de la cochlée, les canaux semi-circulaires ou le saccule n'a pas eu d'effet significatif sur le VsEP, alors que la destruction de l'utricle s'est traduite par la complète suppression du VsEP. Ces résultats nous permettent de penser que l'étude du VsEP est pertinente en ce qui concerne l'ergonomie automobile.

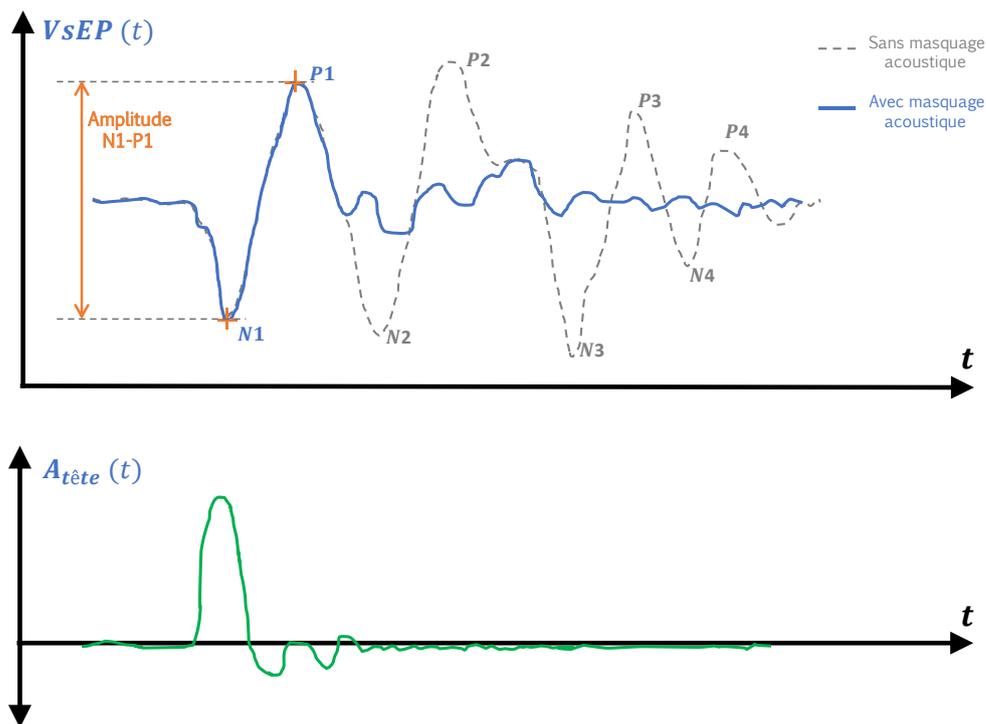


FIG. 1.13 – Représentation du signal VsEP (Basé sur [33, 105, 168]).

Le VsEP est un signal temporel qui répond au déplacement mécanique de la tête, et plus particulièrement de l'os temporel du crâne [33]. Lors de l'application d'un stimulus, la valeur du VsEP fluctue, en générant des pics et des crêtes. En mesurant la différence de

¹⁵. Si les tests sur des animaux peuvent être transposés aux humains, cela reste cependant à être démontré [106].

valeur ou l'intervalle de temps entre certains pics et crêtes, il est possible de caractériser ce signal. Il a été montré que l'amplitude entre la première crête, nommée N_1 , et le premier pic, nommé P_1 , est fortement représentatif de l'amplitude du mouvement qui est appliqué sur la tête [33]. Afin d'analyser ce pic plus facilement, les chercheurs appliquent du bruit acoustique de masquage à travers les oreilles de l'animal, ce qui atténue fortement tous les autres composantes du signal¹⁶, sans avoir d'impact considérable sur les composantes N_1 et P_1 [33, 105, 106, 168]. La Figure 1.13 représente un signal VsEP.

Jones et al. ont étudié quelles caractéristiques du mouvement ont une influence sur le VsEP chez les mammifères [105]. Pour ce faire, ils ont appliqué des stimuli mécaniques sur la tête des souris et des rats. Ils ont réalisé deux types d'études : dans le premier, ils ont appliqués des stimuli où la valeur maximale d'accélération variait, alors que la valeur de l'à-coup a été garde constante ; dans les autres études, ils ont appliqué des profils à iso-valeur pic de l'accélération et où la valeur de l'à-coup variait. Lors de leurs expériences sur des souris, ils ont obtenus les résultats présentés sur la Figure 1.14. Ceux-ci montrent l'effet de l'accélération et de l'à-coup sur l'amplitude N_1 - P_1 du VsEP.

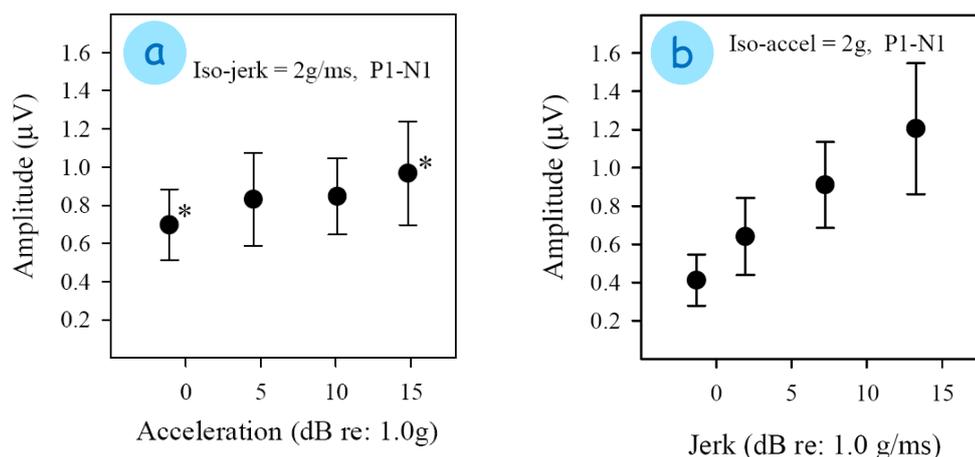


FIG. 1.14 – Effet de l'accélération et de l'à-coup sur le VsEP ; résultats d'expériences réalisées sur des souris (Reproduit avec autorisation à partir de [105]).

Une première observation, qui saute aux yeux, est la forte influence de l'à-coup sur le VsEP, lors des tests à iso-accélération (Figure 1.14b). Ainsi, le VsEP serait assez représentatif de la réponse du SVT. Cela vient confirmer notre hypothèse sur l'importance de l'à-coup sur la perception du mouvement.

Un phénomène assez inattendu a lieu sur les expériences à à-coup constant. Sur la Figure 1.14a, on constate une légère variation lorsque la valeur pic d'accélération augmente. Cette variation est significative statistiquement pour les tests marqués avec une étoile (*). Cependant, tel que discuté par les auteurs de l'étude, ce phénomène ne peut pas venir de l'accélération car les composantes N_1 et P_1 du VsEP ont eu lieu avant qu'on ait atteint la valeur pic d'accélération. Ainsi, il semble qu'une même valeur de l'à-coup produit une réponse physiologique différente selon la durée d'application du stimulus.

16. Qui sont probablement associées à l'action de la cochlée [168]

Jones et al. (2015) ont étudié l'influence de la durée d'application d'à-coup sur le VsEP chez les souris [106]. Ils ont considéré que le comportement mécanique des OO peut être représentée par un système linéaire de second ordre sur-amorti; ils ont supposé aussi que, afin que les neurones afférents soient activés, la valeur de la réponse mécanique doit dépasser un certain seuil. Ainsi, pour une valeur d'à-coup fixe, une durée d'application du stimulus trop faible, ne permettrait pas de dépasser ce seuil et les neurones afférents ne seraient donc pas activés. De même, pour une durée d'application du stimulus fixe, il y aurait une valeur d'à-coup à partir de laquelle les afférents seraient activés. En faisant des test sur des souris, ils ont déterminé l'évolution du seuil d'à-coup générant une réponse sur le VsEP. La Figure 1.15 présente la relation entre le temps d'application du stimulus et la valeur d'à-coup nécessaire pour générer un VsEP. Nous pouvons voir qu'il existe une forte dépendance entre la durée d'excitation et la capacité à percevoir de l'à-coup.

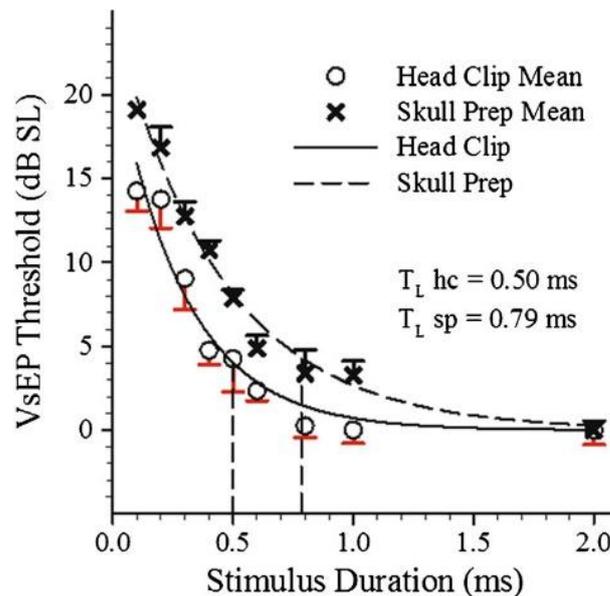


FIG. 1.15 – Seuil de réponse du Potentiel Evoqué Vestibulaire à Courte Latence (VsEP) en fonction du temps d'application du stimulus d'à-coup; résultats d'expériences réalisées sur des souris. Les cercles et les croix correspondent à deux méthodes différentes d'application du stimulus (Reproduit avec autorisation à partir de [106]).

Le lecteur aura peut-être remarqué que les durées à partir desquelles la valeur du seuil d'activation se stabilise sont extrêmement petites. Cela pourrait conduire à la conclusion que l'influence de la durée d'application est négligeable. Cependant, nous avons trois raisons qui nous font penser que la relation entre la durée de l'application du stimulus et la valeur de l'à-coup s'appliquent aussi lors de durées plus importantes, telles que celles ayant lieu abord d'une automobile. Premièrement, les valeurs d'à-coup qui ont été appliqués lors des expériences *in vivo* sont énormes (à titre d'exemple, $2g/ms$ correspondent à presque $20000 m/s^2/s!$); ainsi, si l'on utilisait des valeurs plus raisonnables d'à-coup, les temps d'application nécessaires pour produire des réponses physiologiques devraient eux-aussi augmenter. Deuxièmement, le VsEP semble être représentatif de la réponse

des afférents neuronaux [33, 105]; cependant, tel que nous l'avons vu sur la section 1.2, après la transmission de l'information par les neurones afférents, les noyaux vestibulaires doivent encore la traiter, après quoi l'information sera remontée vers d'autres structures du SNC. Toutes ces étapes prennent un certain temps, pendant lequel le stimulus d'à-coup a potentiellement besoin d'être maintenu, afin que l'information parvienne à certaines régions du SNC. Si le stimulus prenait fin avant cela, l'organisme n'aurait pas eu le temps de générer une réponse de désagrément. Finalement, des expériences empiriques réalisées chez Renault S.A.S., en dehors du cadre de cette thèse, montrent que lorsque le conducteur subit certaines valeurs d'à-coup pendant de courtes périodes, il n'expérimente pas de désagrément; en revanche, des valeurs similaires d'à-coup appliquées plus longtemps génèrent du désagrément chez le conducteur¹⁷.

En vue de ces résultats, nous ferons l'hypothèse que la durée des phases transitoires de conduite a une forte influence sur la tolérance du conducteur à l'à-coup. Ainsi, au moment de déterminer si une phase transitoire respecte l'agrément de conduite, il est nécessaire de considérer simultanément la valeur de l'à-coup et sa durée d'application.

* * *

Pastras et al. ont étudié l'influence de l'à-coup sur le VsEP chez les cochons d'Inde [166, 167, 168]. La Figure 1.16 présente l'amplitude N_1-P_1 du VsEP en fonction de la valeur d'à-coup subi par la macula utriculaire. Il y a plusieurs phénomènes notables. D'abord, ils ont constaté un seuil d'à-coup à partir duquel le VsEP est affectée. Ils ont estimé cette valeur à environ 0.0015 g/ms , mais celle-ci pourrait être moindre du fait des conditions de l'essai. Cela vient supporter notre hypothèse sur l'existence d'un seuil d'à-coup en dessous duquel un conducteur serait incapable de percevoir son propre mouvement.

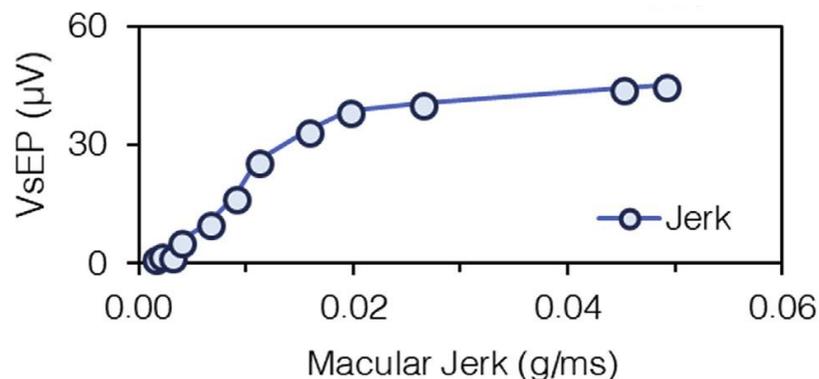


FIG. 1.16 – Amplitude N_1-P_1 du Potentiel Evoqué Vestibulaire à Courte Latence (VsEP) en fonction de la valeur pic-à-pic de l'à-coup (Reproduit avec autorisation à partir de [167]).

Aussi, nous pouvons constater que pour une certaine plage de valeurs d'à-coup, la réponse du VsEP présente un comportement quasi-linéaire, ce qui montrerait que le SVT se comporte bien comme un capteur d'à-coup chez les mammifères.

¹⁷. D'ailleurs, les résultats de [106] pourraient offrir une explication à ce phénomène observé empiriquement.

Finalement, nous constatons une saturation de la réponse du VsEP au-delà d'une certaine valeur d'à-coup. Cela donne un argument supplémentaire à notre hypothèse que les cellules sensorielles du SVT ont une tendance à saturer (voir section II.1.2.1), ce qui aurait pour résultat une plus grande sensibilité du conducteur à l'à-coup qu'à l'accélération de son véhicule ; en effet, les cellules du SVT pourraient plus facilement saturer et générer un ressenti de désagrément.

1.4 ANALYSE D'ÉTUDES EN ERGONOMIE

Objectif de la section

Analyser ce que des études sur des humains peuvent nous apprendre sur la perception du mouvement et l'agrément de conduite.

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés à ce que la physiologie du conducteur pouvait nous apprendre sur sa perception du mouvement. On s'est focalisé sur *comment* on ressent ses manœuvres. A partir de cette information, nous avons fait certaines observations et certaines hypothèses sur l'agrément de conduite. Dans cette section, nous allons contraster ces informations avec les résultats d'expériences sur des conducteurs réels, soit sur de simulateurs, soit sur des roulages réels. Ces études, issues du domaine de l'Ergonomie, et dans sa majorité de l'Ergonomie Automobile, nous permettront de valider ou d'infirmer nos hypothèses et renforcera nos connaissances sur l'agrément de conduite. De plus, grâce à ce que nous avons appris jusqu'à présent, nous avons des éléments pour avoir un regard critique sur ces résultats afin de pouvoir les interpréter correctement.

Les différentes études seront présentées dans l'ordre chronologique, ce qui mettra en évidence la tendance de la recherche à s'orienter de plus en plus vers la conduite automatisée. Notre sélection de publications ne se prétend pas exhaustive, mais elle permet de se faire une idée de l'état de la recherche en ergonomie automobile, et sur des domaines connexes.

* * *

Déjà dans les années 1970, il y avait un intérêt important sur l'impact de l'accélération et de l'à-coup sur le confort de personnes transportées. Dans sa revue de 1977, Hoberock fait la synthèse d'un certain nombre de travaux qui se faisaient sur le domaine, en relation avec les transports en commun [92]. Parmi les études considérées, il y en a deux qui se démarquent.

D'une part, Hirshfeld (1932) a appliqué des profils d'accélération différents à un panel de 110 sujets des deux sexes et d'âges différents [90]¹⁸. Les sujets étaient debout sur une petite voiture qui se déplaçait sur un sol lisse. Le critère d'agrément considéré a été la

perte d'équilibre de l'individu, déterminée par le fait que celui-ci ait dû écarter ses pieds ou saisir une main courante pour éviter de tomber.

L'étude montre que les sujets ont eu beaucoup plus de difficulté à garder l'équilibre lorsque l'accélération évoluait très rapidement de zéro jusqu'à une valeur constante, que quand celle-ci augmentait linéairement avec un à-coup constant. Cette étude a montré aussi que le sujet est capable de garder plus facilement l'équilibre lorsqu'une faible valeur d'à-coup est appliquée, même si la valeur finale d'accélération est la même. Cela supporte l'existence du SVT, qui jouerait un rôle assez important dans le maintien de l'équilibre ; en effet, on peut imaginer que, lors du changement d'accélération soudain, le SVT reçoit un fort stimulus qui pousse le sujet à agir pour ne pas tomber.

Hirshfeld a aussi testé l'effet des « démarrages en douceur (*slower starts*), » c'est-à-dire, de l'application d'un à-coup qui augmente linéairement avec le temps, suivant un taux de change $k_1 [m/s^3/s]$. De manière remarquable, des valeurs importantes de k_1 ne conduisent pas à une perte d'équilibre plus importante. C'est même le contraire : les résultats semblent montrer que pour des très faibles valeurs de k_1 , les individus semblent avoir plus de mal à garder l'équilibre ; cependant, étant donné que l'auteur ne donne pas d'indicateur de signification statistique, nous ne pouvons pas l'affirmer. En tout cas, ces résultats seraient compatibles avec les hypothèses faites dans la section précédente. En effet, le SV serait sensible à l'accélération et à l'à-coup, mais pas à la dérivée de ce dernier ; ainsi, la variation linéaire de l'à-coup devrait passer inaperçue et n'aurait pas donc de conséquence sur la capacité de l'individu à garder l'équilibre. De plus, étant donné que le SVT ne serait pas capable de distinguer des très faibles valeurs d'à-coup, il ne serait capable de compenser le mouvement au début des manœuvres où l'à-coup est réduit ; cela pourrait expliquer pourquoi les sujets semblent avoir eu plus de mal à maintenir l'équilibre dans ce cas.

L'autre étude d'intérêt est celle de Browning (1972), qui a filmé des sujets sur une plateforme plate qui subissaient des profils d'accélération trapézoïdaux symétriques [23]. Le critère d'agrément considéré a été, encore une fois, la perte d'équilibre. Les vidéos des individus ont été analysées par un panel d'experts, qui a déterminé quand le sujet présentait un « léger mouvement relatif ». L'acceptabilité a été déterminée sur l'intégralité de la manœuvre. L'étude a, d'une part, montré que l'agrément ne dépend pas uniquement de la valeur maximale d'accélération, mais aussi de l'à-coup¹⁹. D'autre part, il est montré que la valeur d'à-coup acceptable, dépend de la valeur pic d'accélération, et donc de la durée de la première phase du trapèze. Ainsi, l'à-coup peut atteindre des valeurs assez importantes, pourvu que sa durée d'application soit faible.

La relation entre le seuil maximal d'à-coup acceptable et sa durée d'application, semble suivre un comportement elliptique, tel que c'est montré sur la Figure 1.17. Les traits noirs

18. Nous n'avons malheureusement pas eu accès à cette source. Donc nous avons juste utilisé la synthèse présentée sur [92].

19. Dans l'article on parle plutôt de « temps de montée » mais, de par le type de profil utilisé lors des tests, cette grandeur est directement reliée à la valeur de l'à-coup.

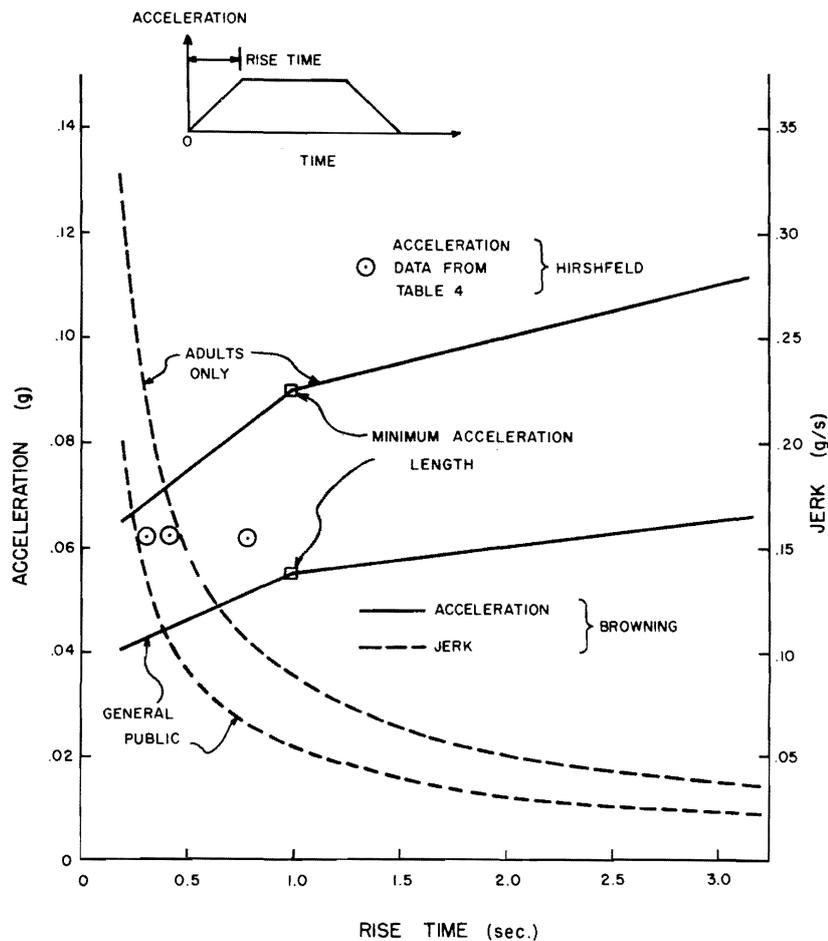


FIG. 1.17 – Courbes tentatives d'acceptabilité pour l'accélération d'un sol (Résultats de [23]; reproduits à partir de [92]).

représentent une estimation des seuils d'accélération en fonction du temps de montée, et les traits en pointillés montrent les valeurs d'à-coup correspondantes. Les courbes d'à-coup rappellent les résultats de Jones et al. (2015) [106], concernant les seuils de réponse du VsEP en fonction de la durée du stimulus (voir Figure 1.15). Ces résultats renforcent notre hypothèse sur le fait que le seuil de sensibilité à l'à-coup varie en fonction du temps d'application du stimulus. De plus, il est possible que cette relation puisse être approximée par une fonction elliptique de forme $\hat{j} = c + \frac{b}{(\tau_1 + d)}$, où \hat{j} serait le seuil maximal d'à-coup, τ_1 la durée d'application de l'à-coup, et b , c et d des constantes.

* * *

Sur Clément et al. (2001), on présente les résultats de tests de perception qui ont eu lieu lors de la mission Neurolab, en 1998 [34]. Pendant cette mission, quatre astronautes ont été exposés à des accélération latérales (interaurales) et verticales (dorsoventrales), à la fois sur la Terre et pendant le vol spatial orbital. Ils ont été installés sur des plateformes rotatives, générant des forces centrifuges. Lors des expériences, les astronautes ont interprété les stimuli, comme des inclinaisons de leur propre corps. Un autre constat est le fait que, en

apesanteur, le ressenti d'inclinaison est amplifié. Cela met en évidence la double fonction du SV de percevoir l'inclinaison et le mouvement. Aussi, cela supporte notre argument sur l'intime relation entre le ressenti dû à ces deux phénomènes, à tel point que l'inclinaison et l'accélération peuvent être confondus dans certaines conditions.

Un autre fait marquant est que, 40s après que la centrifugeuse se soit arrêtée certains astronautes ressentaient qu'ils étaient de retour à la position d'origine et d'autres ont senti une légère inclinaison dans le sens opposée à celui perçu pendant l'expérience. Ce phénomène a eu une forte augmentation en conditions d'apesanteur, au point que tous les astronautes croyaient être inclinés d'entre 10° et 20° dans le sens opposé à celui ressenti pendant la centrifugation, alors qu'ils ne recevaient plus aucun stimulus. Cela semble montrer que l'interprétation faite par le SNC du mouvement ne dépend pas uniquement des valeurs actuelles des signaux vestibulaires (qui, après l'expérience, étaient nulles), mais aussi de leur *historique*. Ainsi, cela renforce l'idée que les manœuvres d'accélération doivent être considérées dans l'ensemble, et qu'on ne doit pas se limiter à considérer uniquement des valeurs instantanées ; la topologie des manœuvres de conduite aurait une influence sur l'agrément que le conducteur ressent.

Finalement, une idée très intéressante présentée sur le même article, consiste à modéliser la perception du conducteur en partant de la vertical du corps, et en rajoutant des termes dus aux signaux vestibulaires et au ressenti somatique (dû à des aspects proprioceptifs comme le fait d'être serré par une ceinture, ou assis sur une chaise). Ainsi, l'accélération dans le référentiel du conducteur, pourrait être calculé comme la somme d'accélération équivalentes pondérées. Nous avons utilisé une idée similaire pour modéliser l'effet de la pente sur l'agrément de conduite, ce qui sera présenté dans une section ultérieure.

* * *

Müller et al. (2012) ont étudié comment différents types de conducteurs perçoivent la dynamique longitudinale d'un véhicule [146]. Pour ce faire, ils ont considéré un groupe de 20 sujets, 3 femmes et 17 hommes, d'entre 30 et 60 ans. Ils les ont fait conduire cinq véhicules, appartenant à différents segments du marché ; les accélérations longitudinale et latérale du véhicule ont été enregistrées lors de chaque roulage. Pendant qu'ils conduisaient, les conducteurs ont dû décrire leurs expériences ; puis, après le roulage, ils ont dû répondre à des questionnaires. On a trouvé que des facteurs tels que le bruit du moteur affectaient la perception de la dynamique du véhicule.

Ce qui nous semble remarquable de cet article, est la méthode utilisée pour discriminer les conducteurs *sportifs* des conducteurs *défensifs*. A partir des données d'accélération du véhicule, ils ont calculé ce qu'ils appellent le *potentiel d'adhésion*²⁰, a_{pot} , qui est exprimé par (1.2), où a_{long} correspond à l'accélération longitudinale du véhicule et a_{lat} à l'accélération latérale.

20. Il semblerait que le concept de potentiel d'adhésion viendrait de l'article: Lienkamp, M. 2011. *Dynamik der StraBenfahrzeuge*, Technische Universität München ; cependant, nous n'avons pas eu accès à cette source.

$$a_{pot} = \sqrt{a_{long}^2 + a_{lat}^2} \quad (1.2)$$

En voyant l'équation, on peut réaliser qu'il s'agit de la norme euclidienne d'un vecteur composé par a_{long} et a_{lat} . En effet, les auteurs ont représenté l'accélération du conducteur comme des points sur un diagramme d'accélération latérale contre accélération. La Figure 1.18 illustre cette représentation. Les auteurs ont trouvé qu'il était possible de discriminer les conducteurs selon leurs styles de conduite, en considérant la valeur de a_{pot} des 1500 valeurs les plus grandes de chaque roulage.

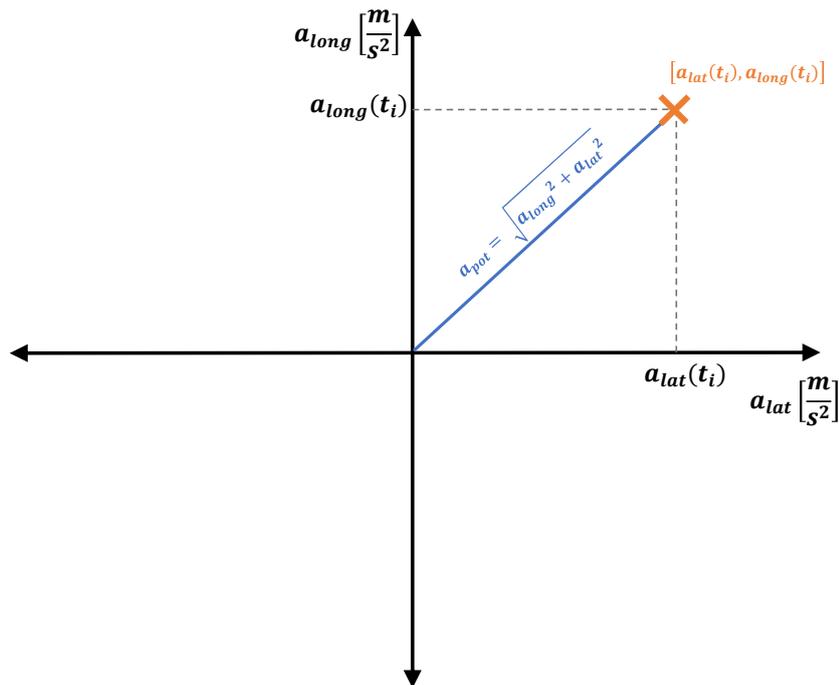


FIG. 1.18 – Représentation de l'accélération du conducteur sur un plan accélération latérale - accélération longitudinale (Basée sur [146]).

Ces résultats supportent notre hypothèse sur le fait que les accélérations longitudinale et latérale doivent être considérées simultanément au moment de déterminer si une manœuvre respecte l'agrément de conduite. Aussi, l'approche présentée sur cette étude a servi d'inspiration pour la représentation et l'analyse du comportement du conducteur que nous présenterons ultérieurement.

* * *

Müller et al. (2013) ont étudié quelle est la variation minimum entre deux valeurs d'accélération ou d'à-coup longitudinaux qu'un conducteur peut percevoir [147]. Cette valeur est connue, dans le monde académique, sous le terme « différence à peine perceptible (*just noticeable difference*). » Pour ce faire, les auteurs ont appliqué des méthodes issues de la psychophysique²¹; ils ont utilisé, en particulier, des méthodes adaptatives, adéquates pour

déterminer des seuils de perception. Les tests ont été réalisés dans un véhicule réel sur 16 participants : 3 femmes et 13 hommes.

Pour déterminer la différence à peine perceptible d'accélération, on a appliqué des stimuli avec une valeur d'à-coup constante, et dont la valeur pic d'accélération variait. De même, pour détecter le seuil de perception d'à-coup, on a appliqué une entrée à iso-accélération finale et à à-coup variable. Pour ce faire, les auteurs ont modifié la cartographie de couple du moteur du véhicule. Pour avoir plus de détails, le lecteur est invité à consulter la source.

Comme résultat de cette étude, les auteurs ont trouvé que la différence à peine perceptible d'accélération a été en moyenne $0.09 [m/s^2]$, avec une déviation standard de $0.086 [m/s^2]$. Concernant l'à-coup, la valeur limite trouvée a été $0.53 [m/s^3]$, avec une déviation standard de $0.83 [m/s^3]$. L'énorme dispersion dans le seuil d'à-coup est peut-être due à des problèmes de reproductibilité des tests. En vue de cela, les auteurs préconisent une valeur conservatrice d'à-coup à $1 [m/s^3]$.

Ces résultats viennent confirmer nos hypothèses sur la limitation du SV à détecter des stimuli de très faible amplitude. Dans le cadre de nos études, nous avons décidé de garder les valeurs de différence à peine perceptible préconisées par les auteurs de cet article, notamment $0.1 [m/s^2]$ pour l'accélération et $1 [m/s^3]$ pour l'à-coup. Cependant, nous voulons attirer l'attention sur le fait que, comme discuté précédemment, il est probable que la perception de l'accélération et de l'à-coup dépendent de la durée d'application du stimulus. Ainsi, il est possible que ces seuils ne soient plus valables lors des stimuli de très longue durée.

* * *

Bellem et al. (2016) ont étudié l'existence de paramètres physiques objectifs permettant de distinguer des styles de conduite différents [18]. Pour ce faire, ils ont réalisé deux études, une en condition urbaine et l'autre sur autoroute, où les participants avec de l'expérience ont manuellement conduit un véhicule, en imitant des styles de conduite « confortable, » « quotidien » et « dynamique. » L'ordre des instructions a été randomisé. L'étude s'est focalisée sur des manœuvres de conduite car, comme les auteurs l'indiquent, cela est essentiel pour « atteindre un ressenti de confort, non seulement au niveau global, mais aussi à chaque instant tout au long du trajet²². » Pour chaque manœuvre des indicateurs potentiels d'agrément ont été étudiés.

Lors de la première étude, associée à la conduite urbaine, il y a eu 12 participants, 11 hommes et 1 femme, âgés entre 25 et 56 ans. Sur des *manœuvres d'accélération à vitesse non-nulle*, les indicateurs suivants ont présenté des différences significatives pour les trois styles de conduite : l'accélération moyenne de la manœuvre, l'à-coup maximal lors la phase d'appui sur la pédale d'accélération, et la « rapidité longitudinale (*longitudinal*

21. La psychophysique est le domaine d'études s'intéressant à la relation entre des stimuli physiques objectifs et la perception subjective résultante [147].

22. Voici la citation exacte, en anglais : « *Additionally, it is essential to split a trip into different maneuvers in order to achieve a feeling of comfort not only on the whole but for every second along the way.* »

quickness), » définie comme le ratio entre l'accélération moyenne et la variation de vitesse longitudinales lors d'une manœuvre. De plus, l'à-coup au moment de relâcher la pédale d'accélération montre des différences significatives entre le style de conduite *dynamique* et les deux autres. De même, d'autres grandeurs cinématiques *latérales* ont présenté des différences significatives entre certains des styles de conduite. Finalement, lors du *suiti de véhicule à vitesse constante*, l'inter-distance (en secondes) a présenté des différences significatives entre les trois styles de conduite.

Cette première étude vient confirmer, d'abord, l'importance de l'accélération et de l'à-coup sur le style de conduite et, donc, potentiellement sur l'agrément de conduite. De plus, deux nouveaux paramètres jouant un rôle considérable sur l'agrément de conduite sont introduits : d'une part, la *rapidité* qui est image de la durée de la manœuvre, et l'*inter-distance* (en secondes). L'importance de prendre en compte le comportement latéral du véhicule est montrée aussi. Le fait que les ordres de grandeur de ces paramètres varient suivant le style de conduite met en lumière le défi que représente la calibration d'une SAC. En vue de cela, nous concluons qu'avoir une structure de manœuvre permettant de tenir compte de tous ces critères représenterait un gain considérable de temps et d'effort pour la mise au point de telles fonctions.

Un autre fait remarquable de l'étude est la représentation des manœuvres comme des séquences d'actions plus simples. A titre d'exemple, concernant l'*accélération à vitesse non-nulle*, on enchaîne les actions suivantes : appui sur la pédale d'accélération, puis maintien de la position de la pédale d'accélération, puis relâchement de la pédale d'accélération. Cela évoque notre discussion précédente sur la *Procéduralisation*, lors de l'apprentissage d'une tâche ou compétence complexe. Nous tiendrons compte de ce principe lors de la modélisation du conducteur.

La deuxième étude présentée sur l'article concerne la conduite sur autoroute. 12 personnes, 2 femmes et 10 hommes, âgées d'entre 25 et 60 ans, ont participé aux expériences, qui ont eu lieu sur des conditions similaires à l'étude précédente. Lors des *manœuvres d'accostage derrière un véhicule*, l'accélération et la rapidité longitudinales, ainsi que l'inter-distance en secondes permettent de distinguer des conduites *confortable* et *dynamique*. Par contre, l'à-coup ne présente pas des distinctions significatives entre les styles de conduite. Aussi, les vitesses entre les différents styles de conduite sont assez similaires, avec quelques légères exceptions associées à certaines manœuvres. Concernant les *manœuvres d'accélération à vitesse non-nulle*, l'accélération longitudinale et la rapidité permettent de distinguer les différents styles de conduite. Cependant, par rapport aux niveaux d'à-coup, seulement l'à-coup maximum lors du relâchement de la pédale permet de distinguer la conduite confortable de la conduite quotidienne. En référence au *suiti d'un véhicule sur une même voie*, l'inter-distance permet de distinguer la conduite dynamique des autres styles. Finalement, en relation aux *changements de voie sur autoroute*, on constate une différence entre les changements vers la gauche, associés aux dépassements, et les insertions sur la voie de droite ; sur les premiers, il ne semble pas avoir de différence significative entre les paramètres, alors que sur les deuxièmes tous les paramètres, en de-

hors de l'à-coup, permettent de distinguer les différents styles de conduite. Cela pourrait être expliqué par le fait que les dépassements, exigeant une conduite plus réactive, les aspect associés au style de conduite passeraient à un second plan.

Cette étude semble mettre en évidence le fait que les critères d'agrément évoluent selon le contexte de roulage, ce qui renforce le besoin pour un SAC d'adapter la dynamique du véhicule selon le contexte dans lequel il opère. Aussi, il semble exister une dépendance entre la vitesse à laquelle on roule et l'amplitude, voire même l'importance, de certains critères d'agrément. Notamment, concernant l'à-coup, le fait de garder de faibles valeurs d'à-coup semble être suffisant pour respecter l'agrément de conduite, sans avoir besoin de paramétrages spécifiques selon le style de conduite.

* * *

Itkonen et al. (2017) ont étudié la corrélation entre l'accélération, l'à-coup et l'intervalle de temps entre les deux véhicules, avec l'objectif de déterminer des caractéristiques objectives associées au style de conduite [97]. Pour ce faire, ils ont conduit une étude sur un simulateur de conduite²³ avec 15 conducteurs expérimentés, 5 hommes et 10 femmes, dont la moyenne d'âge était de 31 ans. Les conditions de conduite ont été contrôlées afin de garantir la répétabilité des tests, lesquels correspondaient à des scénarios de suivi d'un véhicule.

L'étude a mis en évidence une forte corrélation, lors du suivi du véhicule, entre l'accélération, l'à-coup et le temps inter-véhicule. L'accélération et l'à-coup moyens présentent une très forte corrélation ($R^2 = 0.92$, $p < 0,001$), ce qui veut dire que, en général, un conducteur qui utilise des fortes accélérations, en fera aussi des fortes valeurs d'à-coup. Les résultats indiquent aussi l'existence d'un compromis entre le temps inter-véhicule et l'à-coup, ce qui montrerait que les sujets gardant des valeurs importantes d'inter-distance privilégient aussi une conduite avec des faibles niveaux d'à-coup, moins intense, et vice-versa.

Une analyse de composantes principales a montré qu'avec la première composante il est possible d'expliquer 91% de la variabilité inter-sujet, ce qui suggère qu'il existe un facteur latent qui expliquerait le comportement du conducteur ; ce facteur est probablement associé au style de conduite.

Ces résultats mettent en évidence l'importance pour l'agrément de conduite du respect d'une distance acceptable entre les deux véhicules. Si la distance inter-véhicule est trop différente de celle à laquelle le conducteur est habitué, celui-ci peut percevoir la manœuvre comme étant désagréable. Aussi, lors de la mise au point d'un SAC, il est nécessaire de tenir compte de la corrélation entre l'accélération, l'à-coup et le temps inter-véhicule ; notamment, afin de respecter l'agrément de conduite, il doit y avoir une cohérence entre l'inter-distance gardée et et l'intensité de la conduite, c'est-à-dire des amplitudes des accélérations et de l'à-coup appliqués.

23. Le simulateur de conduite utilisé était statique, ce qui veut dire que les conducteurs n'ont pas eu de retour vestibulaire lors des tests ; cela peut avoir une influence sur le comportement des sujets et donc sur la représentativité des résultats.

Une possible explication à ce comportement chez les conducteurs est le fait que, plus on est proche du véhicule précédant, plus il est nécessaire d'avoir une conduite dynamique pour garantir un suivi acceptable, en termes d'agrément et de sécurité. Cela se traduirait par le fait que, lorsqu'on est proche du véhicule précédent le conducteur devra faire un effort mental supplémentaire pour pouvoir conduire correctement, ce qui risque de le fatiguer. Aussi, plus l'inter-distance avec le véhicule précédent est faible, plus l'intensité de conduite sera dépendante de celle du véhicule précédent.

En vue de cela, nous tirons la conclusion que, lors de la conception d'un SAC, il est nécessaire de respecter une inter-distance acceptable ; plus on est proche du véhicule précédent, plus la non-cohérence dans l'accélération et l'à-coup du véhicule sera anxiogène. Ainsi, pour les niveaux d'automatisation de conduite où le conducteur doit garder son attention sur la route, il vaut mieux privilégier des inter-distances relativement importantes et les accompagner par des manœuvres dont les valeurs d'accélération et d'à-coup seront adéquates.

* * *

Bellem et al. (2018) ont réalisé une étude sur un simulateur de conduite dynamique²⁴, afin d'évaluer l'effet de l'application de profils d'accélération différents sur le ressenti du conducteur [19]. Cela a été fait sur des scénarios de conduite autonome. Ils ont pris en compte les traits de personnalité et le style de conduite reporté par les conducteurs eux-mêmes. Dans un contexte autoroutier, on a considéré trois scénarios différents, notamment : changement de voie, accélération et décélération derrière un véhicule. Lors de chaque scénario étudié, trois profils d'accélération différents ont été présentés aux participants, les variations entre les différents types de manœuvre étant associées à leur topologie et au niveau d'à-coup latéral ou longitudinal appliqué. L'ordre d'application des profils d'accélération associé à chaque scénario a été randomisé. Au total, 72 personnes (34 femmes et 38 hommes) ont participé à l'étude, leurs âges étant entre 21 et 66 ans. Les traits de personnalité ne semblent pas avoir une influence significative sur l'acceptation des profils de conduite automatisés, et le style de conduite semble avoir seulement un faible impact.

Concernant les scénarios de *changement de voie*, les participants ont subi un profil à fort niveau initial d'à-coup latéral, un autre à à-coup initial et final symétriques, et un dernier à fort à-coup final. Les participants ont manifesté une préférence pour la manœuvre à fort à-coup initial et un rejet assez marqué pour la manœuvre à fort à-coup final. Cela pourrait être expliqué par le fait que l'à-coup considérable en début de manœuvre donnerait au participant l'impression que le véhicule agit tôt face à la situation de conduite.

En relation aux *manœuvres d'accélération*, une logique similaire a été appliquée : les participants ont subi des profils d'accélération longitudinale dont l'une avait un fort à-coup initial, une autre été symétrique et une autre avait un fort à-coup final. Cette fois-ci, c'est la manœuvre symétrique qui a été fortement privilégiée par rapport aux deux autres ; la manœuvre à fort à-coup final a été, encore une fois, la moins appréciée. Une possible

²⁴. Ce qui veut dire que les participants ont eu un retour vestibulaire cohérent lors des expériences.

explication à la préférence pour la manœuvre symétrique est le fait que celle à la moindre valeur absolue pic d'à-coup de toutes les trois.

Finalement, en ce qui concerne les *manœuvres de décélération*, trois profils ont été présentés aux participants : un basé sur le modèle *Tau*²⁵ (Lee, 1976) qui, d'après la littérature, serait représentatif de la conduite réelle ; un profil dit *classique*, avec un plateau d'accélération entre deux transitoires, l'à-coup étant plus fort pour le transitoire initial que pour le final ; aussi, on a appliqué un profil *quasi-logarithmique* qui aurait un niveau d'à-coup réduit. Même si les niveaux d'acceptation des profils classique et quasi-logarithmique ont été assez proches, il y a eu une légère préférence pour le premier. D'autre part, l'approche Tau a été assez peu appréciée par les conducteurs. Nous nous permettons de suggérer que cela pourrait être dû au fait que sur ce profil, la durée d'application de l'à-coup est beaucoup plus importante que pour les deux autres profils, ce qui pourrait produire une réponse physiologique défavorable chez le sujet.

Les résultats de cette étude mettent en évidence le fait que, lors de la conception d'un SAC, on ne doit pas se limiter uniquement à la considération de critères statiques d'agrément mais que, au contraire, on doit faire attention à la topologie de la manœuvre de conduite qui sera appliquée. De manière assez intéressante, les conducteurs semblent avoir une préférence pour des profils d'accélération longitudinale symétriques ; cependant, les données disponibles ne permettent pas de généraliser cette affirmation à tout type de manœuvres.

* * *

Telpaz et al. (2018) ont conduit des roulages en contexte urbain, où des passagers pouvaient noter continuellement l'agrément de conduite à l'aide d'un dispositif électronique [214]. Leur étude montre l'importance du *respect des inter-distances adéquates* sur le ressenti du conducteur et la perception d'agrément de conduite.

* * *

Un autre phénomène assez intéressant sur le lien entre les retours visuels et vestibulaires est connu sur le nom de *Mal du Simulateur*. Il correspond à l'observation que certaines personnes présentent des nausées et d'autres symptômes lors de l'utilisation de simulateurs de conduite ; cela arrive uniquement sur des personnes ayant un fonctionnement normal de leur SV [104]. La théorie la plus importante affirme que cela est dû au manque de cohérence entre les informations visuelles, vestibulaires et somatosensorielles, ou en relation à des modèles internes basés sur des expériences précédentes [120, 175]. Le mal du simulateur mettrait donc en évidence la forte relation entre les différents retours sensoriels et des expériences préalables sur l'agrément de conduite.

Pour une exposition détaillée de l'utilisation de simulateurs de conduite, le lecteur est invité à consulter [67].

25. Le profil *Tau* est constitué de deux phases : la première, à à-coup constant (de même valeur que pour les autres profils) ; pour la deuxième phase l'à-coup change de signe et sa dérivée décroît légèrement avec le temps.

1.5 SYNTHÈSE : QU'AVONS NOUS APPRIS SUR L'AGRÈMENT DE CONDUITE

Objectif de la section

En tirer des principes pratiques pour la conception de fonctions de conduite respectueuses de l'agrément de conduite.

En vue de la discussion précédente, ainsi que des études empiriques et des échanges avec des ingénieurs en conception au sein de Renault S.A.S., nous proposons une synthèse des critères d'agrément à respecter lors de la conception de SAC. Certains de ces critères ont été confirmés par plusieurs études académiques, alors que d'autres sont des hypothèses plausibles, en vue des évidences disponibles et des discussions avec des personnes ayant de l'expertise dans le domaine.

- Il est possible de considérer deux types de ressenti, concernant l'agrément de conduite : d'une part, nous avons ce qui pourrait être appelé *ressenti viscéral* pouvant être défini, dans des termes informels comme *ce que l'on ressent avec ses tripes* ; cela fait référence à des sensations qui opèrent à peine au niveau conscient et qui sont très difficiles à rationaliser ou même à décrire en utilisant du langage. Les informations vestibulaires, perçues principalement, mais pas exclusivement, par le système vestibulaire, jouent un rôle essentiel sur l'agrément de conduite associé au ressenti viscéral. D'autre part, on peut imaginer une deuxième catégorie d'agrément, associée à ce que nous pouvons appeler *ressenti somatique* ; le pourquoi de la non-acceptabilité d'un stimulus appartenant à cette catégorie est beaucoup plus simple à expliquer et à interpréter. A titre d'exemple, lors qu'on conduit derrière un autre véhicule, on aura peur si on se sait trop près de celui-ci car on interprète qu'il s'agit d'une situation dangereuse [214] ; dans ce cas, on peut parler de ressenti somatique. Par contre, lorsqu'on utilise un régulateur de vitesse dont le comportement dynamique est bizarre, on sait qu'il y a un problème mais on peinera à identifier exactement ce qui ne va pas dans cette situation ; dans ce cas, nous avons à faire à du ressenti viscéral.

Nous proposons donc ces catégories inspirées de la physiologie des récepteurs sensoriels. Ainsi, lors de la conception d'un système de conduite automatique, **il est nécessaire de respecter en même temps des critères associés au ressenti somatique**, comme l'inter-distance avec le véhicule précédant, *et au ressenti viscéral*, tel les niveaux d'accélération et d'à-coup.

- En ce qui concerne le ressenti vestibulaire, le corps est principalement sensible à l'accélération et, plus encore, à l'à-coup. La vitesse n'est pas directement perçue par le corps et elle joue donc un rôle secondaire dans l'acceptabilité des manœuvres. De ce fait, **on doit considérer en priorité l'accélération et l'à-coup lorsqu'on s'intéresse à l'agrément de conduite**. Cependant, il existe des fortes interactions entre les différentes informations sensorielles ; en conséquence, la vitesse du véhicule, interprétée

- à partir des informations visuelles et sonores, jouerait un rôle sur l'interprétation des retours vestibulaires. Par exemple, on a trouvé que les valeurs acceptables d'accélération et d'à-coup diminuent lorsque la vitesse augmente [18].
- *L'inclinaison de la route a un effet sur la perception de l'accélération lorsqu'on conduit.* Cela est dû au fait que les organes otolithiques sont sensibles en même temps à l'accélération et à l'inclinaison de la tête. Pour tenir compte de ce phénomène, on pourrait déterminer une *accélération ressentie*, calculée dans le référentiel du conducteur, et dans laquelle il y aurait un terme d'accélération, qui modéliserait les retours vestibulaires associés à la pente de la route.
 - En ce qui concerne l'agrément de conduite, *il est nécessaire de considérer comme unité fonctionnelle la manœuvre de conduite.* Cette division est suffisamment fine pour garantir que l'agrément sera respecté à chaque instant du trajet, tout en gardant une vision suffisamment englobante pour tenir compte du contexte de conduite dans lequel on évolue. Aussi, cette approche est plus représentative de la manière de conduire, permettent d'avoir des fonctions de conduite plus intuitives et acceptables. En considérant les manœuvres, il est possible d'avoir accès à des critères de décision plus pertinents en relation à la situation de conduite à laquelle on doit faire face ; on doit se demander « Quel est l'objectif de cette manœuvre ? Qu'attend le conducteur ? » C'est un aspect qui est malheureusement négligé dans des nombreuses études.
 - *Les accélérations et les décélérations sont perçues différemment par le conducteur,* ce qui serait dû, au moins en partie, à la configuration dissymétrique de chaque macula utriculaire (cf. section II.1.2.1). Cela implique que les valeurs des critères d'agrément associés à des manœuvres d'accélération ne seraient pas les mêmes que celles associées à des décélérations.
 - Au moment de décider de l'acceptabilité d'une certaine manœuvre, *il est nécessaire de considérer simultanément les accélérations longitudinale et latérale.* Cela en raison du fait qu'un seul et même organe, l'utricule, est le principal responsable de la perception du mouvement sur le plan horizontal, ce qui veut dire que les accélérations (ou les à-coups) longitudinales et latérales, sont intimement liées à la perception de stimuli vestibulaires. De ce fait, un niveau d'accélération (ou d'à-coup) qui serait acceptable lors d'un roulage en ligne droite, pourrait ne pas l'être lorsqu'on engage un virage.
 - Dans une manœuvre, *il est nécessaire de considérer séparément les phases transitoires et stabilisées d'accélération.* L'acceptabilité des phases transitoires serait associée principalement à la valeur de l'à-coup, et celle des phases stabilisées à la valeur de l'accélération. Les seuils d'acceptabilité d'accélération et d'à-coup varient selon la phase dans laquelle on se trouve. Cela est justifié par l'existence de deux types de systèmes vestibulaires différents, le *soutenu* et le *transitoire*.
 - *La durée des phases transitoires et stabilisées d'une manœuvre aurait une influence sur les seuils d'à-coup et d'accélération acceptables,* respectivement. Cela serait dû au fait que la

durée d'application d'un stimulus aurait une influence sur la réponse physiologique du système vestibulaire, selon qu'il est montré sur [105, 106]. Cela implique que des seuils d'acceptabilité d'accélération et, encore plus, d'à-coup, seraient uniquement valables en-dessous d'une certaine durée d'application ; une valeur d'à-coup, acceptable si elle est appliquée pendant une certaine durée, pourrait ne pas l'être pour une durée d'application plus importante.

Aussi, tel qu'il a été montré sur [18], la *rapidité*²⁶ d'une manœuvre affecterait l'acceptabilité de celle-ci. Cela montre que **la durée totale de la manœuvre aurait un impact sur l'agrément de conduite.**

- **Les conducteurs sont spécialement sensibles à l'à-coup**, ce qui veut dire qu'une attention particulière doit être consacrée à maintenir cette variable sous des seuils acceptables. Ce phénomène serait dû au fait que les récepteurs sensoriels associés à la perception de phases transitoires d'accélération seraient plus enclins à saturer que leurs homologues associés aux phases stabilisés.
- **Les conducteurs ne sont pas en capacité de distinguer des très faibles variations d'accélération et d'à-coup.** Nous proposons que cela est dû à la variabilité dans la décharge des afférents vestibulaires, ce qui limiterait la résolution de l'accélération et de l'à-coup perceptibles. Müller et al. (2013) préconisent les seuils de variation perceptible suivants [147]: $0.1 [m/s^2]$ pour l'accélération et $1 [m/s^3]$ pour l'à-coup. Cependant, ces valeurs pourraient ne pas être applicables lors des longues périodes d'application du stimulus.
- **La topologie des manœuvres de conduite aurait une influence sur leur acceptabilité.** Ainsi, un SAC devrait générer des manœuvres dont la topologie soit suffisamment familière, ou facilement assimilable, pour que le conducteur l'accepte. Comme montré sur [19], certaines manœuvres peuvent bien respecter le confort de l'utilisateur, même si elles ont une topologie différente de celle à laquelle le conducteur est habitué.
- **L'inter-distance avec le véhicule précédent joue un rôle assez important sur l'acceptabilité des manœuvres [214].** Cela ferait partie du domaine du ressenti somatique. L'inter-distance jouerait aussi un rôle important sur l'effort que le conducteur doit appliquer pour avoir une conduite acceptable. En effet, pour avoir une conduite sécurisée lorsqu'on est assez proche du véhicule précédant, il est nécessaire d'être très réactif et de reproduire plus ou moins fidèlement le comportement de ce véhicule. Ainsi, lors de la conception d'une fonction qui assumerait une partie des opérations nécessaires à la conduite, le fait de garder une inter-distance relativement importante, pourrait réduire le niveau d'anxiété et l'effort mental demandé au conducteur. Par contre, une inter-distance trop importante, pourrait se traduire par une impression de passivité de la voiture et pourrait favoriser l'insertion d'autres conducteurs entre les deux véhicules.

26. La rapidité est le ratio entre l'accélération moyenne et la variation de vitesse longitudinales lors d'une manœuvre. Cette variable est informative de la durée de la manœuvre.

- **Les critères d'acceptabilité d'un conducteur varient selon son style de conduite.** D'après les résultats de [18] [97], cela se traduit par le fait que des utilisateurs ayant une conduite *intense*, ou *dynamique*, auraient une tendance à avoir des niveaux importants d'accélération et d'à-coup, en gardant des faibles inter-distances ; d'autre part, les conducteurs ayant une conduite plus *calme* préféreraient des niveaux modérés d'accélération et d'à-coup, avec des inter-distances plus importantes. Il y aurait donc une cohérence entre l'inter-distance et les niveaux d'accélération utilisés.
- **Les critères d'agrément de conduite varieraient selon le contexte de roulage.** Par exemple, [59] montre que lors de la conduite manuelle, le type de rue où l'on se trouve a un impact plus important sur le comportement du véhicule, que le type de conducteur. Cela met en évidence le besoin d'adapter le comportement dynamique du véhicule selon le contexte et la situation de conduite où l'on se trouve, afin de rester cohérent avec les attentes du conducteur.

Ces critères nous montrent l'importance de la prise en compte de l'agrément de conduite et le défi que représente la mise au point d'une fonction d'aide à la conduite. Nous pensons qu'un puissant levier pour respecter l'ergonomie automobile est le fait de définir une structure qui devrait orienter le déroulement des manœuvres. Cela aurait une double avantage : d'une part, en choisissant intelligemment la topologie des manœuvres de conduite, on peut avoir un comportement du véhicule beaucoup plus intuitif et acceptable ; aussi, une telle structure pourrait simplifier la phase de calibration de la fonction, tout en la rendant plus efficace.

Sur le chapitre suivant, nous proposons une approche de modélisation du conducteur et une topologie de manœuvre qui tient compte d'une grande partie des critères que nous venons de présenter, et qui serait donc avantageuse pour la conception d'un SAC respectueux de l'agrément de conduite.

MODÉLISATION DU CONDUCTEUR ET TOPOLOGIE DES MANŒUVRES DE CONDUITE

2

Objectif du chapitre

Décliner les critères d'agrément précédemment discutés sous forme d'un modèle facilement exploitable

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Modèle du conducteur prenant en compte l'agrément de conduite, exploitable pour des fonctions de commande*
- *Mécanismes pour la prise en compte de l'influence de la topologie de la route (pente, rayon de courbure) sur l'agrément de conduite*

Dans cette section, nous présenterons une approche de modélisation de la volonté du conducteur basée sur sa physiologie et, en particulier, sur le fonctionnement du SV. Cette modélisation permettra d'exprimer de manière explicite, et assez simple, une grande partie des critères d'agrément de conduite discutés précédemment. Plus tard dans ce document, nous décrirons comment une telle modélisation pourrait être implémentée dans une fonction embarquée.

Un concept qui mérite d'être développé, avant d'aller plus loin, est la notion de manœuvre. Dans le cadre de ce travail, nous retiendrons la définition opératoire suivante : *Une manœuvre correspond à la trajectoire d'un véhicule lui permettant de passer d'un état « quasi-stationnaire, » du point de vue du conducteur, à un nouveau état « quasi-stationnaire. »* Un état *quasi-stationnaire* est la situation dans laquelle l'utilisateur du véhicule aurait un retour vestibulaire minimal, et dans lequel le conducteur n'a pas d'action à faire, outre maintenir les commandes précédentes du véhicule. Cela correspondrait à des roulages en ligne droite où la vitesse est maintenue presque constante.

Pour définir une manœuvre, nous nous baserons sur le référentiel du conducteur, ce qui veut dire que le *maintien de vitesse lorsque la pente varie* est considéré comme une manœuvre, car le conducteur ressent une réponse physiologique et qu'il doit agir sur ses pédales afin de compenser l'effet de la pente. D'autres exemples de manœuvres sont : *accélération lors d'un changement de vitesse limite, accostage derrière un véhicule qui roule plus lentement, virage, changement de voie*. La plupart du temps, nous nous focaliserons sur des manœuvres de conduite longitudinales.

Pour représenter les manœuvres, nous nous baserons sur des profils d'accélération, car c'est cette variable qui est à l'origine des réponses vestibulaires. Nous considérerons deux catégories de manœuvre longitudinale : d'une part, une *manœuvre élémentaire*, ou *simple*, est celle où les seuls instants où la valeur de l'accélération est quasiment nulle sont le début et la fin de la manœuvre. Une conséquence directe de cela est le fait que dans une manœuvre simple la valeur de l'accélération ne change pas de signe. Par opposition, une *manœuvre composée* correspond aux situations dans lesquelles l'accélération s'annule (ou devient très faible) à un instant entre le début et la fin de la manœuvre. On peut voir une manœuvre composée comme une suite de manœuvres élémentaires.

Le principe de modélisation que nous proposons consiste à représenter les manœuvres comme des profils d'accélération, consistant en une suite de phases transitoires et stabilisées d'accélération. Les phases transitoires seront associées à la réponse physiologique du SVT, alors que les phases stabilisées le seront à la réponse du SVS. Nous présenterons aussi un cas particulier de topologie de manœuvre qui a un fort intérêt pour un certain nombre de situations de conduite.

2.1 REPRÉSENTATION DU SYSTÈME VESTIBULAIRE STABILISÉ (SVS)

Nous considérerons d'abord les phases stabilisées des manœuvres de conduite. La notion de *phase stabilisée* fait référence aux intervalles de temps à l'intérieur d'une manœuvre dans lesquels la valeur d'accélération subit une faible variation. Tel qu'il a été indiqué précédemment, les phases stabilisées sont associées aux réponses physiologiques du SVS.

Dans notre modèle, nous considérerons que lors des phases stabilisées l'accélération garde une valeur constante. Ainsi, pour pouvoir garantir l'agrément de conduite associé à cette phase, on doit s'assurer que l'accélération ne dépasse pas un certain seuil, pouvant être identifié empiriquement en faisant des tests sur un nombre représentatif d'utilisateurs.

Pour pouvoir utiliser l'hypothèse d'accélération constante, on doit garantir que, au moment d'appliquer cette phase lors d'un roulage réel, la valeur d'accélération restera à l'intérieur d'un seuil de tolérance, correspondant à la *différence à peine perceptible* par le conducteur (cf. section II.1.4). De la même manière, lors de cette phase, l'à-coup (le gradient de l'accélération) doit rester sous le seuil de perception du conducteur.

La Figure 2.1 représente les critères d'agrément associés à une phase stabilisée. La

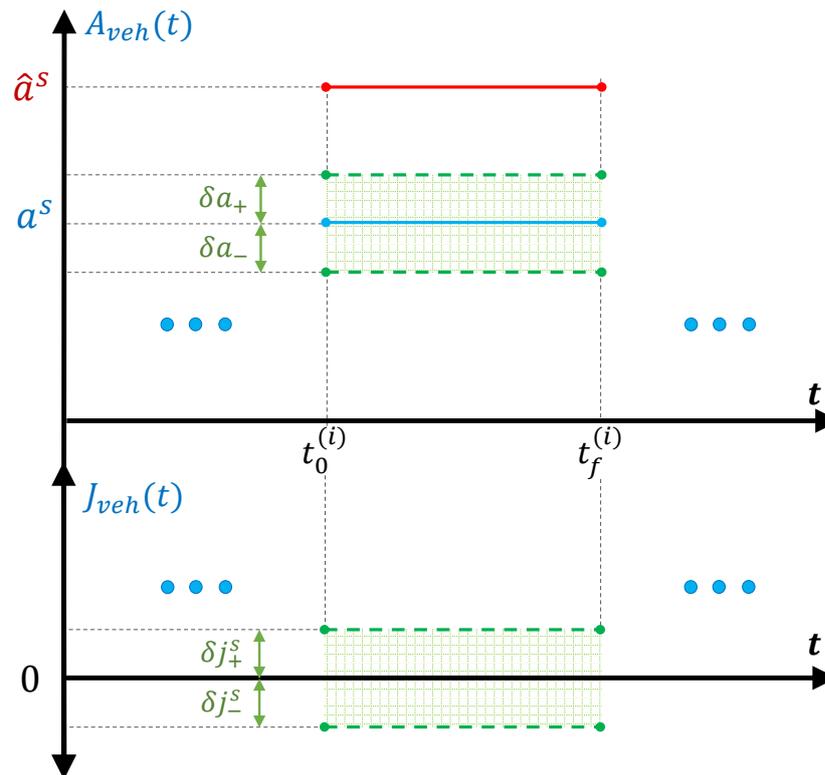


FIG. 2.1 – Modélisation de l'agrément de conduite des phases stabilisées de conduite, basée sur la physiologie du système vestibulaire. Haut : Accélération ; Bas : A-coup.

valeur a^s correspond à l'accélération nominale de cette phase, qui traduirait la réponse moyenne du système vestibulaire, lors d'une accélération longitudinale. Pour qu'une manœuvre soit considérée acceptable par le conducteur, à aucun moment pendant la phase, la valeur de a^s ne doit dépasser un certain seuil \hat{a}^s . Ce seuil peut être identifié empiriquement en faisant des tests contrôlés, et sa valeur peut dépendre d'un certain nombre de facteurs comme le type de scénario associé.

La limitation dans la capacité du conducteur à distinguer entre deux valeurs d'accélération stabilisée qui sont très proches, est traduite par deux seuils, δa_- et δa_+ , dont la valeur est potentiellement différente. Avoir deux seuils distincts, plutôt qu'un seul, traduit la dispersion dans les réponses des afférents vestibulaires [74], ainsi que la légère différence entre la capacité d'un conducteur de distinguer une variation croissante de l'accélération, et celle pour distinguer une variation décroissante, comme montré sur [147].

Sur chaque phase stabilisée l'à-coup doit rester faible afin de ne pas perturber le conducteur. Il est donc nécessaire de s'assurer que, tout au long de cette phase, la valeur d'à-coup reste confinée entre deux seuils, un supérieur et un inférieur, δj_-^s et δj_+^s respectivement.

Une dernière considération est la potentielle dissymétrie entre la perception de l'agrément lors d'une accélération et lors d'une décélération. Ce serait associé à la configuration de la macula utriculaire, ainsi qu'au placement du conducteur sur le siège (lors des accélérations, on est « poussé » par son siège, alors que dans les décélérations on tend à

décoller du siège et on est « retenu » par sa ceinture). Ainsi, lors des décélérations, on suivra une représentation analogue, dont la seule différence est le fait que la limite d'acceptabilité est traduite par un seuil inférieur de décélération, \hat{a}^s , dont la valeur absolue est potentiellement différente de celle de \hat{a}^s .

2.2 REPRÉSENTATION DU SYSTÈME VESTIBULAIRE TRANSITOIRE (SVT)

Tel qu'indiqué précédemment, le SVT a une grande sensibilité à l'à-coup, plutôt qu'à la valeur pic d'accélération. Sa réponse dépendra donc principalement de l'amplitude de l'à-coup, mais elle peut dépendre aussi de la durée de la phase transitoire [23, 92, 105, 106].

La Figure 2.2 illustre la modélisation d'une phase transitoire d'accélération. Pour représenter le SVT, nous considérerons que, lors des transitoires, l'accélération varie de manière assez uniforme, ce qui correspond à un à-coup relativement constant, J^{tr} . Pour qu'une manœuvre soit considérée comme acceptable, l'à-coup ne doit pas dépasser une amplitude limite, \hat{j}^{tr} , dont la valeur peut être retrouvée de manière empirique.

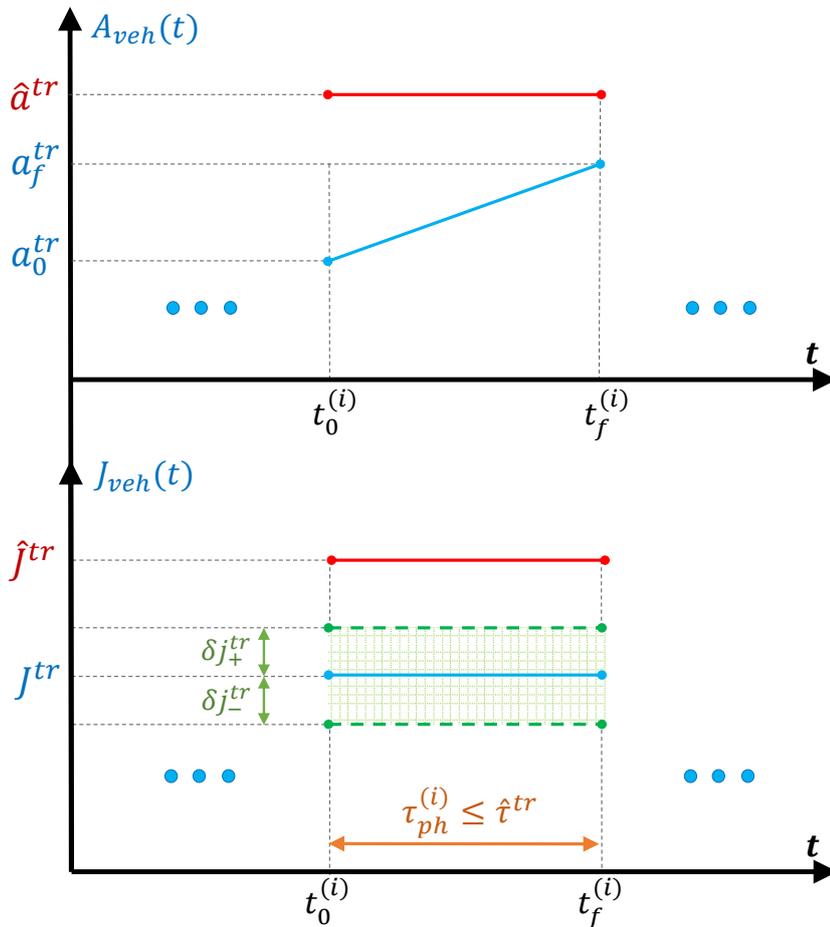


FIG. 2.2 – Modélisation de l'agrément de conduite des phases transitoires de conduite, basée sur la physiologie du système vestibulaire. Haut : Accélération ; Bas : A-coup.

De plus, étant donné que la réponse du système vestibulaire transitoire semble dé-

pendre de la durée du stimulus (cela est compatible avec des observations empiriques faites chez Renault et [105, 106]), nous introduisons une durée maximum, $\hat{\tau}^{tr}$, que la phase transitoire ne doit pas dépasser. Il faut considérer cependant que, d'un point de vue physiologique, l'amplitude et la durée de la phase transitoire influeraient toutes les deux la même réponse du système nerveux (ou, du moins, elles influencent toutes les deux le VsEP), faisant que les valeurs de \hat{J}^{tr} et $\hat{\tau}^{tr}$ dépendent l'une de l'autre et on se doit de les déterminer en même temps. Une autre possibilité, plus élaborée, est de considérer qu'une fonction (une ellipse, par exemple) relierait les deux valeurs, sous la forme $\hat{J}^{tr} = f(\hat{\tau}^{tr})$. La pertinence de cette approche sera étudiée dans le chapitre suivant.

Aussi, de manière analogue aux phases stabilisées, il y a des marges de tolérance à l'intérieur desquelles un humain serait incapable de détecter de variations de l'à-coup [147]. Ce seuil est donnée par les valeurs de δj_{-}^{tr} et δj_{+}^{tr} . Encore une fois, ces valeurs peuvent être déterminées en faisant des essais empiriques sur des conducteurs.

La Figure 2.2 propose une synthèse de la représentation proposée. De même que dans le cas du SVS, le SVT a potentiellement un comportement dissymétrique concernant les accélérations et les décélérations. De ce fait, dans le cas des à-coups négatifs, on aurait une borne inférieure, \check{J}^{tr} , dont la valeur absolue différerait de celle de \hat{J}^{tr} .

2.3 REPRÉSENTATION D'UNE MANŒUVRE ÉLÉMENTAIRE

Dans notre représentation, une manœuvre sera donc décomposée en une suite de phases transitoires et stabilisées, les premières associées au SVT et les secondes au SVS. Une manœuvre peut ainsi être représentée comme une fonction affine par morceaux donc les différents segments correspondraient aux différentes phases.

La Figure 2.3 présente un exemple de profil d'accélération utilisant la représentation proposée. Sur la figure, chaque phase de la manœuvre a un indice $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ et il lui est associé quatre paramètres : $a_0^{(i)}$, $a_f^{(i)}$, $J^{(i)}$, $\tau_{ph}^{(i)}$. Lorsqu'on a à faire à une phase stabilisée, nous avons les conditions, $J^{(i)} = 0$ et $a_0^{(i)} = a_f^{(i)}$, ce qui veut dire qu'on doit définir uniquement une valeur d'accélération et la durée de la manœuvre. Dans le cas des manœuvres associées au SVT, comme l' i -ème manœuvre de la figure, un des paramètres dépendra du choix des trois autres ; on peut par exemple choisir des valeurs pour $a_0^{(i)}$, $a_f^{(i)}$ et $J^{(i)}$ et calculer ensuite la valeur de $\tau_{ph}^{(i)}$ correspondante.

Nous présenterons, à titre d'exemple, deux types de manœuvres qui pourraient être représentées avec la méthode proposée.

2.3.1 Exemple de manœuvre : changement de rapport de vitesse d'un véhicule conventionnel

Pour représenter un changement de rapport d'une boîte de vitesses, on peut utiliser un enchaînement de trois phases, selon le séquençage qui suit :

- **Phase 1** : phase transitoire ; ouverture de l'embrayage.

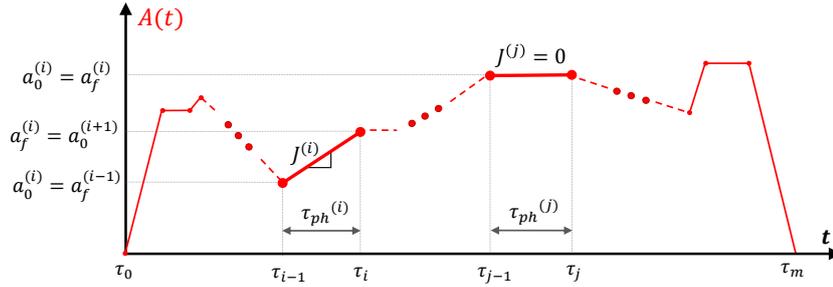


FIG. 2.3 – Modélisation générale des manœuvres de conduite, basée sur la physiologie du système vestibulaire.

- **Phase 2**: phase stabilisée; désengagement du rapport courant et engagement du nouveau rapport.
- **Phase 3**: phase transitoire; fermeture de l’embrayage.

Ainsi, les contraintes sur le profil d’accélération associées à l’agrément de conduite seraient celles exprimées sur la figure 2.4.

Pour la première phase, pendant l’ouverture de l’embrayage, on doit s’assurer que ni l’accélération ni l’à-coup ne descendent en dessous des seuils \check{a}^{tr} et \check{j}^{tr} , respectivement; on doit aussi garantir que pendant cette phase, en dehors des transitoires, l’à-coup reste à l’intérieur du seuil de tolérance défini par δj_-^{tr} et δj_+^{tr} . Finalement, cette phase ne doit pas dépasser une durée τ_{ph1}^{tr} . Un levier sur lequel on pourrait jouer pour respecter ces conditions est la vitesse d’ouverture de l’embrayage.

Ensuite, pendant la phase de changement de rapport, le véhicule subira une décélération due au fait que l’embrayage reste ouvert entre le désengagement du rapport courant et l’engagement du nouveau rapport. On doit s’assurer que l’accélération moyenne pendant cette phase ne descende pas en dessous d’une valeur \check{a}^s et on doit aussi rester à l’intérieur de la zone de tolérance définie par δa_- et δa_+ . L’à-coup pendant cette phase doit respecter la condition $-\delta j_-^s \leq J_{veh} \leq \delta j_+^s$.

Finalement, lors de la dernière phase, correspondant à la fermeture de l’embrayage, l’à-coup résultant ne doit pas dépasser le seuil \hat{j}_{ph3} et doit aussi rester dans la zone de tolérance définie par δj_-^{tr} et δj_+^{tr} . L’accélération ne doit pas descendre en dessous de \check{a}^{tr} et la durée de cette phase ne doit pas être supérieure à $\hat{\tau}_{ph3}^{tr}$. Pour garantir le respect de ces conditions, on peut agir sur le choix du rapport, le régime et le couple du moteur et la vitesse de fermeture de l’embrayage.

2.3.2 Exemple de manœuvre: accélération (positive ou négative) à vitesse non-nulle

Cette approche de modélisation permet aussi de représenter des manœuvres d’accélération à partir d’une vitesse non-nulle. Par la suite, nous présenterons une manœuvre élémentaire. Nous considérerons ici une topologie assez simple: un plateau d’accélération entre deux phases transitoires, ce qui résulte en un *trapèze d’accélération* (Figure 2.5). Malgré son apparente simplicité, ce modèle devrait permettre de représenter un certain

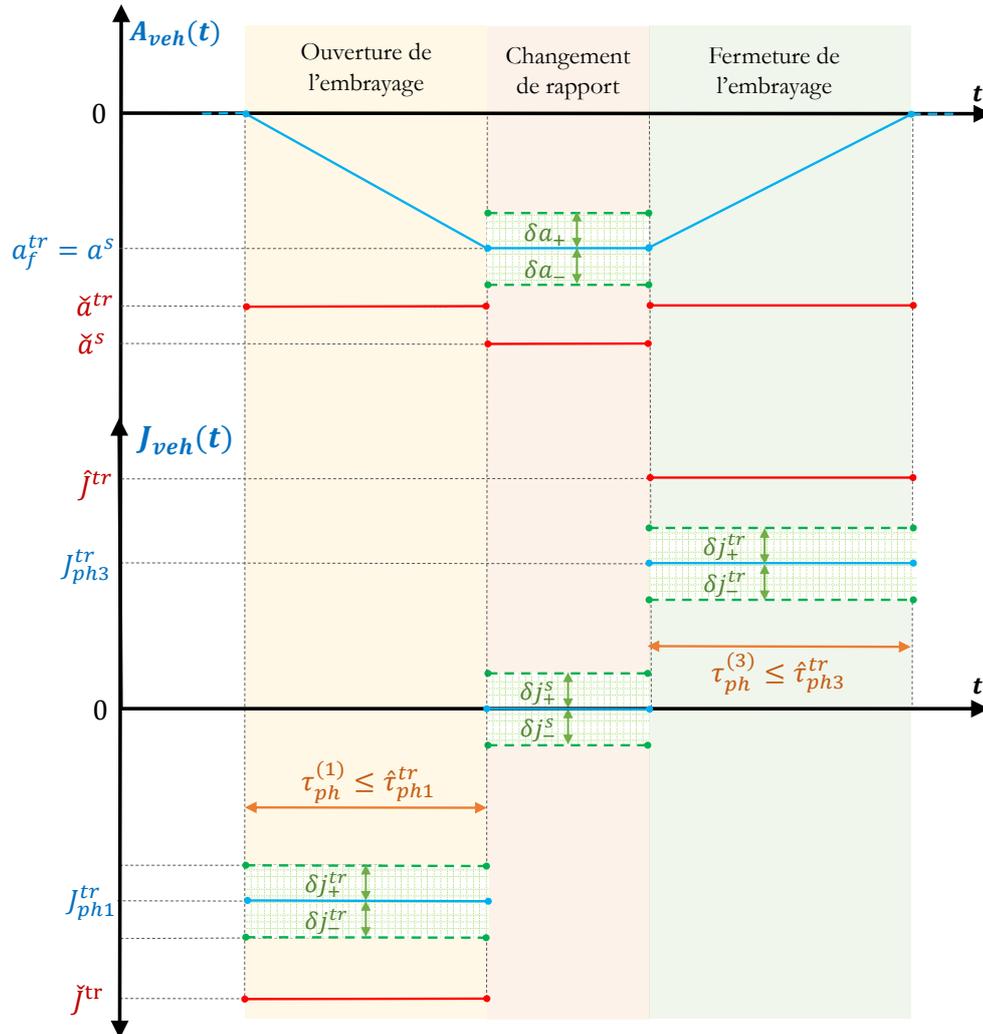


FIG. 2.4 – Exemple de modélisation de manœuvre : changement de rapport de boîte de vitesses d'un véhicule conventionnel

nombre de situations de conduite, d'autant plus qu'il est possible de combiner plusieurs trapèzes pour représenter des manœuvres composées. Même si la figure illustre un trapèze dont la valeur initiale et la valeur finale sont nulles, dans le cas général, ces valeurs pourraient aussi être différentes de zéro.

Parmi les types de manœuvres pouvant être représentés par cette topologie, nous pouvons, sans être exhaustifs, mentionner :

- Transition entre deux vitesses réglementaires sur une portion de route à iso-pente et en ligne droite.
- Transition de prise en compte d'une variation de pente à iso-vitesse
- Accostage derrière un véhicule plus lent suite à une phase de roulage à vitesse constante
- La manœuvre de la section II.2.3.1.

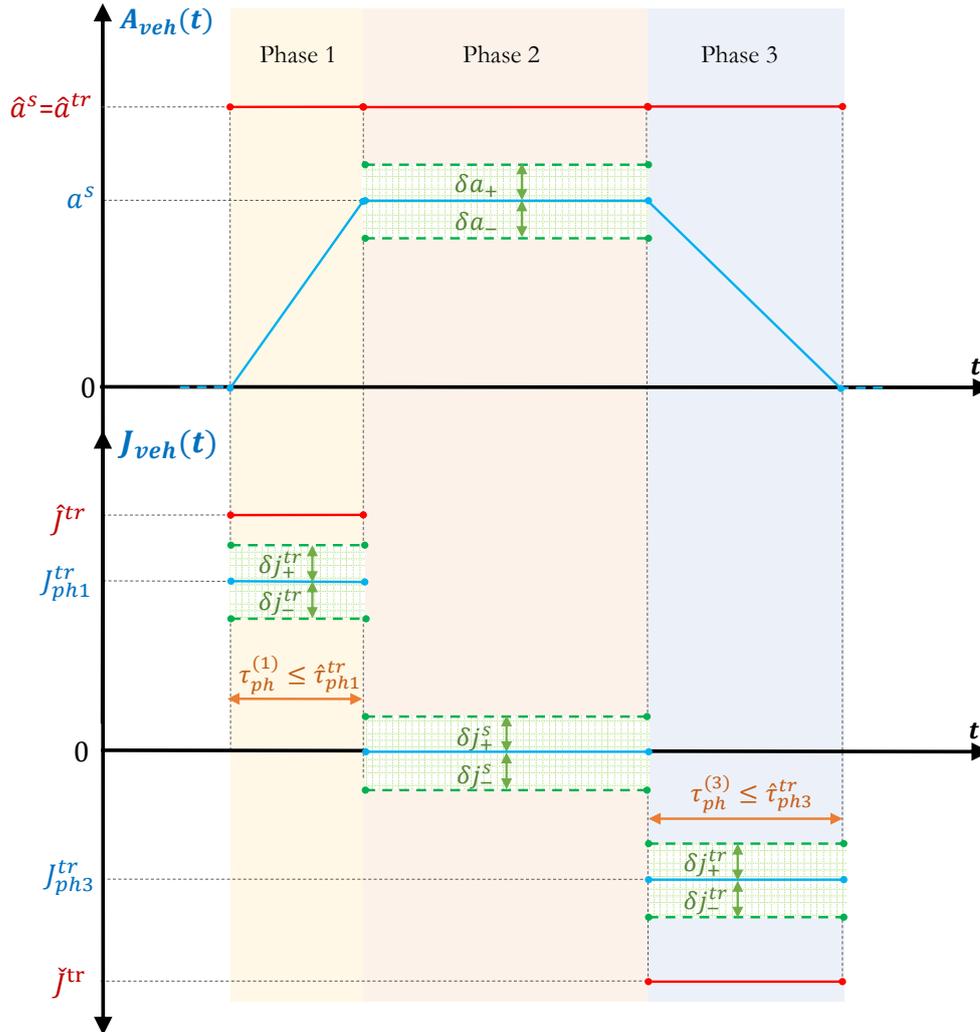


FIG. 2.5 – Exemple de manœuvre : accélération (ou décélération) à vitesse non-nulle

En ce qui concerne les manœuvres simples, nous pouvons définir trois phases :

- **Phase 1 :** phase transitoire ; amorçage de la manœuvre, associable, dans le cas des accélérations, à la pression de la pédale d'accélération.
- **Phase 2 :** phase stabilisée ; plateau d'accélération, maintien de la pédale d'accélération (ou de frein) dans une position relativement constante.
- **Phase 3 :** phase transitoire ; finalisation de l'accélération, associée au relâchement de la pédale d'accélération jusqu'à une position d'équilibre.

Pour la première phase, on doit garantir que l'à-coup ne dépasse pas un seuil positif, \hat{j}^{tr} , ou négatif, \check{j}^{tr} , selon qu'il s'agisse d'une manœuvre d'accélération ou de décélération, respectivement. L'à-coup doit aussi se retrouver, en dehors des transitions, à l'intérieur d'une certaine zone autour de sa valeur moyenne, définie par les valeurs de δj_-^{tr} et δj_+^{tr} , tel que montré sur la Figure 2.5.

Pendant la phase stabilisée, on doit garantir que la valeur moyenne de l'accélération ne dépasse pas un certain seuil, \hat{a}^s , positif pour les manœuvres d'accélération, et \check{a}^s , négatif

pour les manœuvres de décélération. Aussi, il faut que l'à-coup reste à l'intérieur de la plage $[\delta j_-^{tr}, \delta j_+^{tr}]$.

Finalement, la phase finale est analogue à la phase initiale : la valeur de l'à-coup ne doit pas dépasser un certain seuil, \check{j}^{tr} ou \hat{j}^{tr} , de signe contraire à celui de la première phase. L'accélération doit être aussi inférieure à $\hat{a}^{tr} = \hat{a}^s$ pour les manœuvres d'accélération (et supérieure à $\check{a}^{tr} = \check{a}^s$ pour les décélérations). La durée de cette phase ne doit pas dépasser la valeur τ_{ph3}^{tr} .

Cette modélisation des manœuvres a l'avantage de prendre en compte en même temps les réponses physiologiques du SVT et du SVS. Aussi, le modèle est suffisamment simple pour pouvoir penser à une implémentation en temps réel, tout en restant applicable à un certain nombre de situations de conduite. Ainsi, nous proposons que ce modèle trapézoïdal d'accélération est une topologie de manœuvre pertinente pour la conception de SAC. Cela a fait l'objet de la demande de brevet *FR 1908973* (en attente d'acceptation).

Cela dit, il est nécessaire de signaler que, pour certaines manœuvres ou situations de conduite, un profil trapézoïdal d'accélération pourrait ne pas offrir une représentation pertinente. En revanche, ce modèle devrait tenir compte d'une bonne partie de la diversité de scénarios de conduite, tout en restant exploitable pour la conception de *fonctions d'aide à la conduite*. L'étude de la pertinence de cette modélisation, ainsi que son paramétrage, feront l'objet du Chapitre II.3. Sur la partie IV, nous proposerons une architecture d'algorithme permettant de faire une implémentation temps réel, tout en minimisant la consommation, dans le cas d'un véhicule électrique.

2.4 PRISE EN COMPTE DE PHÉNOMÈNES ALTÉRANT LA PERCEPTION DU CONDUCTEUR, ET LEUR TOLÉRANCE AUX STIMULI

Tel qu'il a été précédemment mentionné, certains phénomènes peuvent influencer la perception du conducteur ; d'autres peuvent affecter ces seuils de tolérance face à certains stimuli. La distinction entre les phénomènes ayant une influence sur la perception et ceux qui affectent la tolérance du conducteur est assez floue, d'autant plus que, dans certains cas, les deux effets peuvent avoir lieu simultanément. Cependant, nous avons décidé de garder cette distinction car elle s'avère utile pour la prise en compte des phénomènes en question lors de la conception d'un SAC.

Dans cette section nous discuterons de la prise en compte de ces aspects pour la définition de critères d'agrément de conduite. Nous traiterons d'abord les phénomènes pouvant influencer la perception de l'accélération, en nous focalisant sur *l'inclinaison de la route*. Ensuite, nous discuterons de l'effet de la vitesse du véhicule sur la tolérance du conducteur à l'accélération et à l'à-coup. Finalement, nous discuterons de l'impact de l'accélération latérale sur la tolérance du conducteur à l'accélération longitudinale.

Afin de faciliter la compréhension ainsi que l'exploitation des informations, nous avons décidé de ne pas avoir une notation générale englobant les différents aspects discu-

tés ci-dessous. Chaque phénomène a donc été traité indépendamment. La prise en compte simultanée de tous les phénomènes consiste juste en la combinaison des différents modèles, avec une adaptation de la notation employée.

2.4.1 Phénomènes affectant la perception du mouvement

En plus de l'accélération longitudinale du véhicule (que l'on pourrait définir comme étant l'accélération du centre de masse de la caisse, moyennée sur une petite fenêtre de temps), le conducteur subit d'autres phénomènes pouvant altérer la perception de sa propre accélération. Nous pouvons mentionner, sans être exhaustifs :

- **Inclinaison de la route** : comme vu sur la section II.1.1, lorsque la tête du conducteur est inclinée, ses OO peuvent générer une réponse physiologique similaire (mais pas forcément identique) à celle due à une accélération linéaire. De ce fait, l'inclinaison de la route peut avoir un effet non négligeable sur le ressenti du conducteur.
- **Vibrations de la caisse** : comme le conducteur est attaché à son siège, avec les mains sur le volant et les pieds sur les pédales ou sur le plancher, il subit une importante partie des vibrations de la caisse. Cela stimulerait son système vestibulaire, risquant d'affecter sa perception et sa sensibilité au mouvement.
- **Historique du ressenti** : tel que nous l'avons vu à plusieurs endroits, il semble exister des phénomènes d'adaptation du système vestibulaire, en fonction des stimuli précédents. C'est par exemple le cas des astronautes de la mission NeuroLab, qui croyaient être penchés suite à l'application d'un stimulus vestibulaire, même si le stimulus n'était plus appliqué [34]. Ainsi, le conducteur pourrait être plus ou moins sensible aux accélérations, en fonction du comportement de son véhicule lors de manœuvres précédentes.

Pour la prise en compte de ces phénomènes, nous définissons l'accélération ressentie du conducteur, correspondant à la perception du conducteur, dans son propre référentiel longitudinal, en présence des phénomènes que nous venons de mentionner. Nous ferons l'hypothèse que, grossièrement, sa réponse physiologique serait la même que celle qui aurait lieu s'il subissait uniquement une accélération longitudinale a_{cond}^{long} . Cette représentation s'inspire d'idées discutées sur [34, 146]. De manière générale, a_{cond} pourrait être représentée de la manière suivante :

$$a_{cond}^{long}(t) = f \left(a_{long}(t), a_{bruit}(t), \alpha_r(X_{veh}(t)), \left[a_{cond}^{long}(t), \ddot{a}_{cond}^{long}(t), \dots, \frac{\partial^k a_{cond}^{long}}{\partial t^k}(t) \right]^T \right) \quad (2.1)$$

Où, a_{long} correspond à l'accélération longitudinale du véhicule, a_{bruit} correspond à l'effet des vibrations de la caisse sur le ressenti du conducteur (supposée assimilable à une accélération) et α_r est la pente de la route (variant en fonction de la position du véhicule X_{veh}). L'effet de l'historique de perception est représenté sur l'équation par la prise en compte des dérivées temporelles de a_{cond}^{long} jusqu'à l'ordre k .

Pour simplifier la modélisation, nous pouvons faire l'hypothèse que, dans des conditions de roulages normales, les phénomènes perturbateurs de la perception auraient des effets modérés qui seraient indépendants entre eux ; le *Principe de superposition* serait donc applicable. Ainsi, il est possible d'approximer a_{cond} par (2.2), où a_{pente} est l'accélération équivalente due à l'effet de la pente sur le SV et a_{hist} est l'effet de l'historique sur la perception de l'accélération.

$$a_{cond}^{long}(t) \approx a_{long}(t) + a_{bruit}(t) + a_{pente}(\alpha_r(X_{veh}(t))) + a_{hist} \left(\left[\dot{a}_{cond}^{long}(t), \dots, \frac{\partial^k a_{cond}^{long}}{\partial t^k}(t) \right]^T \right) \quad (2.2)$$

De plus, nous allons considérer que, pour des amplitudes raisonnables de vibration de la caisse, le cerveau réalise un filtrage de celui-ci. Nous pouvons donc négliger a_{bruit} , à condition que les seuils d'agrément soient déterminées dans des conditions de vibration représentatives des roulages sur véhicule. Pour ce faire, on pourrait tout simplement utiliser des roulages réels ; il est possible aussi d'utiliser des simulateurs de conduite, à condition de stimuler le conducteur avec un bruit proche de celui qu'il subirait au volant de son véhicule.

Nous considérerons aussi que, pour de faibles inclinaisons de la route, l'effet sur perception de l'inclinaison de la route est beaucoup plus important que celui dû à l'historique de perception, qui peut donc être négligée. Ainsi, l'accélération ressentie reviendrait à :

$$a_{cond}^{long}(t) \approx a_{long}(t) + a_{pente}(\alpha_r) \quad (2.3)$$

Finalement, en négligeant l'inclinaison de la caisse par rapport aux axes des roues (qui serait donc parallèle à la route), nous pouvons approximer le calcul de l'accélération ressenti par (2.4), où g correspond à l'accélération due à la pesanteur. Cette approximation est valable pour des faibles valeurs de pente, ce qui est le cas pour la plupart de situations de roulage.

$$a_{cond}^{long}(t) \approx a_{long}(t) + g \cdot \sin(\alpha_r) \quad (2.4)$$

Des formulations plus complexes pourraient être utilisées, mais nous considérons que dans un premier temps, et pour des faibles inclinaisons, cette formulation permet de considérer grossièrement l'influence du contexte sur la perception du conducteur.

2.4.2 Phénomènes affectant la tolérance au mouvement

Un même conducteur peut être plus ou moins sensible aux accélérations en fonction d'un certain nombre de conditions extérieures. Celles-ci peuvent avoir des origines diverses et variées : certaines peuvent avoir une origine émotionnelle (*est-ce que le conducteur est stressé?, est-il triste, ou anxieux?*); d'autres pourraient être associées aux motivations pour lesquelles on se déplace et des conditions dans lesquelles on le fait (*se trouve-t-on dans un bouchon?, se déplace-t-on pendant le week-end ou on va au travail?, est-on conducteur ou passager?*); aussi, on peut avoir à faire à des situations de roulage différentes (*est-on en train de faire un virage? un dépassement?, roule-t-on sur une autoroute ou en ville?*).

Il existe une toute une panoplie affectant la perception du conducteur ; de plus, il est évident que les facteurs que nous venons de mentionner dépendent fortement les uns des autres (par exemple, le fait d'être coincé dans un bouchon peut être une source de stress). La considération simultanée de tous ces facteurs est loin d'être un problème trivial. Dans le cadre de ces travaux, nous nous considérerons uniquement l'effet sur l'agrément de deux facteurs de conduite : la vitesse du véhicule et son accélération latérale.

* * *

Tel qu'indiqué précédemment, des études empiriques montrent que, lors de la conduite à des vitesses importantes, les niveaux d'accélération et d'à-coup diminuent [18]. Il est possible que cela soit dû, en partie, aux limitations dynamiques du véhicule ; cependant, les conducteurs peuvent avoir aussi une moindre tolérance aux mouvements intempestifs quand leurs retours visuels et sonores leur indiquent qu'ils se déplacent à des vitesses importantes.

Il est donc nécessaire de tenir compte de ce phénomène lors de la définition de critères d'agrément de conduite. Pour ce faire, il suffit d'introduire une dépendance entre les différents seuils d'accélération, qui pourraient être enregistrés dans le calculateur sous forme de cartographies. Ainsi, les différentes valeurs limites pourraient être déterminées comme suit :

$$\begin{aligned} \check{a}^{tr} &= f^{\check{a}^{tr}}(V_{veh}) \\ \check{a}^s &= f^{\check{a}^s}(V_{veh}) \\ \hat{a}^{tr} &= f^{\hat{a}^{tr}}(V_{veh}) \\ \hat{a}^s &= f^{\hat{a}^s}(V_{veh}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Avec V_{veh} étant la vitesse longitudinale du véhicule (encore une fois, l'influence des mouvements latéraux étant considérée de manière indépendante). Une procédure similaire peut être appliquée concernant les valeurs limites d'à-coup.

* * *

Ensuite, nous allons considérer l'influence de l'accélération latérale sur la tolérance du conducteur à des accélérations longitudinales. Comme discuté auparavant, du fait que c'est le même organe, l'utricule, qui perçoit les informations sur les mouvements longitudinaux et latéraux, il est assez probable que le conducteur tolère moins bien des niveaux importants d'accélération longitudinale, si des mouvements latéraux ont lieu en même temps, comme c'est le cas lors de virages ou de dépassements.

Sur [146], il est présenté la notion de *potentiel d'adhésion*, a_{pot} , étant tout simplement la norme euclidienne du vecteur d'accélération sur le plan horizontal (qui a pour composantes les accélérations latérale et longitudinale, cf. (1.2)). En s'inspirant de ce principe, il est possible de définir une valeur limite, \hat{a}_{pot} , que le potentiel d'adhésion ne devrait pas dépasser. Cela revient à imposer au vecteur d'accélération sur le plan horizontal de rester confiné à l'intérieur d'un cercle de rayon unitaire. Cependant, utiliser cet indicateur *en l'état*, implique que les accélérations latérales auraient le même degré d'influence sur le

ressenti vestibulaire ; or la configuration dissymétrique des maculas otolithiques laissent penser autre chose.

Nous proposons alors une approche plus générale, en confinant le vecteur d'accélération sur le plan horizontal, doit être confiné à l'intérieur d'une frontière de potentiel d'adhésion, définissable en coordonnées polaires, comme illustré sur la Figure 2.6a. Cependant, pour une implémentation embarquée, il est plus intéressant de décliner cette frontière sous forme des deux limites d'accélération longitudinale, une supérieure et une inférieure, \hat{a}_{long} et \check{a}_{long} , qui dépendraient de l'accélération latérale, comme montré sur la Figure 2.6b. Ainsi, pour une valeur d'accélération latérale donnée, pouvant être estimée à partir de la vitesse du véhicule et de la courbure de la route, il est possible de déterminer les seuils acceptables d'accélération latérale à partir de (2.6).

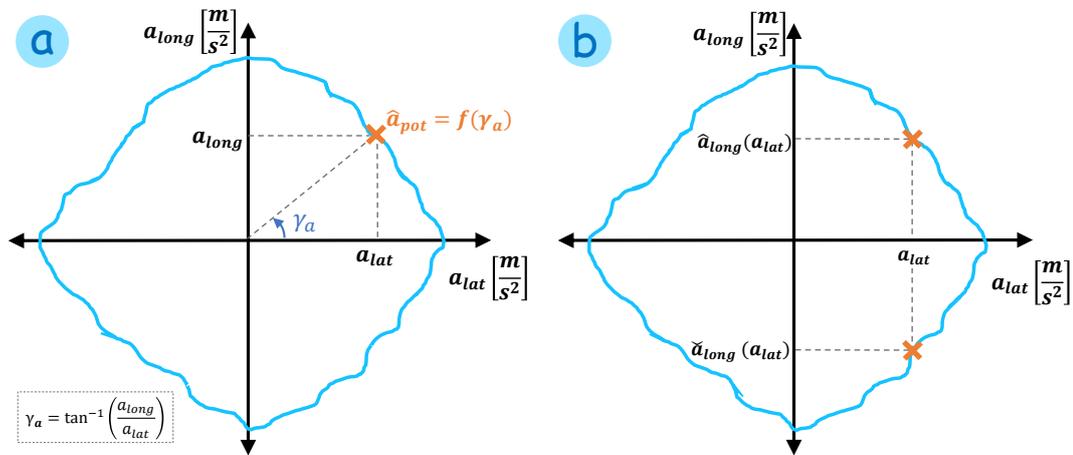


FIG. 2.6 – Modélisation de limites d'acceptabilité de l'accélération longitudinale en fonction de la valeur d'accélération latérale. (a) Représentation en coordonnées polaires ; (b) représentation proposée.

$$\begin{aligned} \hat{a}_{long} &= f^{\hat{a}_{long}}(a_{lat}) \\ \check{a}_{long} &= f^{\check{a}_{long}}(a_{lat}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Des raisonnements similaires à ceux qui viennent d'être présentés peuvent s'appliquer dans le cas de l'à-coup. Un autre approche est présentée sur [176], où les auteurs proposent de caractériser l'agrément de conduite par une fonction de coût dépendant des à-coups latéral et longitudinal.

AU VOLANT DE SON VÉHICULE : ANALYSE DE ROULAGES RÉELS

3

Objectif du chapitre

A partir de données issues de roulages en situation réelle, valider le modèle de manœuvres proposé et identifier des paramètres pour celui-ci

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Méthodologie pour le traitement des signaux de roulages en situation réelle*
- *Méthode d'identification du modèle des manœuvres à partir des données de roulage*
- *Validation du modèle des manœuvres à partir des données empiriques*
- *Analyse des paramètres cinématiques des manœuvres réelles pour la détermination de critères quantitatifs d'agrément de conduite*
- *Modèle caractérisant la dépendance entre la durée des phases transitoires et la sensibilité à l'à-coup*

Pour pouvoir exploiter le modèle que nous venons de présenter, il est nécessaire de valider sa pertinence. Nous devons déterminer aussi des valeurs pour les différents paramètres du modèle, qui soient représentatives de la conduite en situation réelle. Cette tâche peut s'avérer compliquée dans la mesure où, tel que nous l'avons vu, l'agrément de conduite semble être dépendant de la situation et des conditions de roulage. Ainsi, la façon la plus pertinente d'aboutir à notre objectif semble être l'utilisation de données réelles de conduite, dans lesquelles le conducteur était positionné sur le siège d'un vrai véhicule, dans un contexte réel de roulage.

Dans cette section, nous présenterons une méthodologie permettant de renseigner pertinemment les paramètres de notre modèle des manœuvres de conduite, ainsi que d'explorer les limites de cette modélisation. Pour ce faire, nous avons analysé des roulages issus d'une campagne d'essais d'un véhicule instrumenté, se déplaçant entre Guyancourt

et Versailles (France), ainsi qu'à l'intérieur de ces villes. La durée totale des roulage a été de 3470,14 s, sur deux journées séparées d'essais, avec un nombre limité de conducteurs¹. Afin d'obtenir les informations relatives au véhicule hôte, celui-ci a été équipé d'encodeurs au niveau des roues, produisant une estimation de la vitesse du véhicule ; de plus, un accéléromètre multi axes a fourni des signaux d'accélération longitudinale et latérale du véhicule. Les informations associées au trafic ont été obtenues à partir de trois caméras situées à la partie frontale du véhicule (une caméra centrale plus une autre de chaque côté) ; nous avons travaillé avec les signaux consolidés, issus de la fusion des mesures des trois appareils. Des mesures du radar frontales étaient aussi disponibles mais, leur interprétation étant plus difficile, nous nous sommes limités à exploiter les données issues des caméras. En plus des signaux, nous avons eu accès à des enregistrements vidéo des trois caméras frontales, nous permettant de mieux comprendre le contexte de roulage.

La méthodologie proposée intègre les étapes suivantes :

- 1 Traitement des signaux et estimation de l'accélération et de l'à-coup
- 2 Extraction d'exemples de manœuvres réelles de conduite à partir des enregistrements
- 3 Approximation trapézoïdale des manœuvres de conduite (par identification)
- 4 Analyse des paramètres des manœuvres

3.1 TRAITEMENT DE DONNÉES : FILTRAGE ET ESTIMATION DE LA DÉRIVÉE DE SIGNAUX À ÉCHANTILLONNAGE NON-UNIFORME

Objectif de la section

Obtenir des signaux acceptables de vitesse, accélération et d'à-coup, à partir de roulages réels

Tel que nous l'avons vu sur le Chapitre II.1, l'accélération et l'à-coup sont des grandeurs déterminants pour l'agrément de conduite. Nous devons donc analyser leur comportement lors de scénarios réels de conduite. En ce qui concerne l'accélération, nous avons eu à disposition un accéléromètre ; cependant, ce type de capteur est sensible à l'effet de l'inclinaison de la route. De ce fait, il peut être intéressant d'estimer l'accélération à partir du signal de vitesse du véhicule, ce qui permettrait d'avoir un signal non biaisé par la pente. Aussi, nous voudrions obtenir une estimation de l'à-coup en calculant la dérivée des signaux d'accélération.

1. A priori, un seul conducteur aurait réalisé l'intégralité du roulage associé à une même journée ; en revanche, nous n'avons pas pu confirmer cette information. Nous n'avons pas pu, non plus, déterminer si c'est le même conducteur qui a été au volant du véhicule lors des deux journées. Toutefois, cela ne remet pas en cause la validité de la méthodologie proposée. Par simplicité, nous utiliserons dorénavant le titre générique « le conducteur » pour faire référence à la ou les personnes qui ont participé à l'étude.

Travailler avec des données issues des capteurs industriels peut être un défi. En général, de tels capteurs doivent répondre à des contraintes économiques et d'intégration, entre autres, ce qui peut se traduire par des signaux ayant des résolutions limitées ou à période d'échantillonnage variable. Aussi, certains points des signaux peuvent être manquants. Ça a été le cas dans notre étude. De plus, des signaux de ce type peuvent être contaminés par de quantités de bruit non négligeable. En outre, estimer la dérivée est souvent difficile quand il s'agit des signaux bruités à échantillonnage non-constant.

Dans cette section nous allons présenter une méthodologie de traitement de signal qui permet en même temps de :

- ré-échantillonner les signaux à une période constante, ce qui permet d'utiliser des techniques classiques de traitement de signal.
- synchroniser plusieurs signaux différents.
- reconstruire des valeurs manquantes lors d'un sur-échantillonnage, en faisant un filtrage potentiellement plus performant que celui d'une interpolation linéaire.
- compenser la perte de messages
- réaliser un filtrage de signal afin d'éliminer les différentes sources de bruit ; la technique proposée devrait être particulièrement performante sur des signaux contaminés avec du bruit gaussien.
- estimer la dérivée du signal en compensant la perte de résolution et le bruit.

La méthode proposée permet de passer d'un signal à échantillonnage non constant, bruité, à un signal à échantillonnage constant, avec une réduction significative de la quantité de bruit présent. Elle permet aussi d'estimer la dérivée du signal. La méthode peut être vue comme une extension du filtre de Savitzky-Golay pour le cas d'un échantillonnage non uniforme [189, 190]. Elle a été choisit car elle permet, en une seule étape, le filtrage, ré-échantillonnage et l'estimation de la dérivée du signal. La discussion et les résultats de cette section, avec des informations supplémentaires, ont été publiés sur [207].

3.1.1 Méthode de filtrage et dérivation d'un signal à échantillonnage non-uniforme

Afin de filtrer le signal et d'obtenir sa dérivée, nous devons suivre les étapes suivantes, lesquelles seront ensuite expliquées.

1. Définition du vecteur temps pour le ré-échantillonnage.
2. Création de fenêtres temporelles.
3. Récupération des points de la fenêtre.
4. Approximation polynomiale des points de la fenêtre
5. Reconstruction du point à $t = t_j^{fin}$ et estimation de la dérivée temporelle

3.1.1.1 Définition du temps pour le ré-échantillonnage

D'abord, il est nécessaire de définir les instants de temps $\underline{t}^{fin} \in \mathbb{R}^{N_{sign1}}$, pour lesquels nous voulons reconstruire la valeur du signal, à partir du signal brut, dont le vecteur de temps est $\underline{t}^{ini} \in \mathbb{R}^{N_{sign0}}$. Afin d'obtenir un signal à échantillonnage constant, les points temporels du vecteur de sortie doivent être distribués de manière uniforme, avec une période d'échantillonnage, τ_e . La Figure 3.1 représente cette action. Nous considérerons que l'enregistrement a commencé à l'instant $t_1^{ini} = t_0$ et qu'il est fini à l'instant $t_{N_{sign0}}^{ini} = t_f$.

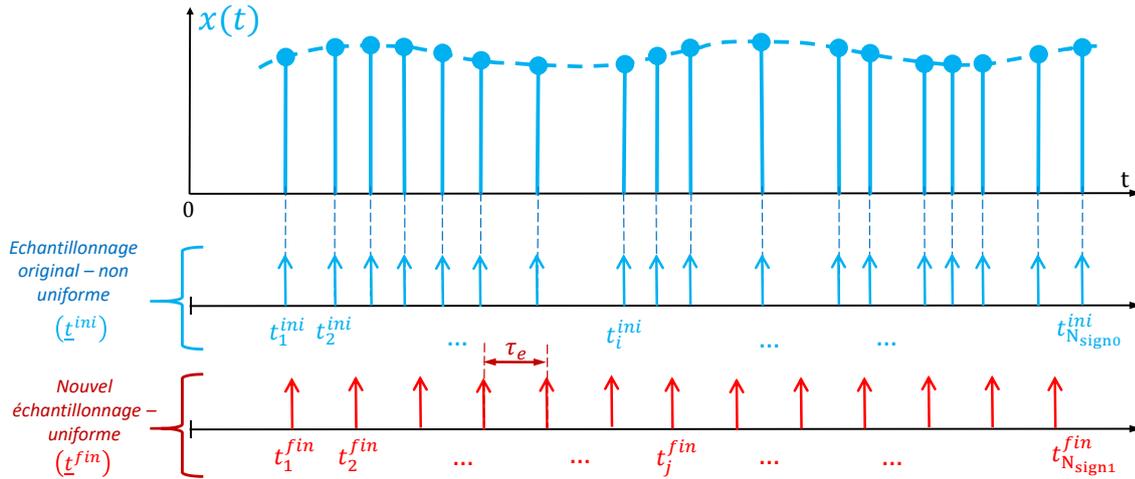


FIG. 3.1 – Vecteur de temps pour le ré-échantillonnage

La création du vecteur \underline{t}^{fin} doit respecter un certain nombre de règles ; cependant, par souci de clarté, les explications correspondantes seront présentées dans la section suivante.

3.1.1.2 Création de fenêtres temporelles

Une fois le vecteur \underline{t}^{fin} créé, nous allons générer des fenêtres temporelles autour de chaque valeur t_i^{fin} (Figure 3.2). Pour cela il est nécessaire de définir la durée de la fenêtre, τ_{fen} . Dans une section postérieure nous donnerons des considérations sur comment choisir une valeur adéquate de τ_{fen} , selon le contenu fréquentiel du signal à traiter.

Dans un premier temps nous allons considérer des fenêtres centrées sur chacun des points t_i^{fin} . Cette méthode, qui n'est pas causale, pourrait être utilisée pour obtenir des informations *a posteriori* des expériences. Plus loin nous parlerons de la possibilité d'appliquer la méthode avec des fenêtres *orientées vers la gauche*, ce qui conduirait à un algorithme causal, pouvant être implémenté pour des applications temps-réel.

Nous introduisons une notation pour les différents paramètres d'une fenêtre temporelle, comme montré sur la Figure 3.2. La fenêtre fen_j est celle correspondant à la j -ème valeur du vecteur de temps de sortie, t_j^{fin} . La fenêtre fen_j commence à l'instant $t_{fen_0}^j$ et finalise à l'instant $t_{fen_f}^j$; les équations (3.1) et (3.2) permettent de calculer ces valeurs en fonction de t_j^{fin} et τ_{fen} .

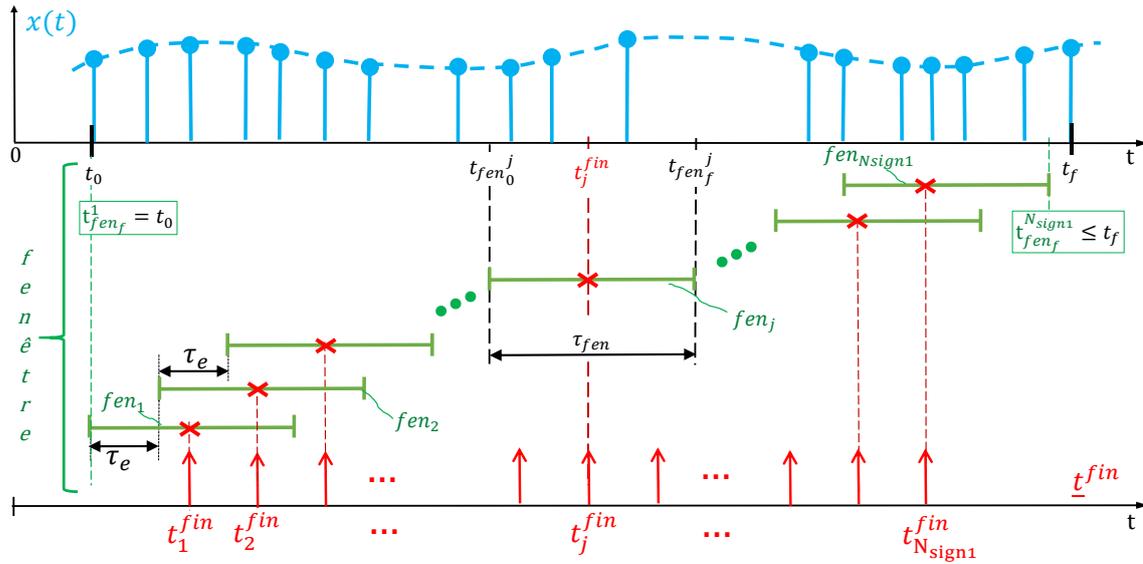


FIG. 3.2 – Fenêtres temporelles pour le re-échantillonnage

$$t_{fen_0}^j = t_j^{fin} - \frac{\tau_{fen}}{2} \quad (3.1)$$

$$t_{fen_f}^j = t_j^{fin} + \frac{\tau_{fen}}{2} \quad (3.2)$$

Afin de favoriser le fait que chaque fenêtre ait un nombre suffisant de points pour pouvoir appliquer la méthode, nous introduisons les contraintes qui suivent :

$$t_1^{fin} \geq t_0 + \frac{\tau_{fen}}{2}, \quad (3.3)$$

$$t_{N_{sign1}}^{fin} \leq t_f - \frac{\tau_{fen}}{2}. \quad (3.4)$$

La condition suivante permet d'assurer un échantillonnage constant du signal de sortie :

$$t_{j+1}^{fin} - t_j^{fin} = \tau_e, \quad \forall j \in [1, \dots, N_{sign1} - 1]. \quad (3.5)$$

En respectant ces conditions, il est possible de définir un vecteur \underline{t}^{fin} adéquat. Si l'on souhaite synchroniser plusieurs signaux, on peut garder un unique vecteur, \underline{t}^{fin} , qui respecterait les conditions (3.3) et (3.4) pour chacun des signaux à synchroniser. On peut potentiellement utiliser des paramètres différents à chaque signal, afin d'effectuer un traitement spécialisé sur chacun. Dans ce travail, nous avons considéré $t_1^{fin} = t_0 + \frac{\tau_{fen}}{2}$ et $t_{N_{sign1}}^{fin} \leq t_f - \frac{\tau_{fen}}{2}$, pour l'implémentation de la méthode (Figure 3.2).

3.1.1.3 Récupération des points de la fenêtre

A partir de cette section, nous allons travailler uniquement la j -ème fenêtre, fen_j ; chaque étape décrite ci-après doit être exécutée sur chacune des fenêtres. La méthode peut donc être vue comme un filtrage à fenêtre glissante.

Sur la fenêtre fen_j , nous allons récupérer les points compris entre $t_{fen_0}^j \leq t \leq t_{fen_f}^j$. Chacun de ces points sera noté x_k^j , où $k = 1, \dots, m_j$, m_j étant le nombre de points à l'intérieur de la fenêtre fen_j . Ainsi le vecteur \underline{x}^j de points appartenant à fen_j peut être défini comme montré sur (3.6)².

$$\underline{x}^j = [x_1^j(t_1), \dots, x_k^j(t_k), \dots, x_{m_j}^j(t_{m_j})]^T \quad | \quad \exists x_k^j(t_k) \in \underline{x}^j, \quad \forall t_k \in T_j$$

$$T_j = \{t \mid t \in \underline{t}^{ini}, \quad t_{fen_0}^j \leq t \leq t_{fen_f}^j\} \quad (3.6)$$

La figure 3.3 illustre la fenêtre temporelle dont nous venons de parler. Seuls les points à l'intérieur de la fenêtre, x_k^j , en vert sur la figure, seront considérés pour l'analyse subséquente. Notez bien que pour chaque point x_k^j , nous prenons aussi le temps t_k^j qui lui est associé, car nous en aurons besoin dans la suite.

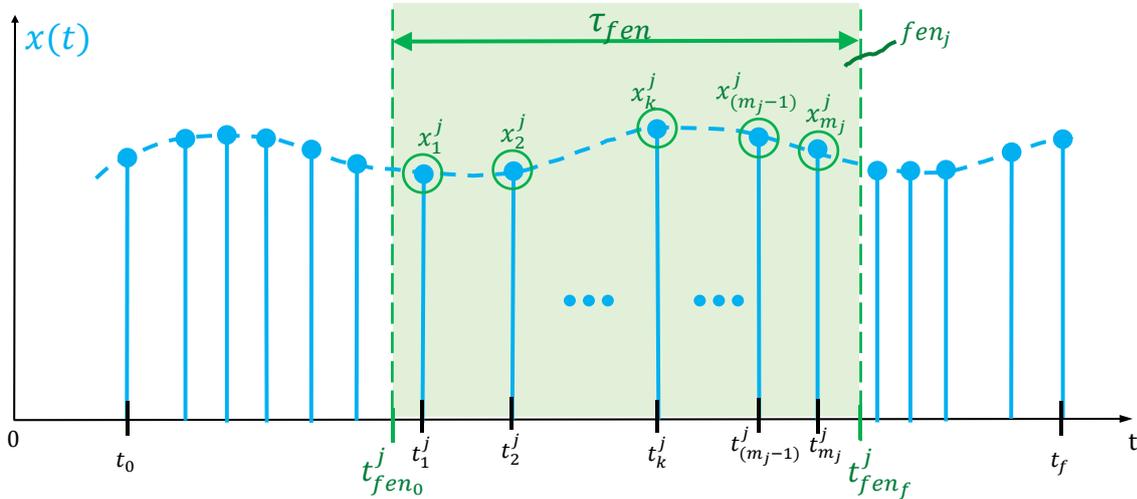


FIG. 3.3 – Récupération des points du vecteur \underline{x}^j de la j -ème fenêtre temporelle

3.1.1.4 Approximation polynomiale (locale) des points de la fenêtre

Une fois que le vecteur \underline{x}^j des points de la j -ème fenêtre a été construit, il est possible de trouver une fonction $f(t)$ qui approxime les valeurs des points $x_k^j(t_k^j)$. Pour la méthode proposée, nous avons décidé d'utiliser une fonction polynomiale du temps, $f_{n_p}(t)$, tel que présenté sur (3.7). L'ordre du polynôme est n_p , $\underline{\mathbf{P}}_{n_p}(t) = [1, t, t^2, \dots, t^{n_p}]^T$ et $\underline{\theta} = [\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{n_p}]^T$.

$$f(t) = \sum_{i=0}^{n_p} \theta_i \cdot t^i = \underline{\mathbf{P}}_{n_p}(t)^T \underline{\theta} = \theta_0 + \theta_1 \cdot t^1 + \theta_2 \cdot t^2 + \dots + \theta_{n_p} \cdot t^{n_p} \quad (3.7)$$

Nous constatons que la valeur $f(\underline{\theta}, t)$ est une fonction linéaire du vecteur $\underline{\theta}$, ce qui nous permet de considérer que $f(t)$ est un *modèle linéaire de mesure* [22]. Ainsi, pour la k -ème valeur du vecteur de mesures \underline{x}^j nous avons la relation présentée sur (3.8). Afin

2. la notation utilisée sur cette équation est peu conventionnel, mais concise : quand nous écrivons $a \in \underline{x}$, \underline{x} étant un vecteur, en réalité nous voulons dire : « a appartient à l'ensemble constitué par tous les éléments du vecteur \underline{x} »

de simplifier la notation, dorénavant nous allons omettre le super-indice j de chaque équation; ainsi, pour toutes les équations où il y aurait une ambiguïté, on doit sous-entendre que nous faisons référence à la fenêtre fen_j (sauf mention explicite du contraire). Sur cette équation, nous considérons que v_k correspond à l'écart entre la mesure x_k et notre estimation $f(t_k) = \underline{\mathbf{P}}_{n_p}(t_k)^T \cdot \underline{\theta}$.

$$x_k(t_k) = \underline{\mathbf{P}}_{n_p}(t_k)^T \cdot \underline{\theta} + v_k \quad (3.8)$$

En considérant les m_j valeurs du vecteur $\underline{\mathbf{x}}^j$, nous trouvons le système d'équations (3.9), pouvant être exprimé en forme condensée selon l'équation (3.10), où $\underline{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}^{m_j}$ correspond aux points de la fenêtre (mesures), $T_p \in \mathbf{R}^{m_j \times n_p}$ est une matrice dont chaque ligne correspond aux puissances du temps t_k de 0 à n_p , $\underline{\theta} \in \mathbf{R}^{n_p}$ est un vecteur avec les paramètres de $f(t)$ que nous cherchons à estimer et $\underline{\mathbf{v}} \in \mathbf{R}^{m_j}$ est l'erreur d'estimation pour chaque mesure. Nous supposons que $m_j \geq n_p$.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \\ \vdots \\ x_{m_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^{n_p} \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \dots & t_2^{n_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & t_k & t_k^2 & \dots & t_k^{n_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & t_{m_j} & t_{m_j}^2 & \dots & t_{m_j}^{n_p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{n_p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_k \\ \vdots \\ v_{m_j} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\underline{\mathbf{x}} = T_p \cdot \underline{\theta} + \underline{\mathbf{v}} \quad (3.10)$$

Si nous faisons l'hypothèse qu'une fonction $f(\underline{\theta}^*, t)$, avec la forme (3.7), permet de représenter « parfaitement » le comportement du signal dans le tronçon considéré, et que $\underline{\mathbf{v}}$, l'écart entre la mesure $\underline{\mathbf{x}}$ et l'estimation $T_p \underline{\theta}^*$, corresponde à du bruit gaussien de faible valeur ($\|\underline{\mathbf{v}}\|_2$ est petite), alors le calcul des coefficients du polynôme $\underline{\theta}^*$, représentant au mieux les mesures dans la fenêtre, devient un problème de moindres carrés [22]. La valeur optimale du vecteur $\underline{\theta}^*$ peut être calculée grâce à (3.11).

$$\underline{\theta}^* = \left(T_p^T \cdot T_p \right)^{-1} \cdot T_p^T \cdot \underline{\mathbf{x}} \quad (3.11)$$

La Figure 3.4 illustre la fonction $f(\underline{\theta}^*, t)$ qui approxime au mieux les points $\underline{\mathbf{x}}$ à l'intérieur de la fenêtre, pour un ordre de polynôme n_p donné.

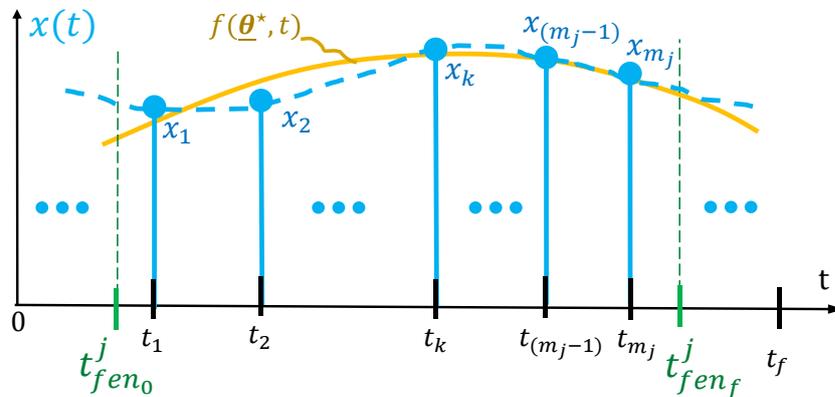


FIG. 3.4 – Approximation polynomiale des points dans la fenêtre, $f(\underline{\theta}^*, t)$

3.1.1.5 Reconstruction du point à $t = t_j^{fin}$ et estimation de la dérivée temporelle

La dernière étape consiste à calculer la valeur que le polynôme $f(\underline{\theta}^*, t)$ prend pour $t = t_j^{fin}$, valeur autour de laquelle la fenêtre a été construite, et associer cette valeur au signal reconstruit. La Figure 3.5 représente cette opération, où \hat{x}_j est le point associé à la fenêtre fen_j , et donc à l'instant t_j^{fin} .

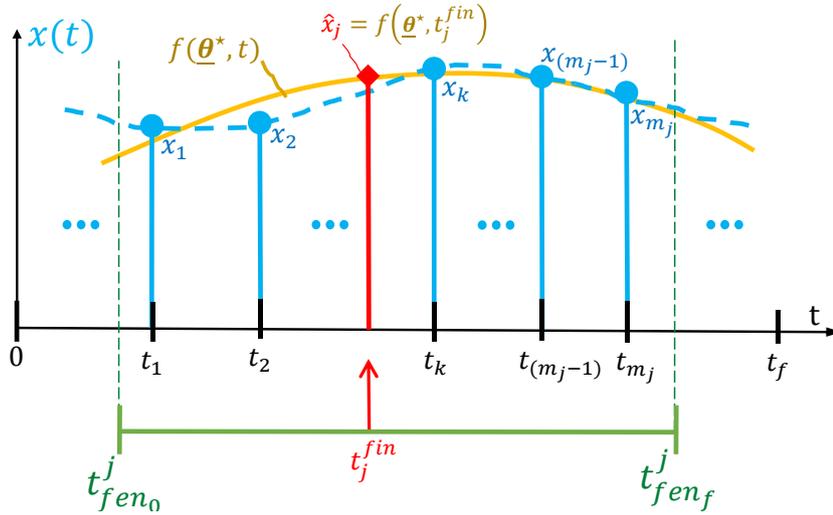


FIG. 3.5 – Reconstruction du point associé à la fenêtre, $\hat{x}_j = f(\underline{\theta}^*, t_j^{fin})$

Pour estimer la dérivée du signal à l'instant $t = t_j^{fin}$, on peut appliquer (3.12) :

$$\frac{dx}{dt}(t_j^{end}) = [0, 1, 2, \dots, n_p] \text{diag}(\underline{\theta}^*) \begin{bmatrix} 0 \\ (t_j^{end})^0 \\ (t_j^{end})^1 \\ \vdots \\ (t_j^{end})^{n_p-1} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Nous devons appliquer les étapes précédentes sur chaque fenêtre, afin d'obtenir un signal filtré et sa dérivée.

3.1.2 Implémentation causale de la méthode : fenêtres « orientées vers la gauche »

La méthode qui vient d'être présentée, basée sur des fenêtres centrées, n'est pas causale, ce qui veut dire qu'on ne peut pas l'appliquer en temps réel (car elle demande de connaître le futur). Cependant, il est possible d'avoir facilement une version causal de cet algorithme, en utilisant une fenêtre considérant uniquement des valeurs passées du signal ; ceci équivaut à imposer $t_j^{fin} = t_j^{fen_f}$. Nous pouvons nommer une telle fenêtre « orientée vers la gauche. » Dans ce cas, les valeurs de $t_{fen_0}^j$ et $t_{fen_f}^j$ peuvent être calculées en appliquant les conditions $t_{fen_0}^j = t_j^{fin} - \tau_{fen}$ et $t_{fen_f}^j = t_j^{end}$. Les conditions pour promouvoir le fait d'avoir un nombre suffisant de points pour l'application de la méthode deviendront :

$$t_1^{fin} \geq t_0 + \tau_{fen}, \quad (3.13)$$

$$t_{N_{signal}}^{fin} \leq t_f. \quad (3.14)$$

Lorsqu'on applique directement l'approximation polynômiale de la section II.3.1.1.4, la réponse fréquentielle du filtre pourrait ne pas être acceptable pour une application industrielle. Cela est dû au fait qu'une régression polynômiale, basée sur une métrique euclidienne, tend à se rapprocher des valeurs centrales de la fenêtre, en ayant des erreurs plus importantes dans les extrêmes; cela n'est pas convenable dans la mesure où nous voulons approximer la valeur à la fin de la fenêtre temporelle. Il est, toutefois, possible de compenser pour ce phénomène en changeant la fonction de coût de la phase d'approximation polynômiale. Dans le cas nominal, on doit minimiser la fonction $\underline{v}^T \cdot \underline{v} = \|\underline{v}\|_2^2$, ce qui correspond à un problème de moindres carrés. Deux fonctions de coût alternatives seraient :

- **Norme infinie** ($\|\underline{v}\|_\infty$) : au lieu d'optimiser la norme euclidienne du vecteur des résidus³, \underline{v} , nous pouvons optimiser sa norme infinie. Chaque résidu correspond à l'écart entre le point du signal d'origine et la valeur correspondante dans l'approximation polynomiale. De ce fait, minimiser $\|\underline{v}\|_\infty = \max(|v_1|, |v_2|, \dots, |v_{m_j}|)$ reviendrait à trouver le polynôme minimisant le plus grand écart entre les points du signal et l'estimation, ce qui n'est pas biaisé envers les valeurs centrales. Une potentielle difficulté avec cette méthode est la résolution du problème d'optimisation à chaque itération qui, à différence de la fonction d'origine, n'a pas une solution analytique. Résoudre un problème avec une norme infinie peut s'avérer coûteux en temps de calcul. En revanche, pour certains problèmes avec des normes infinies, il est possible de trouver des chemins d'optimisation assez élégants et peu coûteux (par exemple [163]). Cependant, il n'y a pas de garantie que ce soit le cas dans notre problème et, de plus, trouver une telle solution est loin d'être trivial.
- **Moindres carrés pondérés** ($\underline{v}^T W_1 \underline{v}$) : un autre moyen pour compenser le biais de la norme euclidienne vers les valeurs centrales de la fenêtre, est de pondérer les points du signal par la valeur absolue de la différence entre t_j^{fin} , et chaque instant de temps, t_k^{ini} . Cela équivaut à minimiser la valeur de $\underline{v}^T W_1 \underline{v}$, où $W_1 = \text{diag}(\underline{w})$, $w_k^1 = |t_j^{end} - t_k^{ini}|$, ce qui correspond à un problème des moindres carrés pondérés. Si l'on souhaite accorder encore plus de priorité aux points proches de la dernière valeur de temps (t_j^{fin}), on peut généraliser la méthode précédente en considérant plutôt l'amplitude de la l-ième puissance de chaque écart. Cela est représenté par (3.15), qui est une variante sans perte de généralité. Le fait de diviser tous les chiffres par la puissance l de la valeur maximale de $|t_j^{fin} - t_k^{ini}|$ permet de normaliser les valeurs de w_k à 1, afin d'éviter des problèmes numériques.

$$W_l = \text{diag}(\mathbf{w}), \quad w_k^l = \frac{|t_j^{\text{end}} - t_k^{\text{ini}}|^l}{\left(\max_{r=1, \dots, m_j} |t_j^{\text{end}} - t_r^{\text{ini}}| \right)^l}. \quad (3.15)$$

La solution au problème des moindres carrés pondérés est donné par :

$$\underline{\theta}^* = \left(T_p^T \cdot W_l \cdot T_p \right)^{-1} \cdot T_p^T \cdot W_l \cdot \underline{\mathbf{x}} \quad (3.16)$$

Pour voir les résultats associés à cette implémentation, le lecteur est invité à consulter [207].

Les deux solutions préservent la convexité du problème. Nous avons étudié l'utilisation des moindres carrés pondérés sur [207]. Toutefois, l'utilisation de la norme infinie est aussi une piste pour améliorer les performances du filtre pour une application temps réel.

3.1.3 Réponse fréquentielle du filtre et choix des paramètres de la méthode

Une caractéristique essentielle d'un filtre est sa fréquence de coupure. Nous présentons ci-dessous les réponses fréquentielles des méthodes proposées, qui peuvent être considérés comme des filtres d'interpolation. Les réponses ont été obtenues numériquement en appliquant la méthode à des signaux sinusoïdaux de différentes fréquences et comparant l'amplitude des signaux d'entrée et de sortie, afin d'obtenir le gain du filtre. Il est important de signaler que, étant donné que les méthodes proposées ne sont pas nécessairement des filtres linéaires, la réponse affichée pourrait ne pas représenter de manière compréhensive le comportement du filtre. Aussi, étant donné que nous avons utilisé dans nos calculs des signaux à échantillonnage uniforme, des effets associés à la variabilité dans la transmission d'informations ont été exclues de l'analyse. Cela est justifié par le fait que les signaux industriels utilisés pour nos travaux doivent respecter un minimum de régularité dans l'échantillonnage (en dehors des cas où il y aurait perte de messages). Si jamais on voulait considérer cet aspect, on pourrait caractériser la variabilité de la période d'échantillonnage, puis générer de signaux d'entrées représentatifs de ladite variabilité.

Sur la Figure 3.6, nous comparons la réponse fréquentielle de la méthode proposée, avec des fenêtres centrées, à la réponse d'une technique classique, notamment d'un filtre Butterworth [24]. Les paramètres utilisés ont été $\tau_{fen} = 200ms$ et $n_p = 1$, permettant d'avoir une fréquence de coupure à 6dB⁴ proche de 2.997 Hz. Le filtre Butterworth a été conçu de manière à avoir la même fréquence de coupure. Le comportement fréquentiel de la méthode a été déterminé numériquement en l'appliquant à des signaux sinusoïdaux de fréquence différente, puis en quantifiant l'atténuation de l'amplitude du signal de sortie⁵. La réponse fréquentielle est celle caractéristique d'un filtre d'interpolation. En comparant les deux techniques, nous pouvons constater que la méthode préserve plus de l'énergie du

3. Le lecteur aura remarqué que dans le problème original on utilise plutôt le carré de la norme euclidienne ; cependant, l'optimisation d'une fonction de coût $f(\underline{\mathbf{x}})$, et de sa composition avec une fonction scalaire monotone croissante (comme le carré ou la racine carré), sont deux problèmes équivalents [22].

signal en-dessous de la fréquence de coupure, tout en atténuant mieux le signal en-dessus de cette fréquence.

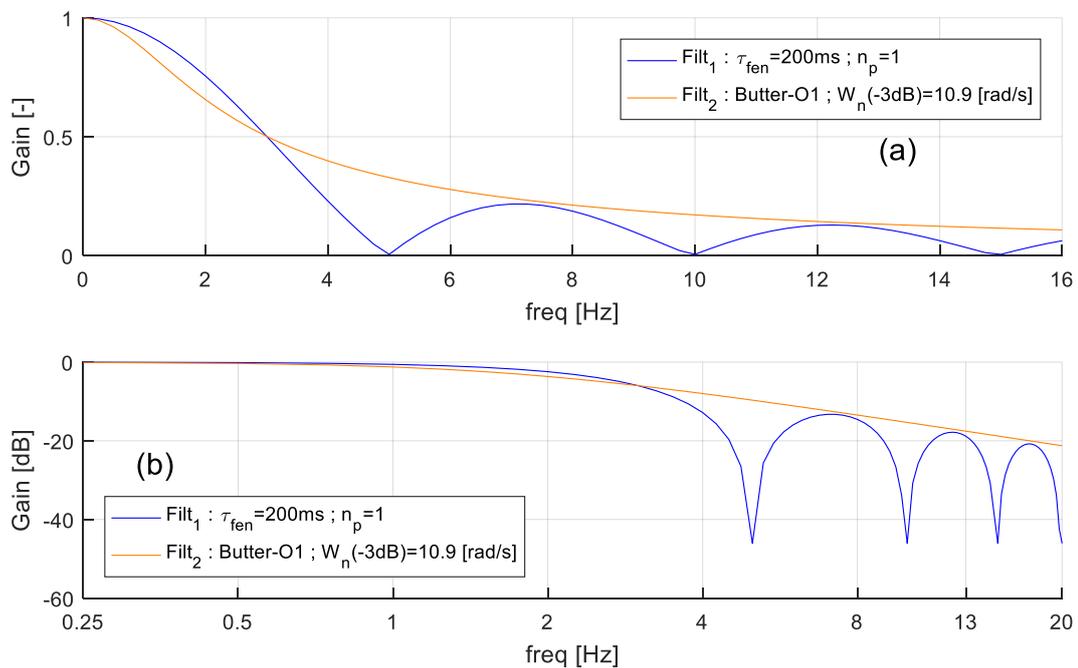


FIG. 3.6 – Réponse fréquentielle de la méthode proposée et d'une technique de filtrage linéaire ; (a) échelle linéaire, (b) échelle logarithmique

Un autre avantage de la méthode, qui n'est malheureusement pas affiché sur la figure (car sa détermination numérique n'est pas triviale), est la préservation de la phase du signal. En effet, avant le premier passage du gain par zéro, le signal de sortie est en phase avec le signal d'entrée (phase nulle) ; puis, dans la bosse supérieure, il sera en opposition de phase ; puis, il sera en phase avec le signal, et ainsi de suite. La fait de préserver la phase du signal en-dessous de la fréquence de coupure, évite d'avoir un retard, ou latence, dans la signal filtré, ce qui, comme nous le verrons par la suite, peut s'avérer précieux lorsqu'on cherche à analyser des évènements d'accélération d'un véhicule.

De plus, étant donné que notre objectif est d'appliquer la méthode sur des signaux à échantillonnage non-uniforme, si on voulait appliquer le filtre linéaire, il faudrait ré-échantillonner le signal pour avoir une fréquence d'échantillonnage constante. Pour ce faire, il faudrait faire une interpolation, ce qui dégraderait d'avantage le contenu fréquentiel du signal (étant donné qu'une interpolation équivaut à un deuxième filtrage du signal [161]).

* * *

4. La fréquence de coupure à 6dB est celle à laquelle l'amplitude du signal de sortie est atténuée de 50.12% par rapport au signal d'entrée. C'est donc la fréquence à partir de laquelle le contenu fréquentiel du signal est, à minimum, atténué de moitié.

5. Cette représentation, correspondant au graphique d'amplitude d'un diagramme de Bode, est plus pertinente dans le cas des signaux linéaires (où le principe de superposition applique). Malgré la possible non-linéarité de notre méthode, cette analyse de la réponse fréquentielle reste d'intérêt pour acquérir des intuitions concernant sont comportement.

Tel que nous l'avons dit précédemment, il y a deux paramètres de la méthode que nous pouvons faire varier : la taille des fenêtres, τ_{fen} , et l'ordre du polynôme, n_p . En modifiant leur valeur, il est possible d'adapter la fréquence de coupure du filtrage ; en revanche, cela aura aussi un impact sur le coût du calcul, en temps et en mémoire.

La Figure 3.7a illustre l'évolution de la fréquence de coupure du filtre en fonction de l'ordre de polynôme. Nous constatons une relation grossièrement linéaire ; cependant, il n'y a aucune variation dans la valeur de f_{coup} lorsqu'on passe d'un polynôme d'ordre pair au polynôme d'ordre immédiatement supérieur, impair. La Figure 3.7b permet de comprendre cet étonnant phénomène : en utilisant un ordre de polynôme (pair) et en prenant l'ordre suivant, les deux estimations tendent à être très proches au centre de la fenêtre, la différence étant plutôt associée aux valeurs extrêmes. Étant donné que nous considérons ici des fenêtres centrées, on devrait obtenir pratiquement la même valeur dans les deux cas. En revanche, en ce qui concerne l'estimation de la dérivée, l'approximation polynômiale d'ordre supérieur devrait être plus pertinente, surtout pour des polynômes d'ordre réduit.

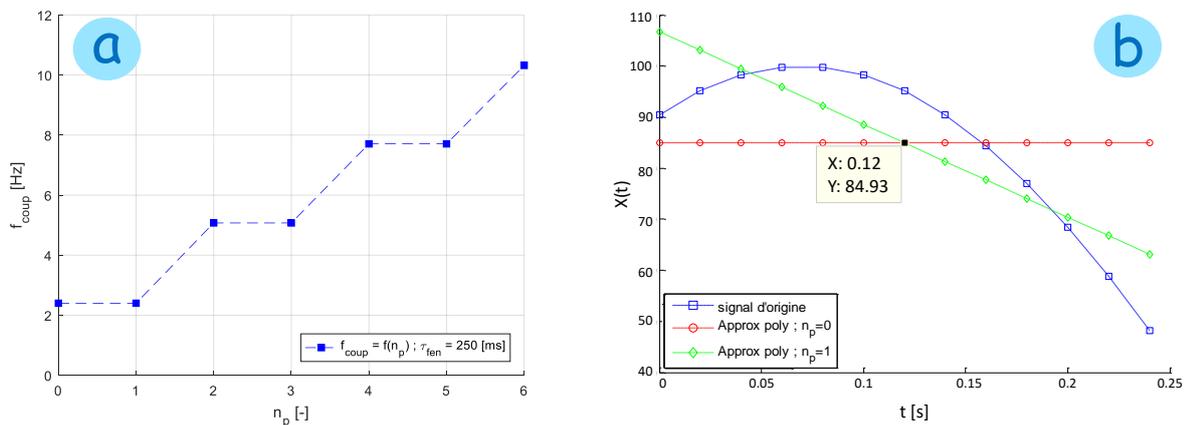


FIG. 3.7 – Effet de l'ordre du polynôme sur la fréquence de coupure ; (a) fréquence de coupure en fonction de l'ordre du polynôme, (b) Approximation polynômiale avec deux fonctions d'ordre successif

Nous avons ensuite considéré l'effet de la taille de fenêtre sur f_{coup} , et ce pour des polynômes d'ordre différent. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.8 pour plusieurs valeurs de n_p . On peut voir que, lorsque la taille de fenêtre augmente, la fréquence de coupure diminue, et vice-versa. Aussi, pour avoir des valeurs de f_{coup} importantes, il est nécessaire d'avoir des petites fenêtres avec des ordres de polynôme importants ; cela n'est pas convenable dans la mesure où la résolution du problème des moindres carrés demande d'avoir un nombre de points dans la fenêtre au moins égale à n_p . Ainsi, la plage des fréquences de coupure auxquelles on pourrait avoir accès, est limité par la fréquence moyenne d'échantillonnage du signal d'entrée.

Même s'il est possible d'obtenir la même fréquence de coupure avec des valeurs de n_p différentes, la qualité du filtrage variera selon l'ordre du polynôme. La Figure 3.9 illustre les réponses de trois filtres avec des valeurs de n_p différentes, mais dont la taille de fenêtre a été choisie pour avoir la même fréquence de coupure. Nous pouvons constater

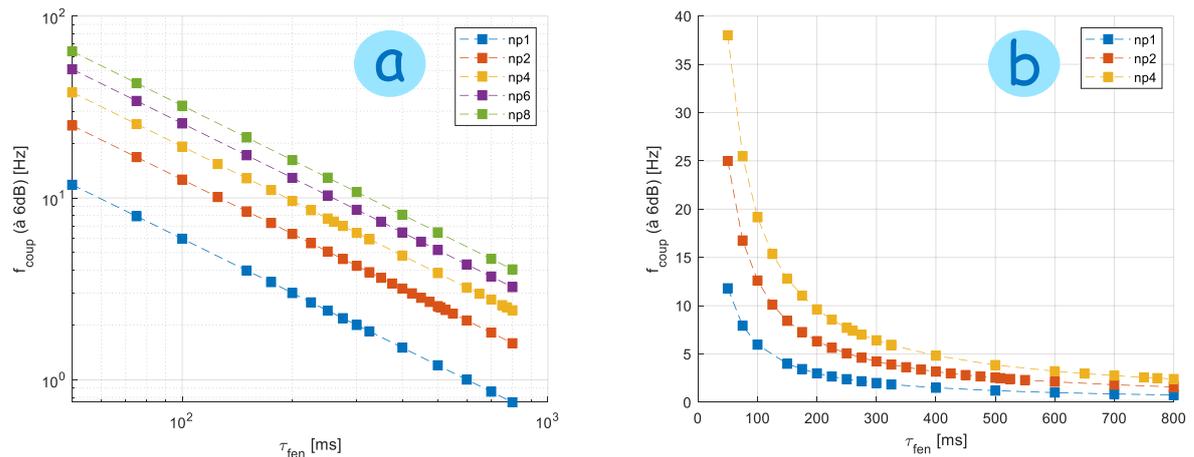


FIG. 3.8 – Effet de la taille de fenêtre sur la fréquence de coupure ; (a) $n_p \in \{1, 2, 4, 6, 8\}$, (b) $n_p \in \{1, 2, 4\}$ (affichage zoomé)

une grosse amélioration entre le filtre d'ordre 1 et celui d'ordre 2 ; par contre, la différence dans la réponse pour $n_p = 2$ et $n_p = 4$, est moins importante. Par contre, l'utilisation de l'ordre 4 augmente le coût de calcul, ainsi que le risque de problèmes numériques au moment de résoudre l'équation (3.11). De ce fait, nous avons choisit pour la suite de notre étude, de garder $n_p = 2$.

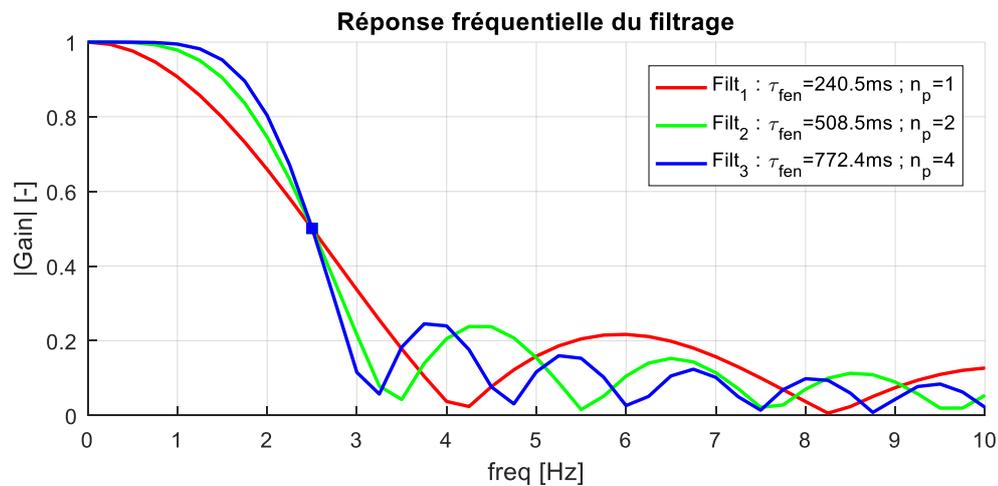


FIG. 3.9 – Réponses fréquentielles à iso-fréquence de coupure, pour plusieurs ordres du filtrage

Dans le cadre de nos travaux, et donc pour la suite de la discussion, nous avons décidé d'utiliser un filtre à fréquence de coupure $f_{coup} = 2.5$ Hz. Le choix de cette fréquence est compatible avec les filtrages propres aux consignes de couple utilisé dans le milieu industriel afin de privilégier l'agrément de conduite. De plus, nous avons validé cette valeur en testant des fréquences différentes sur les signaux et en regardant la pertinence du signal obtenu.

3.1.4 Considérations pratiques pour l'implémentation de l'algorithme

Lors de l'implémentation de la méthode proposée, la charge de calcul peut s'avérer un problème. Au niveau des itérations, le principal levier pour réduire le temps de calcul est probablement d'optimiser le coût de résolution de l'approximation polynômiale. Cependant, un autre moyen assez intéressant, si l'on regarde l'algorithme dans sa globalité, est de réduire la charge associée à déterminer les points à l'intérieur de chaque fenêtre. Cela est particulièrement vrai pour des signaux de taille importante car, tel que nous le verrons ci-dessous, la complexité de cette tâche croît rapidement lorsque la taille du signal augmente. Si, lors du traitement des signaux de très longue durée, la détermination des points appartenant à chaque fenêtre n'est pas adéquatement réalisée, le coût associé à cette étape peut dépasser celui de la résolution des problèmes des moindres carrés⁶! Dans cette section, nous présenterons un algorithme permettant de récupérer les points à l'intérieur de chaque fenêtre, tout en limitant le coût de calcul.

3.1.4.1 Algorithme naïf

Dans un premier temps, nous allons considérer un algorithme naïf pour obtenir les points à l'intérieur de chaque fenêtre, qui est présenté sur l'Algorithme 1. Nous prendrons en entrée le vecteur original de temps, \underline{t} (correspondant à $\underline{t}^{\text{ini}}$), la taille du signal de sortie, m , la période d'échantillonnage, τ_e , et la durée des fenêtres, τ_{fen} . L'algorithme permet d'obtenir en sortie un vecteur pour chaque fenêtre, contenant les indices des points à l'intérieur de la fenêtre.

Algorithme 1 : Détermination des points par fenêtre - version naïve

Entrée : signal d'origine : $\underline{x}, \underline{t} \in \mathbf{R}^n$;
 nombre de fenêtres : m ;
 paramètres méthode : τ_e, τ_{fen}
Sortie : m vecteurs \underline{v}^j avec les indices de \underline{t} dans la fenêtre j

```

1 Début
2   Créer  $m$  vecteurs vides  $\underline{v}^j = \emptyset, j = 1, \dots, m$ 
3   Pour chaque valeur du signal  $i$  faire
4     Pour chaque fenêtre de temps  $j$  faire
5       Si  $t[i]$  est à l'intérieur de la fenêtre  $j$  alors
6         Ajouter la valeur  $i$  à la fin du vecteur  $\underline{v}^j$ 
7       fin
8     fin
9   fin
10 Fin
```

Tel que présenté sur la Figure 3.10, l'algorithme se limite à parcourir chaque valeur du

6. En effet, tel qu'il sera montré, un *algorithme naïf* pour récupérer les points dans chaque fenêtre pourrait avoir une complexité quadratique, en temps et en mémoire, par rapport à la taille du signal. En revanche, même s'il est grand, le coût de la résolution de tous les problèmes des moindres carrés croît linéairement avec la taille du signal. De ce fait, à partir d'une certaine taille, le coût de récupération des points dépassera celui de faire l'estimation polynômiale.

signal i et chaque fenêtre j , en vérifiant si le point est à l'intérieur de la fenêtre (condition : $t_{fen_0}^j \leq t[i] \leq t_{fen_f}^j$); si oui, alors on ajoute l'indice i à un vecteur associé à la fenêtre j .

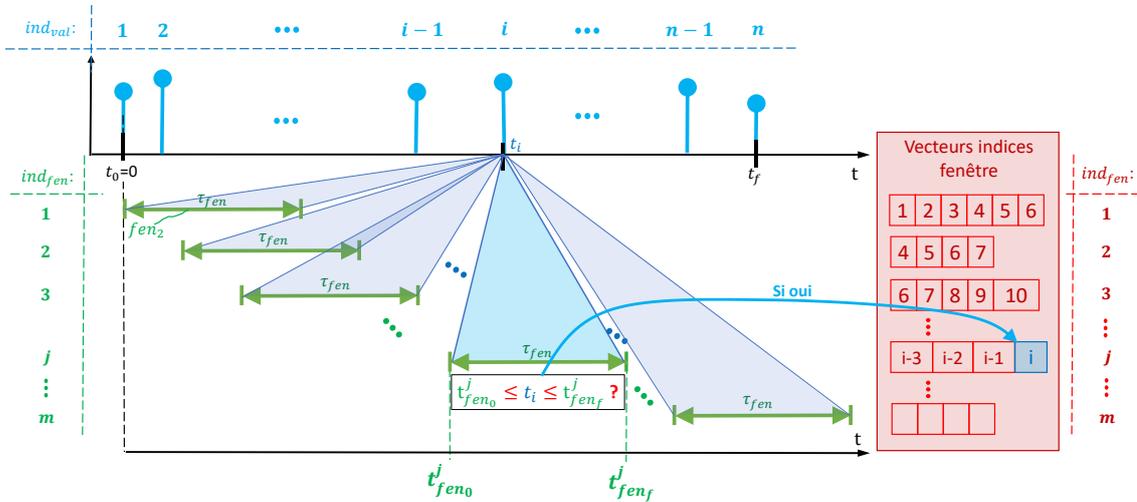


FIG. 3.10 – Détermination des points de la fenêtre - algorithme naïf

Afin de pouvoir analyser la complexité de l'algorithme, nous allons utiliser le pseudo-code présenté sur l'Algorithme 2, dans lequel certains choix de programmation ont été faits, dont l'utilisation de l'allocation dynamique de mémoire. Des commentaires indiquent la complexité algorithmique de chaque tâche. Pour calculer le coût de calcul (en temps) associé à une boucle, on doit additionner le coût de chaque tâche et, ensuite, multiplier le résultat par le nombre d'itérations de la boucle, en notation « grand O ».

Algorithme 2 : Détermination des points par fenêtre - version naïve

Entrée : signal d'origine : $\underline{x}, \underline{t} \in \mathbb{R}^n$;

nombre de fenêtres : m ;

paramètres méthode : τ_e, τ_{fen}

Sortie : m vecteurs \underline{v}^j avec les indices de \underline{t} dans la fenêtre j

1 Début

2 Créer m vecteurs vides $\underline{v}^j = \emptyset, j = 1, \dots, m$ // $\mathcal{O}(m)$

3 $t_{fen_0} = 0$ // $\mathcal{O}(1)$

4 $t_{fen_f} = 0$ // $\mathcal{O}(1)$

5 Pour $i := 1$ à n faire

/* boucle : $\mathcal{O}(n)$ */

6 Pour $j := 1$ à m faire

/* boucle : $\mathcal{O}(m)$ */

7 $t_{fen_0} := (j-1) * \tau_e$ // $\mathcal{O}(1)$

8 $t_{fen_f} := (j-1) * \tau_e + \tau_{fen}$ // $\mathcal{O}(1)$

9 Si $t[i] \geq t_{fen_0}$ and $t[i] \leq t_{fen_f}$ // $\mathcal{O}(1)$

alors

11 | ajouter i à la fin du vecteur \underline{v}^j // $\mathcal{O}(1)$ (grand)

fin

13 fin

14 fin

15 Fin

Dans cet algorithme, la complexité est principalement associée aux deux boucles im-

briquées, dont la complexité est $\mathcal{O}(n.m)$, ce qui veut dire que le coût de calcul croît linéairement avec la taille des vecteurs d'entrée et de sortie, n et m , respectivement. Étant donné que, pour une valeur constante de τ_e , n et m sont fortement reliées, on peut grossièrement considérer un coût quadratique.

En ce qui concerne le coût en mémoire, l'algorithme demande la création de m vecteurs, \underline{v}^j , de taille moyenne \bar{v} , grossièrement constante (en réalité, \bar{v} dépend des paramètres de la méthode, et est indirectement associé à m , mais nous négligerons cette dépendance). Cela représente un coût en mémoire $\mathcal{O}(\bar{v}.m) = \mathcal{O}(m)$. Si l'utilisation d'allocation statique de mémoire était nécessaire, le coût serait grossièrement quadratique.

3.1.4.2 Algorithme avancé

Le problème de l'algorithme c'est qu'il doit vérifier, pour chacun des points du signal, s'il appartient à chaque fenêtre, alors qu'une grosse partie de ces points ne sont pas contenus dans la fenêtre, et que ce n'est donc pas la peine de les consulter. Il est cependant possible de réduire le nombre de points à tester, à condition de pouvoir identifier trois valeurs (Idx_{ini-1} , Idx_{ini} et Idx_{fin}), représentées sur la Figure 3.11.

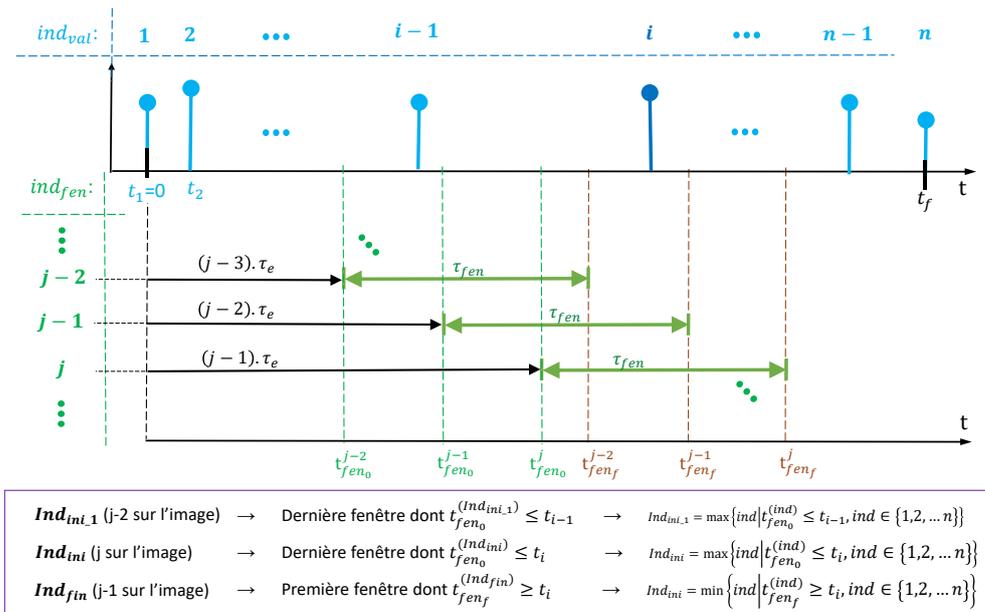


FIG. 3.11 – Détermination des points de la fenêtre - algorithme avancé

Pour déterminer Idx_{ini-1} , Idx_{ini} et Idx_{fin} , on doit répondre aux questions suivantes :
Pour la i -ème itération, quelle est...

- la dernière fenêtre dont le premier point est $(\underline{t}[i], \underline{x}[i])$?

l'indice associé à cette fenêtre sera noté Idx_{ini}^i (équation (3.17))

$$Idx_{ini}^i = \max\{ind \mid t_{fen_0}^{ind} \leq t_i \quad ind \in 1, 2, \dots, m\} \quad (3.17)$$

- la dernière fenêtre dont le premier point est $(\underline{t}[i-1], \underline{x}[i-1])$?

l'indice associé à cette fenêtre sera noté Idx_{ini-1}^i (équation (3.18))

$$Idx_{ini-1}^i = \max\{ind \mid t_{fen_0}^{ind} \leq t_{i-1} \quad ind \in 1, 2, \dots, m\} \quad (3.18)$$

– la première fenêtre à laquelle le point $(\underline{t}[i], \underline{x}[i])$ appartient?;

l'indice associé à cette fenêtre sera noté $Idx_{ini_1}^i$ (équation (3.18))

$$Idx_{fin}^i = \min\{ind \mid t_{fen_f}^{ind} \geq t_i \quad ind \in 1,2,\dots,m\} \quad (3.19)$$

Ces valeurs sont illustrées par la Figure 3.11. Il est facile de démontrer que $Idx_{ini_1}^i$, associé à l'itération i , est égal à la valeur Idx_{ini}^{i-1} , associé à l'itération précédente; ceci est exprimé sur (3.20) et correspond à la ligne 5 de l'Algorithme 3.

$$Idx_{ini_1}^i = Idx_{ini}^{i-1} \quad (3.20)$$

La méthode améliorée pour obtenir les points à l'intérieur des fenêtres est présentée sur l'Algorithme 3. Il prend les mêmes entrées que l'algorithme naïf, mais génère seulement deux vecteurs de taille m : $\underline{v}_{idx}^{ini}$ et $\underline{v}_{idx}^{end}$, contenant respectivement les indices initial et final de chacune des fenêtres.

Algorithme 3 : Détermination des points par fenêtre - version avancée

Entrée : signal d'origine : $\underline{x}, \underline{t} \in \mathbb{R}^n$;

nombre de fenêtres : m ;

paramètres méthode : τ_e, τ_{fen}

Sortie : 2 vecteurs avec les indices initial et final de toutes les fenêtres, $V_{idx_{ini}}$ et $V_{idx_{fin}}$ respectivement

```

1 Début
2   Créer et initialiser les scalaires auxiliaires  $Idx_{ini}, Idx_{fin}, Idx_{ini}, t_{sign}, t_{fen_0}, t_{fen_0}, t_{fen_f}$ 
3   Créer et initialiser les vecteurs  $V_{idx_{ini}}$  et  $V_{idx_{fin}}$  pour stocker les indices initial et final de chaque fenêtre
4   Pour chaque valeur du signal  $i$  (en partant de  $i=2$ ) faire
5       Stocker la dernière valeur de  $Idx_{ini}$  en  $Idx_{ini\_1}$ 
6       Trouver la première fenêtre  $Idx_{ini}$  dont  $t_{fen_0}^{Idx_{ini}} \leq t[i]$ 
7       Trouver la première fenêtre  $Idx_{ini}$  dont  $t_{fen_f}^{Idx_{ini}} > t[i]$ 
8       Pour  $k$  de  $Idx_{ini} + 1$  à  $Idx_{ini}$  faire
9           Si  $t[i] \leq t_{fen_f}^k$  et on n'as pas encore trouvé un point qui appartient à la fenêtre alors
10              |  $i$  est le premier indice de la fenêtre  $k \rightarrow V_{idx_{ini}}[k] := i$ 
11              fin
12          fin
13          Pour  $k$  de  $Idx_{fin}$  à  $Idx_{ini}$  faire
14              |  $i$  est le dernier indice du signal dans la fenêtre  $k$  validé jusqu'à présent  $\rightarrow V_{idx_{fin}}[k] := i$ 
15              /* si dans la suite on trouve un autre indice supérieur à  $i$ , qui est dans
16              la fenêtre,  $V_{idx_{fin}}[k]$  sera écrasé */
17          fin
18   fin
19 Fin

```

Afin d'analyser la complexité de l'algorithme proposé, nous utiliserons le pseudo-code de l'Algorithme 4, dans lequel certains choix de programmation ont été faits; cependant, cette fois-ci nous avons décidé d'utiliser de la mémoire statique, étant donné que la taille des vecteurs de sortie est connue *a priori*. En général, l'utilisation de ce type de mémoire permet de réduire le coût de calcul d'un algorithme.

Tel que nous pouvons le voir sur l'Algorithme 4, suite à la phase d'initialisation, il y a une boucle qui contient quatre boucles internes indépendantes. En ce qui concerne le

Algorithme 4 : Détermination des points par fenêtre - version avancée**Entrée** : signal d'origine : $\mathbf{x}, \mathbf{t} \in \mathbb{R}^n$;nombre de fenêtres : m ;paramètres méthode : τ_e, τ_{fen} **Sortie** : 2 vecteurs avec les indices initial et final de toutes les fenêtres, $V_{idx_{ini}}$ et $V_{idx_{fin}}$ respectivement

```

1  Début
2  |  $Idx_{ini} = 1; Idx_{fin} = 1$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
3  |  $Idx_{ini\_1} = 0; t_{sign} = 0$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
4  |  $t_{fen_0} = 0; t_{fen_f} = 0$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
5  |  $V_{idx_{ini}} = [1; \mathbf{0}_{m-1}]$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
6  |  $V_{idx_{fin}} = \mathbf{0}_m$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
7  | Pour  $i := 2$  à  $n$  faire
8  | | /* boucle :  $\mathcal{O}(n)$  */
9  | |  $t_{sign} := \mathbf{t}[i]$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
10 | |  $Idx_{ini\_1} := Idx_{ini}$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
11 | | Tant que  $(t_{sign} \geq Idx_{ini} * \tau_e)$  et  $(t_{sign} < m * \tau_e)$  faire
12 | | | /* boucle :  $\mathcal{O}(\tilde{m}_1)$  */
13 | | |  $Idx_{ini} := Idx_{ini} + 1$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
14 | | | fin
15 | | Tant que  $(t_{sign} > (Idx_{fin} - 1) * \tau_e + \tau_{fen})$  et  $(Idx_{fin} \leq Idx_{ini})$  faire
16 | | | /* boucle :  $\mathcal{O}(\tilde{m}_2)$  */
17 | | |  $Idx_{fin} := Idx_{fin} + 1$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
18 | | | fin
19 | | | Pour  $k := (Idx_{ini\_1} + 1)$  à  $Idx_{ini}$  faire
20 | | | | /* boucle :  $\mathcal{O}(\tilde{m}_1)$  */
21 | | | | Si  $t_{sign} \leq (k - 1) * \tau_e + \tau_{fen}$  et  $V_{idx_{ini}}[k] == 0$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
22 | | | | alors
23 | | | | |  $V_{idx_{ini}}[k] := i$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
24 | | | | fin
25 | | | fin
26 | | Pour  $k := (Idx_{fin})$  à  $Idx_{ini}$  faire
27 | | | /* boucle :  $\mathcal{O}(\tilde{m}_2)$  */
28 | | |  $V_{idx_{fin}}[k] := i$  //  $\mathcal{O}(1)$ 
29 | | | fin
30 | fin
31 Fin

```

temps de calcul, les tâches d'initialisation (lignes 2-6) peuvent être exécutées en temps constant $\mathcal{O}(1)$; la boucle extérieure est exécutée $\mathcal{O}(n)$ fois, et chaque boucle interne est réalisée dans un temps moyen $\mathcal{O}(\tilde{m}_l)$, $l \in \{1,2\}$, où $\mathcal{O}(\tilde{m}_l)$ ne dépend pas directement du nombre de fenêtres m . Ainsi, en additionnant ces coûts, nous obtenons une complexité algorithmique amortie $\mathcal{O}(n(2\tilde{m}_1 + 2\tilde{m}_2) + 1) = \mathcal{O}(n(\tilde{m}_1 + \tilde{m}_2))$, avec $(\tilde{m}_1 + \tilde{m}_2) \ll m$ pour des grandes valeurs de m .

En ce qui concerne le coût en mémoire, nous connaissons exactement la quantité de mémoire requise par l'algorithme : six variables scalaires (Idx_{ini} , Idx_{end} , Idx_{ini_1} , t_{sign} , t_{fen_0} , t_{fen_f}) et deux vecteurs de taille m ($V_{idx_{ini}}$ et $V_{idx_{end}}$). En conséquence, le coût en mémoire associé à l'algorithme est $\mathcal{O}(2m + 6) = \mathcal{O}(m)$.

La Table 3.1 présente une synthèse de la complexité des deux algorithmes.

Algorithme	Temps	Mémoire
Naïf	$\mathcal{O}(n.m)$	$\approx \mathcal{O}(m)$ (dynamique)
Proposé	$\approx \mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(m)$ (statique)

TAB. 3.1 – Comparaison des algorithmes naïf et avancé, en vue du coût en temps et en mémoire

3.1.5 Application à des signaux de roulages réels

Ci-dessous, nous présenterons les résultats de la méthode proposée sur des signaux issus des roulages réels. Les signaux affichés correspondent à une fraction d'un roulage extra-urbain qui a eu lieu entre les villes de Guyancourt et de Versailles. Dans un premier temps, nous présenterons les résultats du filtrage des signaux et, ensuite, nous montrerons l'estimation de l'accélération et de l'à-coup.

3.1.5.1 Filtrage des signaux cinématiques

La Figure 3.12 présente le filtrage des signaux de vitesse et d'accélération du véhicule, mesurés par des capteurs sur les roues⁷ et par un accéléromètre, respectivement. Les Figures 3.12a et 3.12b montrent les signaux de vitesse ; nous pouvons constater que le signal traité est considérablement plus propre que le signal brut. Aussi, l'oscillation présente dans l'intervalle $t \in [18,20]$, laisse penser qu'il reste encore du bruit *coloré* sur le signal ; par contre, essayer d'enlever ce bruit peut avoir pour conséquence d'atténuer aussi des informations propres au mouvement du véhicule.

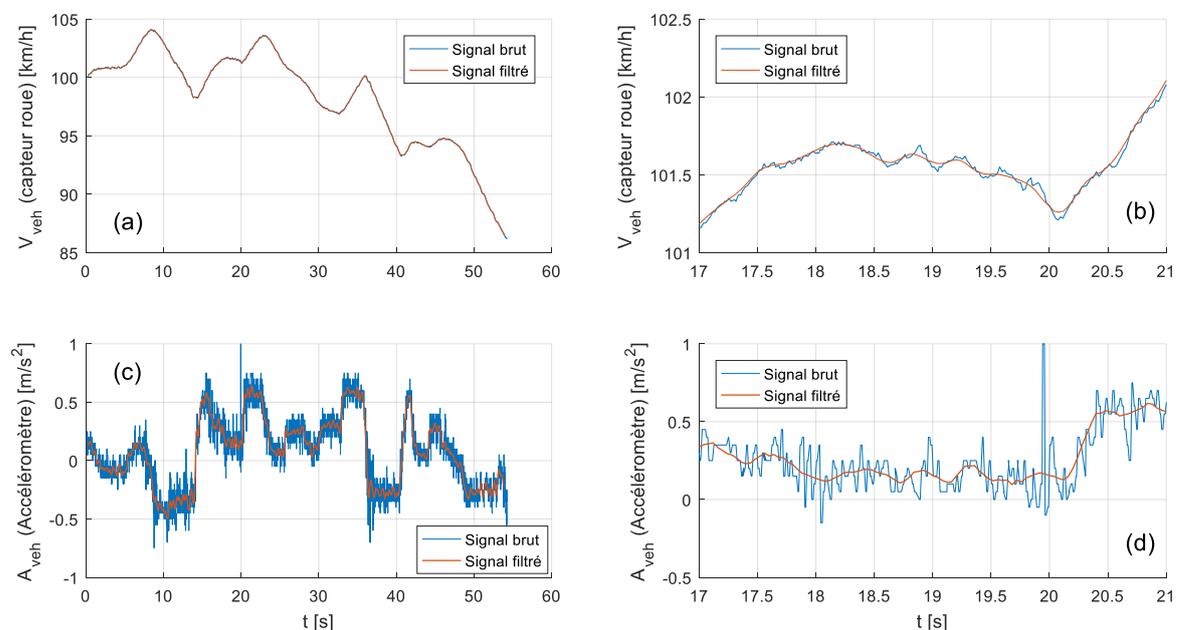


FIG. 3.12 – Traitement des signaux réels de roulage ; (a) Signal de vitesse, (b) Signal de vitesse - affichage zoomé, (c) signal d'accélération, (d) signal d'accélération - affichage zoomé

7. En réalité, il s'agit d'une reconstruction du signal de vitesse obtenue à partir des mesures de la vitesse des roues.

En ce qui concerne le signal d'accélération, l'amélioration due au filtrage est encore plus flagrante. Si l'on essayait d'estimer l'à-coup à partir du signal brut d'accélération, en utilisant des techniques linéaires, on obtiendrait assez difficilement un signal exploitable (pour un exemple, voir [207]). En revanche, il est assez évident qu'il reste encore du bruit dans le signal ; malheureusement, tout comme dans le cas de la vitesse, aller plus loin dans le filtrage pourrait dégrader la qualité du signal. Dans la section II.3.3, nous présenterons une approche nous permettant d'exploiter ce signal malgré le bruit restant.

Afin d'évaluer la qualité du filtrage, et de vérifier si nous avons bien préservé l'information utile du signal, nous avons analysé les écarts entre les signaux avant et après le traitement. Cela est illustré par la Figure 3.13. Les Figures 3.13a et 3.13c, montrent les écarts entre les signaux bruts et filtrés de vitesse et d'accélération, respectivement. Étant donné que les signaux bruts et traités n'avaient pas la même référence de temps, nous avons trouvé une reconstruction des premiers correspondant au vecteur de temps des signaux traités ; pour ce faire, nous avons utilisé une interpolation linéaire, ce qui a probablement affecté le contenu fréquentiel de ce signal⁸.

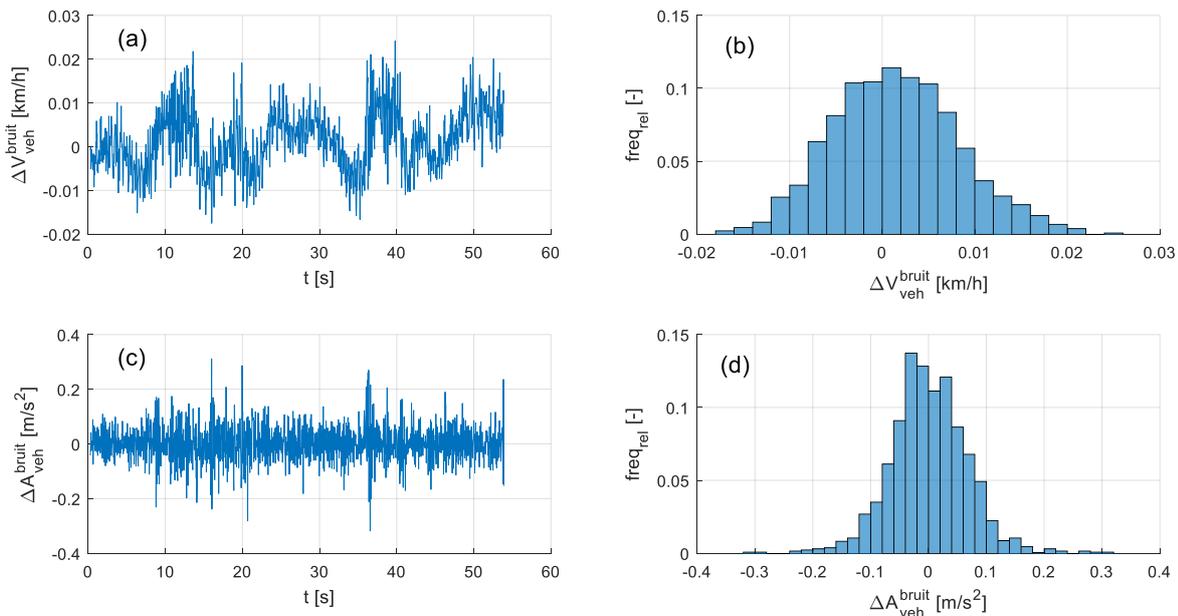


FIG. 3.13 – « bruit » filtré aux signaux cinématiques du véhicule ; écart entre le « signal d'origine » et le signal filtré ; (a) Signal de vitesse, (b) Histogramme - signal de vitesse, (c) signal d'accélération, (d) Histogramme - signal d'accélération

Les Figures 3.13b et 3.13d, présentent les histogrammes des écarts entre les signaux bruts et traités. Nous pouvons constater que les écarts suivent, tous les deux, des distributions proches de lois gaussiennes, ce qui semblerait indiquer qu'il s'agit bel et bien du bruit présent dans les signaux bruts. Pour avoir un indicateur supplémentaire de la préservation des informations des signaux, nous avons calculé le *coefficient de Pearson*, ou *coefficient de corrélations des échantillons* [21], $r_{x,y}$, permettant d'avoir un indicateur indépen-

8. En effet, l'interpolation a un effet de filtrage sur les signaux [161].

dant des unités. Il peut être calculé en utilisant (3.21), où $s_{x,y}$ est la covariance des signaux x et y ; s_x et s_y sont les écarts-types de x et y , respectivement.

$$r_{x,y} \triangleq \frac{s_{x,y}}{s_x \cdot s_y} \quad (3.21)$$

En ce qui concerne la vitesse du véhicule, nous avons trouvé un coefficient $r_{V_{veh}^{brut}, V_{veh}^{trait}} = -0.2528$, où V_{veh}^{brut} et V_{veh}^{trait} correspondent respectivement aux signaux brut et traité. Concernant l'accélération, la valeur du coefficient est $r_{A_{veh}^{brut}, A_{veh}^{trait}} = 0.2338$, A_{veh}^{brut} et A_{veh}^{trait} étant les signaux avant et après le filtrage. Les valeurs non-nulles de $r_{V_{veh}^{brut}, V_{veh}^{trait}}$ et $r_{A_{veh}^{brut}, A_{veh}^{trait}}$, pourrait indiquer une légère perte d'information, mais aussi la présence de bruit coloré⁹. Toutefois, ces valeurs étant assez petites, nous pouvons affirmer que vraisemblablement la majorité de l'information utile a été préservée suite au traitement des signaux.

3.1.5.2 Estimation de l'accélération et de l'à-coup

Nous allons désormais considérer l'estimation de l'accélération, à partir des mesures des capteurs aux roues, et de l'à-coup, à partir des mesures de l'accéléromètre, illustrées par la Figure 3.14. Nous constatons que l'estimation de l'accélération est assez proche de la mesure de l'accéléromètre. L'écart entre les deux signaux est probablement dû à l'effet de la pente; cela sera brièvement étudié dans la section suivante.

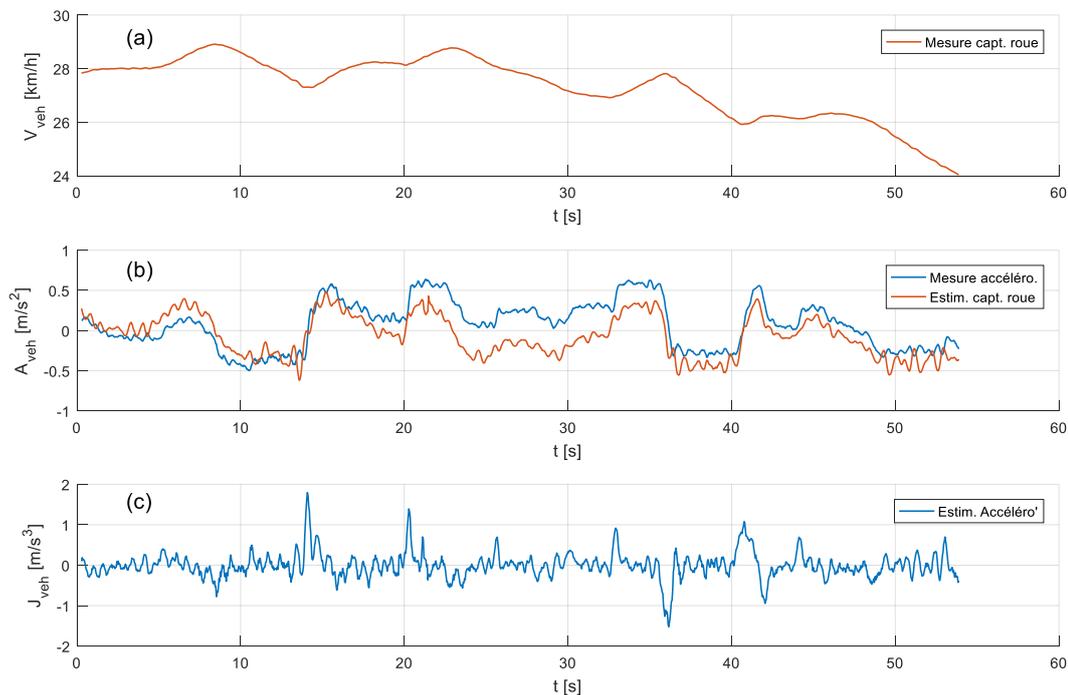


FIG. 3.14 – Estimation des signaux d'accélération et d'à-coup. (a) « mesure » de vitesse à partir des capteurs des roues; (b) accélération, mesurée et estimée (c) estimation de l'à-coup à partir du signal de l'accéléromètre

La Figure 3.14c montre l'estimation de l'à-coup. Malgré la présence de bruit dans le signal, les pics pourraient être représentatifs des phases transitoires des manœuvres.

9. cela permettrait d'expliquer, par exemple, le fait que $r_{V_{veh}^{brut}, V_{veh}^{trait}}$ soit négatif.

Malheureusement, nous n'avons pas de signal qui nous serve de parangon pour évaluer la qualité de l'estimation. Toutefois, nous avons estimé, de manière graphique, l'intégrale du signal d'à-coup lors d'un transitoire d'accélération ; ensuite, nous avons comparé cette valeur avec la variation d'accélération mesurée par l'accéléromètre. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.15. Nous pouvons voir que l'estimation du delta d'accélération, $A_{trpz} \approx 1,7669m/s^2$ est relativement proche de la valeur rapportée par l'accéléromètre $\Delta a_{veh} \approx 1.6588m/s^2$. Toutefois, en restant conservatifs, plutôt que de considérer l'estimation de l'à-coup, nous allons étudier cette grandeur en analysant directement les mesures d'accélération, tel qu'il sera discuté ultérieurement.

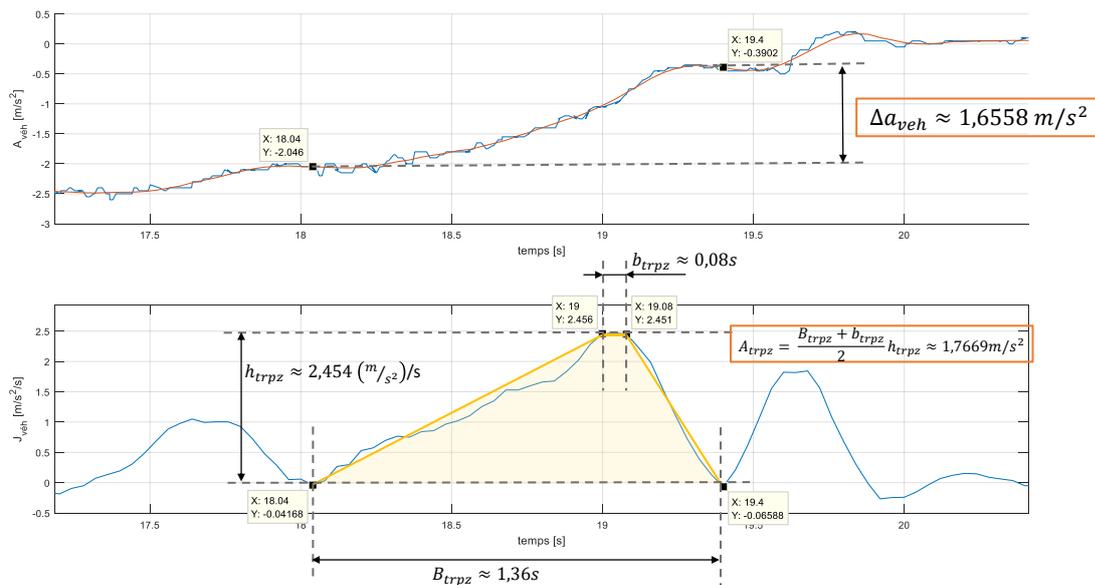


FIG. 3.15 – Vérification de l'estimation de l'à-coup

3.2 EXTRACTION D'EXEMPLES DE MANŒUVRES RÉELLES DE CONDUITE À PARTIR DES ENREGISTREMENTS

Objectif de la section

Extraire suffisamment des scénarii de conduite pour évaluer le modèle du conducteur proposé

Cette section s'intéresse à l'analyse et extraction des enregistrements des roulages. L'objectif principal étant d'extraire un nombre suffisant de scénarii de conduite, afin de vérifier la pertinence du modèle du conducteur proposé.

3.2.1 Interface pour l'analyse et extraction de scénarii de conduite

Pour faciliter le traitement, l'analyse et l'extraction des roulages, nous avons conçu l'interface graphique présentée sur la Figure 3.16. Celle-ci nous permet d'afficher simulta-

nément la vidéo associée au roulage, ainsi que les signaux issus des capteurs du véhicule. L'interface permet d'afficher des informations internes au véhicule, issues des capteurs des roues et de l'accéléromètre, ainsi que des informations associées à l'environnement de conduite. Il est possible de choisir l'instant de l'enregistrement à étudier. Finalement, des outils permettent de sélectionner et d'extraire des fractions de l'enregistrement pour pouvoir les analyser plus facilement.

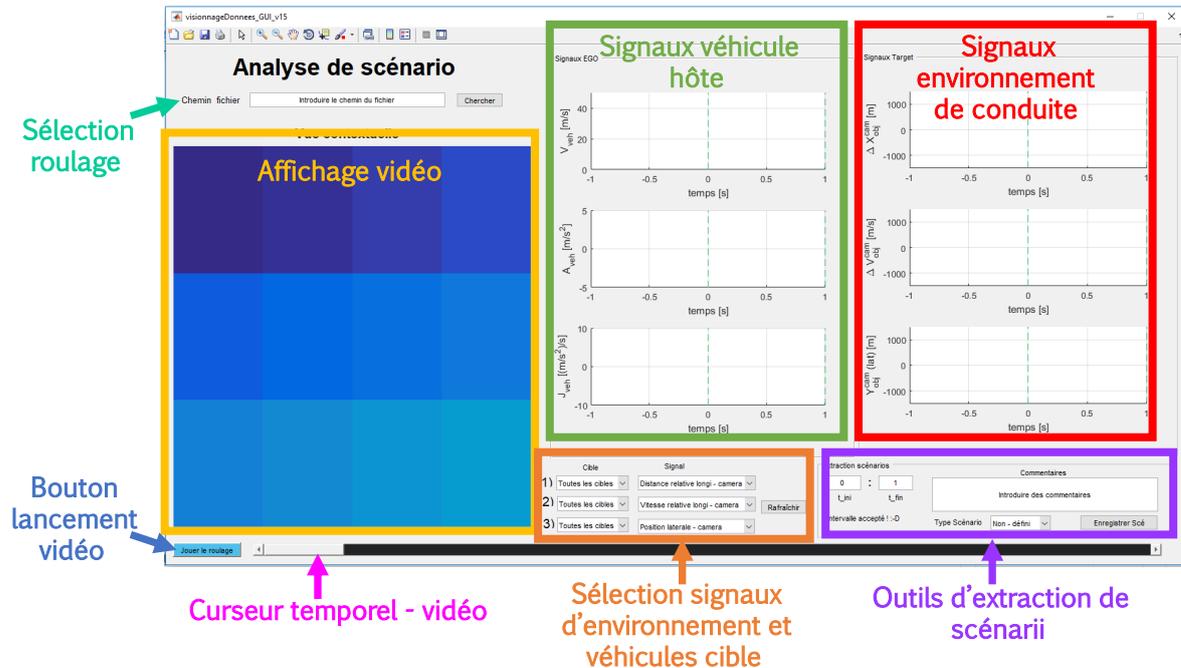


FIG. 3.16 – Interface graphique pour l'analyse et extraction de scénarii de roulage : présentation des différentes parties de l'interface

En ce qui concerne le *véhicule hôte*, ou *véhicule ego*, nous affichons sa vitesse, son accélération (la valeur estimée et la mesure de l'accéléromètre), et l'estimation de l'à-coup. Pour l'affichage des informations de l'*environnement de conduite*, nous avons décidé de laisser une grande liberté dans l'affichage des signaux. Chaque figure a deux menus qui leur sont associés dont l'un permet de choisir quel signal on va afficher ; ce menu peut proposer aussi la même grandeur mesurée par des capteurs différents comme, par exemple, la vitesse des objets environnants, pouvant être déterminée par le radar ou la caméra. Le deuxième menu permet, une fois le signal choisi, de sélectionner l'objet à afficher, parmi les différents éléments détectés par le capteur.

Pour permettre d'enregistrer des fractions de roulages, associées à des événements de conduite que l'on souhaiterait analyser, nous avons inclus un menu d'extraction de scénarii, dans lequel nous pouvons indiquer les instants initial et final du scénario ; on peut aussi, choisir le type de scénario à enregistrer (parmi une liste pré-définie), et mettre un commentaire pour faciliter l'analyse du scénario et la traçabilité. En appuyant sur le bouton d'enregistrement, on génère un fichier contenant tous les signaux du véhicule hôte et de l'environnement, ainsi que d'autres informations facilitant l'étude et la gestion des scénarii.

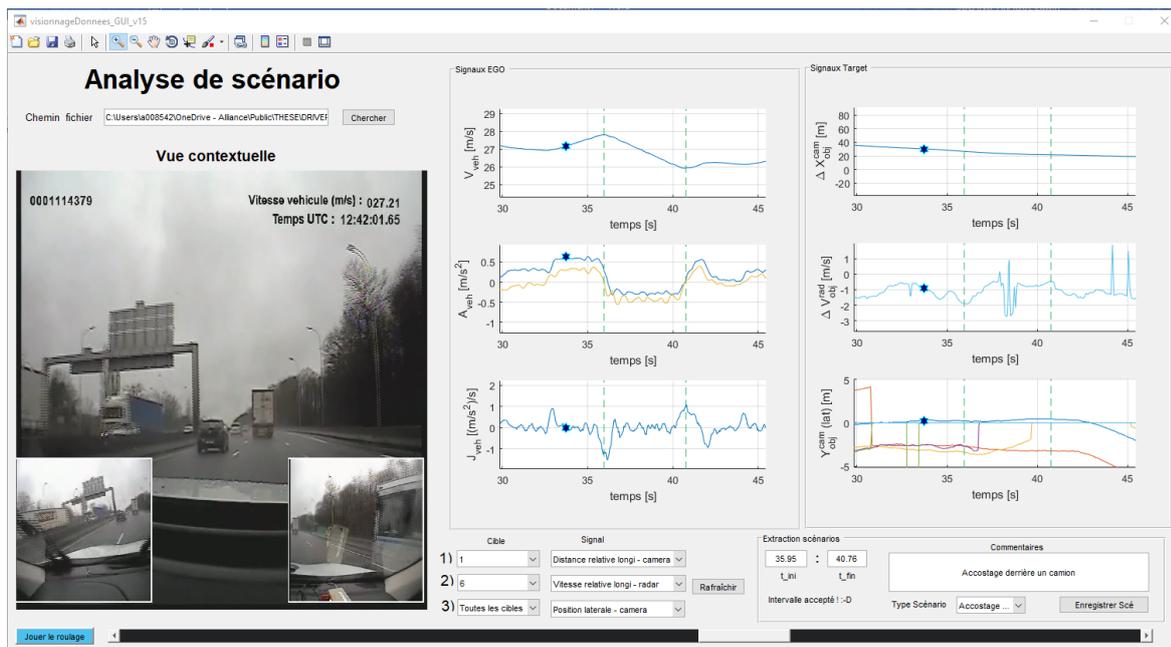


FIG. 3.17 – Interface graphique pour l'analyse et extraction de scénarii de roulage : affichage d'un roulage et extraction d'un scénario

Dans l'exemple de la Figure 3.17 nous présentons un scénario de roulage extra-urbain. On roule notamment derrière un camion. Concernant les signaux sur les objets environnants, nous affichons, sur la première figure, l'inter-distance avec le véhicule précédant (cible #1) estimée par la caméra; la deuxième figure présente la vitesse relative avec la cible #6 du radar; finalement, la dernière figure montre la position latérale des cibles, relative au milieu du véhicule hôte (une valeur positive correspondant à la gauche du véhicule). Les instants renseignés dans le menu d'extraction de scénario, correspondent à un scénario de décélération derrière un camion, les tirets visibles sur toutes les figures indiquent le début et la fin du scénario; le fait que les tirets soient verts confirme que le scénario est valide pour faire une extraction (dans le cas contraire, les traits seraient rouges). Le lecteur notera que la manœuvre de décélération considérée rappelle assez bien un profil trapézoïdal d'accélération, tel qu'ils ont été évoqués dans le Chapitre II.2.

3.2.2 Effet de la pente sur le signal de l'accéléromètre

Dans la section II.3.1.5.2 nous nous sommes interrogés sur l'origine de l'écart entre les signaux d'accélération issus des capteurs des roues et de l'accéléromètre. Une explication vraisemblable est le fait que l'accéléromètre soit soumis aux effets gravitationnels dus à la pente, ce qui n'est pas le cas avec l'estimation à partir du signal de vitesse. Dans cette section, nous allons explorer la pertinence de cette hypothèse.

Dans un véhicule, on peut définir différents types d'états, qui peuvent être de nature assez diverse. Des exemples sont : la vitesse et la position du véhicule, sa masse, la température de l'habitacle, ou du système de dé-pollution, le niveau de carburant dans le

réservoir ou l'état de charge de la batterie. Parmi ces états, a priori, seuls les trois premiers devraient avoir une influence considérable sur la mesure de l'accéléromètre¹⁰.

La position est l'état qui détermine la pente du véhicule. Nous devons donc étudier la mesure de l'accéléromètre, pour des positions différentes, tout en gardant les deux autres états d'intérêt (c-à-d, la vitesse et la masse du véhicule) à des valeurs relativement constantes. Pour ce faire, nous avons étudié le comportement du signal d'accélération mesuré, pendant des phases d'arrêt du véhicule, lors d'un roulage dans la ville de Versailles. Pendant ces phases, le véhicule aura à chaque fois la même vitesse (0km/h), et la masse sera presque identique¹¹. Si nous trouvons que les mesures d'accélération sont *significativement différentes* à chaque arrêt, cela montrerait qu'un facteur extérieur change à chaque position du véhicule. Ce paramètre est probablement l'inclinaison de la route.

La Figure 3.18 montre les premières 500 secondes du roulage considéré, d'une durée totale de 1441s. Les zones colorées montrent des phases d'arrêt du véhicule considérées, associées à des feux de circulation. Nous avons uniquement considéré des arrêts dont la durée était supérieure à 14s, afin de favoriser le fait d'avoir un nombre suffisant de points pour chaque phase. Un total de huit arrêts ont été étudiés. Afin de réduire le niveau de bruit, ainsi que l'impact des valeurs aberrantes dans le signal, nous avons appliqué un filtre médian avec une fenêtre glissante de durée 1s.

La figure met en évidence que la mesure de l'accéléromètre varie à chaque arrêt ; cette différence peut être positive ou négative, et elle semble relativement constante tout au long de la phase d'arrêt. Afin de vérifier que les différences ne soient pas dues à du bruit, nous avons réalisé un test statistique. Afin de déterminer si les valeurs d'accélération à chaque arrêt suivent une distribution normale, nous avons appliqué le test de Kolmogorov-Smirnov [130], à un seuil de signification de 5%, sur les points associés à chaque phase. Ne connaissant ni la valeur moyenne, ni l'écart-type des distributions, nous les avons estimées à partir des échantillons correspondants ; cependant, cela n'affecte pas la validité du test, dans la mesure où il s'agit d'un choix assez conservateur [118]. Le test a montré que, dans six cas sur huit, il est peu probable que les signaux suivent une distribution normale ; ce qui nous conduit à privilégier un test non-paramétrique. En outre, nous avons à faire à plus de deux populations. En vue de cela, nous avons décidé d'utiliser le test de Kruskal-Wallis [85, 86].

L'application du test (en utilisant la fonction Matlab *kruskalwallis* [132]) montre que les échantillons proviennent de populations différentes, avec une valeur-p inférieure à ce que le format à double précision permet de représenter. La Figure 3.19 présente des *boîtes à moustaches* associées aux huit arrêts. Ces résultats montrent qu'il est quasiment sûr

10. La vitesse et la position étant de nature cinématique, donc il peuvent influencer l'accéléromètre, qui est aussi de nature cinématique. En fonction de la masse du véhicule, et surtout de la répartition des masses, la voiture peut être plus ou moins inclinée, ce qui peut influencer l'information reçue par l'accéléromètre.

11. En toute rigueur, dans le cas d'un véhicule à motorisation thermique, la masse sera légèrement différente à chaque phase d'arrêt, du fait que la masse de gaz sortant est inférieure à la masse entrant ; cependant, l'impact de ce phénomène est négligeable.

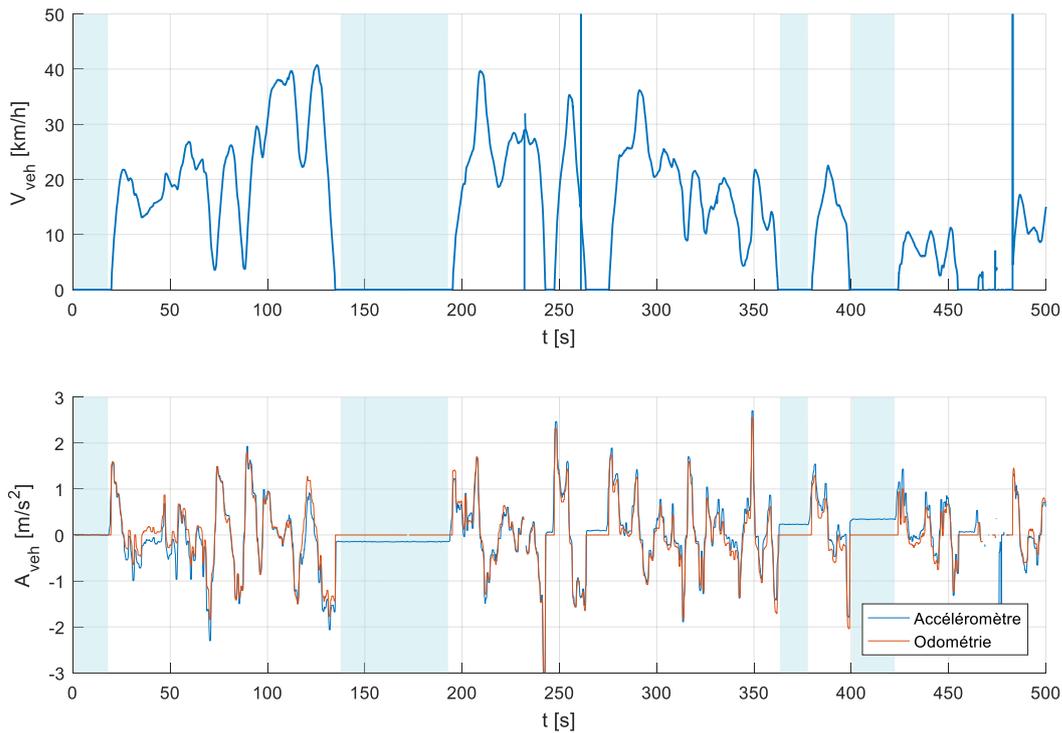


FIG. 3.18 – Roulage utilisé pour l'étude de l'effet de la pente sur la mesure de l'accéléromètre - 500 premières secondes du roulage

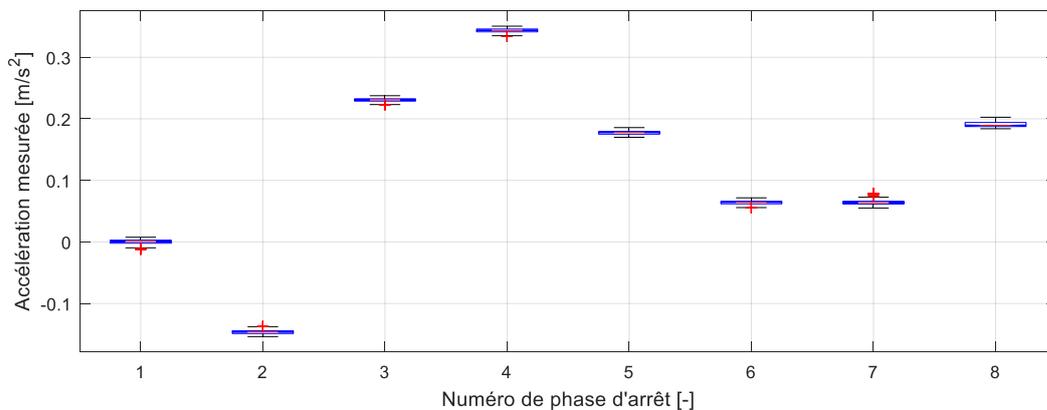


FIG. 3.19 – Roulage utilisé pour l'étude de l'effet de la pente sur la mesure de l'accéléromètre - 500 premières secondes du roulage ; les zones bleues correspondent aux phases d'arrêt étudiées

qu'une variable extérieure, associée à la position du véhicule, affecte les mesures d'accélérations. Il nous semble fort probable qu'il s'agisse de l'inclinaison de la route.

* * *

Finalement, afin d'étudier l'influence de la vitesse du véhicule sur la mesure d'accélération, nous avons calculé le coefficient de Pearson entre les signaux d'accélération et de vitesse. Nous avons trouvé une valeur $r_{A_{veh}^{accl}, v_{veh}^{roue}} = -0.0453$, ce qui montre que la vitesse a peu d'influence sur la mesure de l'accéléromètre.

Ces résultats nous permettent de faire l'hypothèse que l'accéléromètre détecte simultanément les effets dus à l'accélération et à la pesanteur, alors que l'estimation odométrique

(issue des capteurs aux roues) tient compte uniquement de la cinématique du véhicule. Ainsi, par la suite, nous considérerons que le signal issu de l'odométrie, A_{veh}^{odom} , est représentatif de l'accélération absolue du véhicule ; alors que celui de l'accéléromètre, A_{veh}^{accl} , représente l'accélération ressentie par le conducteur, dans son propre référentiel.

3.2.3 Extraction de manœuvres de conduite

A l'aide de l'interface graphique présentée sur la section II.3.2.1, nous avons analysé plusieurs roulages, urbains et extra-urbains, qui font au total environ une heure (plus exactement 3470,14 s). Sur ces roulages, nous avons sélectionné des manœuvres de conduite qui, en nous basant sur la définition donnée au début du Chapitre II.2, correspondent à des transitions entre deux valeurs relativement constantes de la vitesse du véhicule.

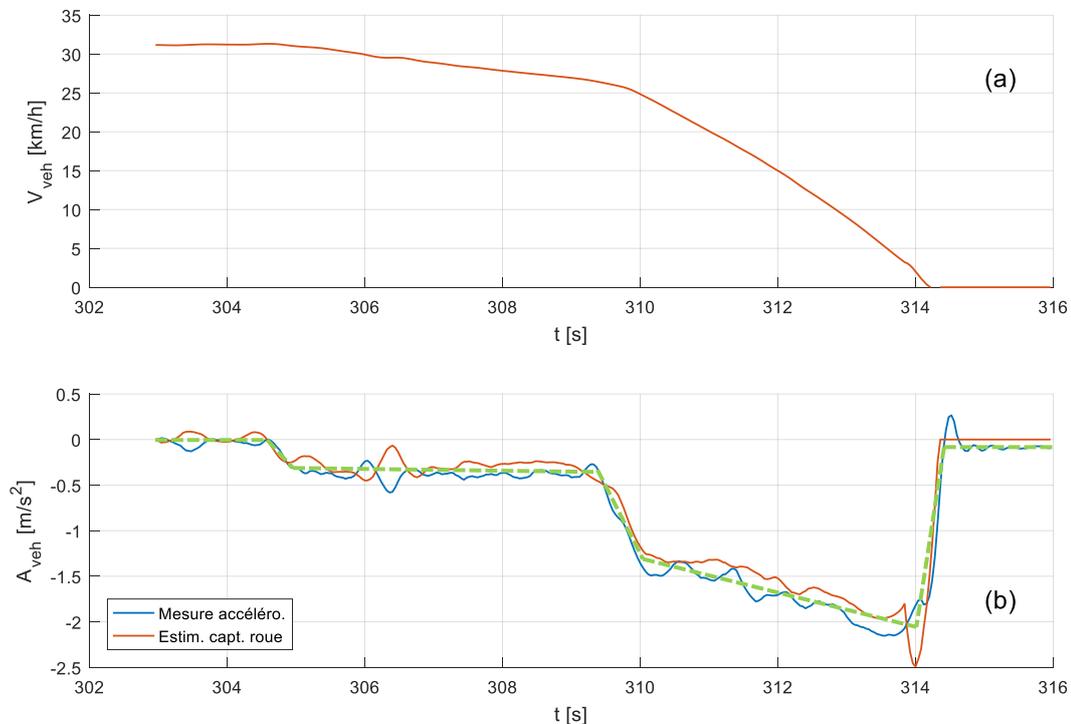


FIG. 3.20 – Manœuvre assimilable à une fonction affine par parties - Décélération jusqu'à l'arrêt

La Figure 3.20 présente un exemple de manœuvre. Les lignes vertes sur la figure, ont été ajoutées manuellement pour illustrer le fait que la manœuvre peut être représentée par un modèle affine par morceaux, correspondant à une suite de phases transitoires et stabilisées, selon la modélisation du Chapitre II.2. La manœuvre en question commence par une phase de levée de pied, où la voiture décélère sous l'action du frein moteur, assimilable à une petite phase transitoire, suivie d'une phase stabilisée relativement longue. Ensuite, le conducteur appuie sur la pédale de frein ; cette dernière partie peut être grossièrement représentée par une suite de trois phases transitoires.

Nous avons expressément choisi de montrer une manœuvre qui ne correspond pas aux exemples de la section II.2.3 (des trapèzes assez réguliers, à trois phases : *transitoire* -

stabilisée - transitoire). Cet exemple met en évidence les limites de notre modèle. Il existe, en effet, une grande diversité dans les manœuvres, et que essayer de définir une seule topologie compatible avec toutes les situations de conduite, semble être une entreprise assez difficile. Même la représentation assez générale des manœuvres comme des fonctions affines par morceaux s'avère insuffisante pour représenter toute la diversité des événements de roulage à bord d'un véhicule.

Dans la suite de la discussion, nous nous allons centrer notre attention sur une topologie compatible avec des systèmes de commande. En effet, une ambition plus réaliste et pertinente est de trouver une topologie de manœuvre suffisamment simple pour pouvoir être appliquée dans une fonction de conduite automatisée, et suffisamment générale pour représenter un nombre conséquent de scénarii, sur des diverses situations de conduite. Nous proposons que ladite topologie pourrait être un profil trapézoïdal d'accélération, constitué par une première phase transitoire, suivie d'une phase stabilisé, et clôturé par une dernière phase transitoire, tel que celle de la section II.2.3.2.

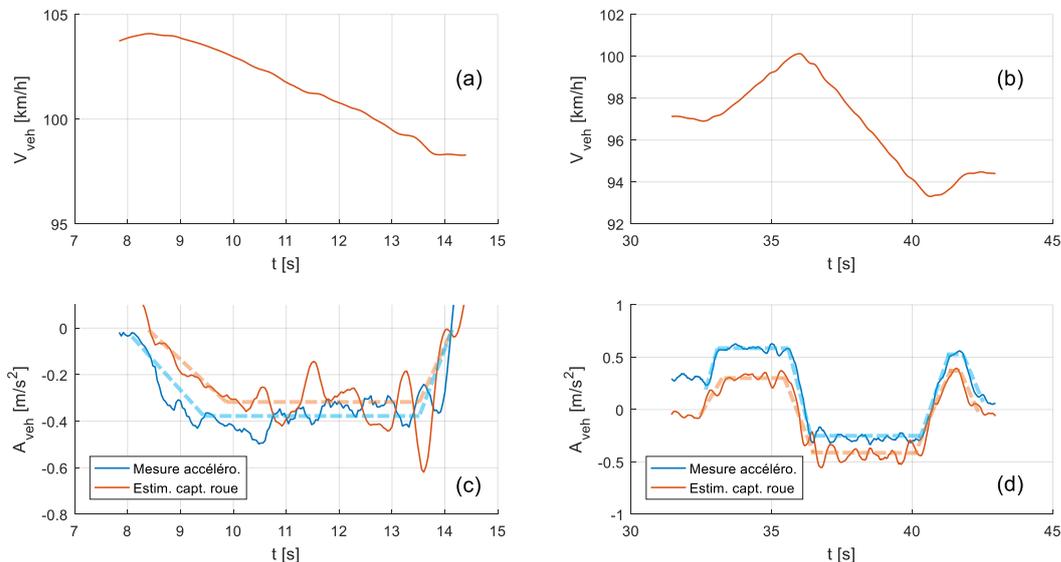


FIG. 3.21 – Exemples de manœuvres assimilables à des trapèzes ; (a) et (c) manœuvre simple, (b) et (d) manœuvre composée

La Figure 3.21 montre deux exemples de manœuvres pouvant être représentées par un ou plusieurs trapèzes. Les Figures 3.21a et 3.21c présentent une manœuvre simple, qui a eu lieu sur une route départementale, lors d'un léger virage. Même si l'enregistrement est assez bruité, la manœuvre garde une certaine ressemblance avec un trapèze. Les Figures 3.21b et 3.21d montrent une manœuvre plus complexe, pouvant être représentée par une suite de plusieurs trapèzes. Celle-ci correspond au rapprochement du véhicule à la voiture cible, suivi d'une décélération jusqu'à une vitesse inférieure à celle du véhicule précédant ; la manœuvre est complétée par une légère accélération permettant de rouler à, à peu près, la même vitesse que la cible. C'est, à peu de chose près, scénario présenté sur la Figure 1.5 du Chapitre I.1. Nous avons approximé manuellement les manœuvres par des trapèzes, comme montré par des tiretés.

Le lecteur aura remarqué la présence d'une quantité non négligeable de bruit. A cela s'ajoute le fait que les transitoires n'ont pas lieu à des à-coup parfaitement constants (ce que notre approximation implique). Ces deux faits rendent l'approximation manuelle des trapèzes un exercice trop subjectif et peu répétable. Cela met en évidence le besoin d'une méthodologie d'approximation des manœuvres par des trapèzes, basée sur des critères objectifs, afin de pouvoir avoir une représentation fiable des manœuvres. En outre, la Figure 3.21c montre qu'il peut être assez difficile de décider si certaines manœuvres peuvent être représentées ou non par des trapèzes. La section II.3.3 répondra à ces deux interrogations, mais avant nous parlerons des manœuvres à étudier.

* * *

Afin d'étudier le comportement du conducteur, nous avons constitué une base de données de manœuvres de conduite. Nous avons décidé de considérer uniquement des manœuvres simples (représentables par un seul trapèze); cependant, cela n'exclut pas la possibilité de considérer des manœuvres complexes, à condition que celles-ci puissent être, au moins partiellement, décomposées en des manœuvres simples, trapézoïdales. Par exemple, le scénario des Figures 3.21b et 3.21d peut être décomposé en trois manœuvres élémentaires : deux accélérations et une décélération.

A partir des données de roulages, nous avons extrait des manœuvres d'accélération et décélération, dans des contextes urbain et extra-urbain. Quand il a été possible, notamment dans les cas urbains, nous avons extrait 50 exemples de manœuvres ; dans les autres cas, nous avons extrait la totalité d'exemples disponibles qui semblaient exploitables. Le contenu de la base de données est synthétisé sur le Tableau 3.2.

Contexte	Type de manœuvre	Nombre de manœuvres	Durée des manœuvres
Urbain	Accélération	50	4.0528 ± 2.4066
	Décélération	50	3.1172 ± 1.9511
Extra-urbain	Accélération	28	4.6414 ± 3.0150
	Décélération	12	4.2858 ± 1.3877

TAB. 3.2 – Contenu de la base de données de manœuvres de conduite

Dû au nombre limité de roulages, réalisés par un nombre très restreint de conducteurs, notre étude ne représente qu'une partie de la diversité des comportements et de styles de conduite du conducteur. Toutefois, notre analyse a le potentiel de montrer si les actions du conducteur peuvent être décrites par le cadre de modélisation proposé. De plus, la méthodologie proposée pourrait être appliquée à un échantillon plus représentatif des styles de conduite, afin d'en tirer des conclusions générales sur le comportement des conducteurs.

3.2.4 Elimination de valeurs aberrantes dans les enregistrements des manœuvres

Dans certains enregistrements des manœuvres de conduite, il y a eu de problèmes de transmission, qui se sont traduits par des valeurs aberrantes dans les profils d'accéléra-

tion. Ce type de problème est assez courant lorsqu'on a à faire à des signaux industriels. En vue du nombre limité de manœuvres à notre disposition, et même si les nombre d'enregistrements concernés est faible, nous avons décidé de garder ces signaux, en appliquant une technique d'extraction de valeurs aberrantes que nous allons expliquer par la suite.

Pour l'élimination de valeurs aberrantes, nous avons considéré comme critère la *dévi-ation absolue autour de la médiane*, selon qu'il est présenté sur Leys et al. (2013) [115]. La méthode utilise comme mesure de tendance central la médiane qui, à différence de la valeur moyenne est très peu sensible à la présence de valeurs aberrantes¹². La même affirmation applique pour la Déviation Absolue Médiane (DAM, *Median Absolute Deviation*). De plus, la DAM n'est pas affectée par la taille de l'échantillon.

La DAM peut être calculée grâce à (3.22), où $\underline{y} \in \mathbb{R}^n$ contient les n observations de l'enregistrement, $M = \text{median}(\underline{y})$ est la médiane du vecteur, et $b \in \mathbb{R}$ est une constante associée à la distribution de probabilité des données. La valeur $b = 1.4826$ correspond à une distribution gaussienne et, si une autre distribution est considérée, on peut calculer sa valeur comme $b = 1/Q(0.75)$, où $Q(0.75)$ est le 0.75 quantile associé à la distribution. Dans notre cas, nous avons gardé $b = 1.4826$, car cette valeur a donné des bons résultats dans la pratique.

$$DAM(\underline{y}) = b \text{median} \left(\left| \underline{y} - \text{median}(\underline{y}) \right| \right) \quad (3.22)$$

Une fois que la médiane M et la DAM de nos données ont été calculées, le critère pour retenir une valeur y_i , c'est-à-dire pour considérer qu'il n'est s'agit pas d'une valeur aberrante, est donné par (3.23), où c_r est un paramètre permettant d'ajuster à quel point on souhaite rester prudent au moment de rejeter une observation. Pour le choix de c_r , on propose sur [115, 141]: $c_r = 3$ correspond à être très prudent, $c_r = 2.5$ à être modé- rément prudent, et $c_r = 2$ à l'être peu; cependant, en vue de la nature des signaux des manœuvres, ayant des transitoires initial et final, la prise en compte de ces valeurs de c_r conduit à exclure beaucoup de points en début et en fin de manœuvre. Ainsi, nous avons trouvé que la valeur $c_r = 7.5$ permet d'aboutir à des résultats satisfaisants.

$$M - c_r \cdot DAM < y_i < M + c_r \cdot DAM \quad (3.23)$$

Une équation équivalente est :

$$\left| \frac{y_i - M}{DAM} \right| \geq c_r \quad (3.24)$$

La Figure 3.22 montre deux exemples de signaux présentant des valeurs aberrantes sur lesquels la méthode a été appliquée. Étant donné que la méthode de filtrage a été

12. Cette affirmation se justifie si l'on compare les points de rupture de la valeur moyenne et de la médiane. Le *point de rupture d'un estimateur* est la proportion d'observations qui peuvent être *contaminées* (en prenant une valeur infinie) sans que la valeur de l'estimateur soit fortement faussée (en prenant une valeur infinie ou nulle, selon le type d'estimateur). Le point de rupture de la moyenne est de 0, ce qui veut dire qu'il suffit d'avoir une seule observation qui tende vers l'infini pour que la moyenne tende vers l'infini; en revanche, le point de rupture de la médiane est de 0.5, ce qui veut dire que la médiane d'un échantillon devient absurde quand plus de la moitié des échantillons sont contaminés. La médiane est l'estimateur de tendance centrale ayant le plus grand point de rupture [115, 177].

préalablement appliquée aux données, l'amplitude des valeurs aberrantes est moindre par rapport à celle des signaux bruts. Nous pouvons voir que cette technique permet d'enlever une grosse partie des valeurs erronées, sans avoir un impact important sur les points faisant partie des transitoires de la manœuvre ; en revanche, pour pouvoir garder ces valeurs, il a fallu garder une valeur de c_r importante, ce qui a eu pour conséquence que certaines valeurs aberrantes ont été conservées. Toutefois, tel que nous le verrons plus tard, en formulant sciemment la problème d'identification, il est possible de compenser ce fait.

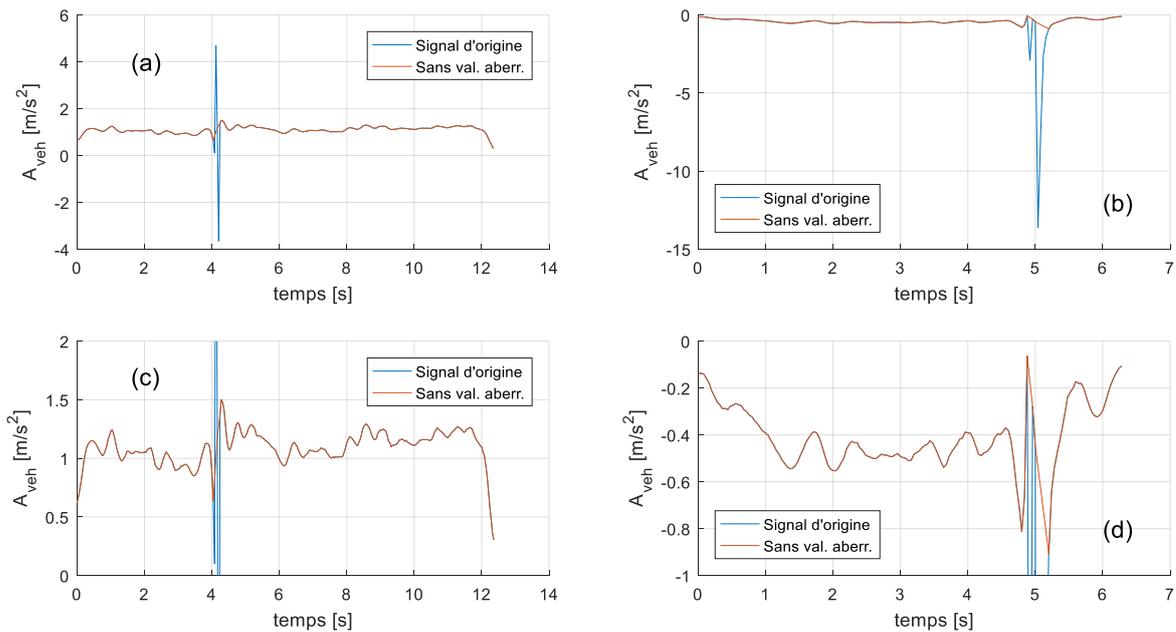


FIG. 3.22 – Exemples d'application de la méthode de suppression des valeurs aberrantes dans les enregistrements des manœuvres de conduite ; (a) et (c) exemple d'une manœuvre d'accélération, les données provenant de l'accéléromètre, (b) et (d) exemple d'une manœuvre de décélération, les données provenant des capteurs dans les roues

3.3 APPROXIMATION TRAPÉZOÏDALE DES MANŒUVRES DE CONDUITE

Objectif de la section

Approximer les manœuvres par des trapèzes, sous la base de critères objectifs

Tel que nous l'avons dit précédemment, il est nécessaire de définir des critères objectifs pour l'identification des trapèzes associés aux manœuvres. Pour ce faire, nous proposons une méthode d'identification, qui modélise l'approximation de trapèzes comme un problème d'optimisation.

3.3.1 Formulation du problème d'identification de manœuvres de conduite

Pour formuler le problème d'identification, nous allons faire l'hypothèse que chaque manœuvre peut être « parfaitement » représentée par un modèle trapézoïdal. Dans ce contexte, « parfaitement » veut tout simplement dire que ce modèle est capable de capturer l'essence de ce qui se passe pendant la manœuvre. Nous appellerons cela un « modèle trapézoïdal de mesure¹³. »

En outre, nous considérerons que le bruit de mesure est une variable indépendante et identiquement distribuée. Il s'agit d'une hypothèse grossière et probablement fautive, mais elle est utile pour faire nos démonstrations et, dans la pratique, elle ne devrait pas gêner de manière considérable la pertinence des résultats.

Ainsi, notre modèle de mesure trapézoïdal peut être exprimé par les équations (3.25) et (3.26), où $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^n$ correspond aux mesures d'accélération de la manœuvre (issues de l'enregistrement du roulage), $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur de temps de l'enregistrement, $\underline{\theta} \in \mathbb{R}^m$ contient les paramètres du modèle trapézoïdal de roulage, et c'est donc la variable à identifier. $\underline{\nu} \in \mathbb{R}^n$ est « l'erreur de mesure »; nous supposons ici qu'il s'agit d'une variable aléatoire qui suit une distribution de probabilité de la forme $p_\nu(\nu)$.

$$\mathbf{a} = \mathbf{f}_{tr}(\underline{\theta}, \mathbf{t}) + \underline{\nu} \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{tr}(\underline{\theta}, t_1) \\ f_{tr}(\underline{\theta}, t_2) \\ \vdots \\ f_{tr}(\underline{\theta}, t_i) \\ \vdots \\ f_{tr}(\underline{\theta}, t_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \vdots \\ \nu_k \\ \vdots \\ \nu_{m_i} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Pour chaque manœuvre, \mathbf{a} et \mathbf{t} , connus d'avance, sont les entrées du problème, et $\underline{\theta}$ en est la sortie. Chaque résidu, ν_i , correspond à l'écart à l'instant t_i entre la mesure et l'estimation. Le modèle trapézoïdal de mesure est défini par la fonction $f_{tr}(\underline{\theta}, t)$, dont la forme est connue d'avance, et sera présentée sur la section II.3.3.1.1. La Figure 3.23 illustre la notation utilisée.

L'identification du trapèze peut donc être formulé comme le problème d'optimisation suivant :

$$\underset{\underline{\theta}}{\text{minimiser}} \quad \Phi(\underline{\nu}(\underline{\theta})) = \Phi(\mathbf{a} - \mathbf{f}_{tr}(\underline{\theta}, \mathbf{t})) \quad (3.27)$$

3.3.1.1 Modèle trapézoïdal de mesure, $f_{tr}(\underline{\theta}, t)$

Après avoir étudié un nombre suffisant d'enregistrements de roulage, nous avons formulé notre modèle trapézoïdal de manœuvres. La formulation proposée permet de représenter un grand nombre de cas possibles. Elle est basée sur la comparaison des trois fonctions affines, f_1 , f_2 et f_3 , représentées sur la Figure 3.24.

13. Ce nom cherche à être compatible avec la notation du chapitre 7 de [22].

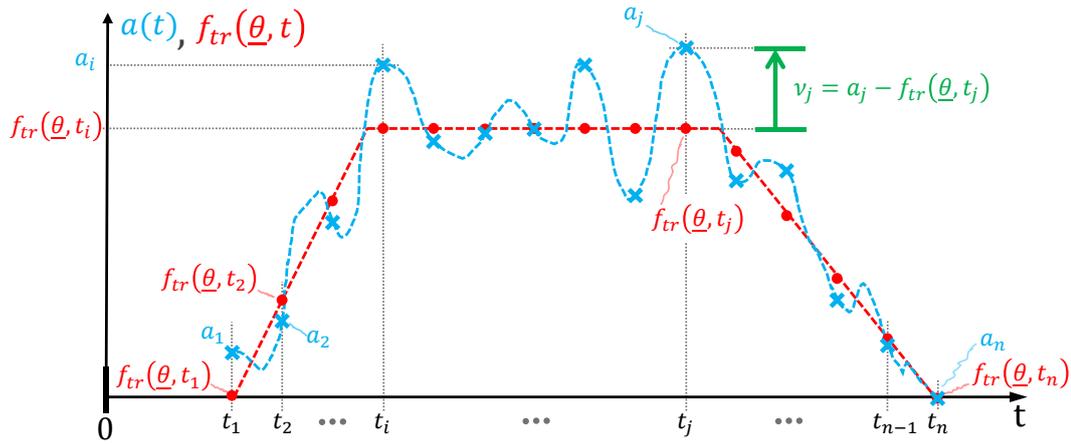


FIG. 3.23 – Notation du problème d'identification de trapèzes

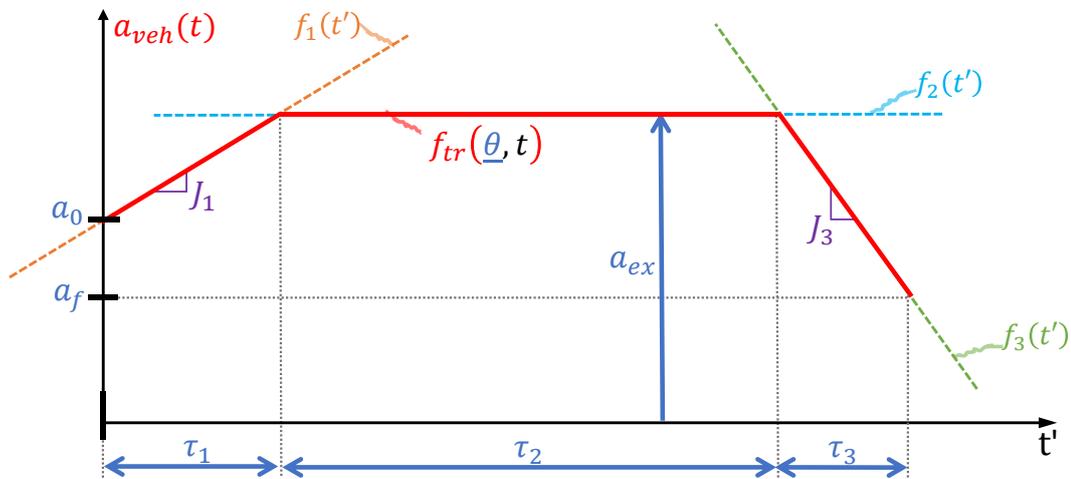


FIG. 3.24 – Modèle trapézoïdal de mesure

Les fonctions f_1 , f_2 et f_3 sont définies sur (3.28)-(3.30). Sur ces équations, a_0 et a_f sont respectivement les accélérations initiale et finale de la manœuvre ; a_{ex} est l'accélération de la phase stabilisée (« *ex* » comme *extremum*) ; τ_1 , τ_2 et τ_3 sont les durées des phases initiale, intermédiaire et finale de la manœuvre, respectivement. Afin de simplifier les calculs, les fonctions sont définies par rapport à un nouveau référentiel de temps $t' = t - t_1$.

$$f_1(t') = \left(\frac{a_{ex} - a_0}{\tau_1} \right) t' + a_0 \quad (3.28)$$

$$f_2(t') = a_{ex} \quad (3.29)$$

$$f_3(t') = \left(\frac{a_f - a_{ex}}{\tau_3} \right) t' + \left[a_f - \left(\frac{a_f - a_{ex}}{\tau_3} \right) \tau_{mnv} \right] \quad (3.30)$$

Étant donné que nous travaillons avec un enregistrement, la durée de la manœuvre est connue à l'avance, et elle peut-être calculée par $\tau_{mnv} = t_n - t_1$. Ainsi nous avons la condition supplémentaire (3.31) à respecter.

$$\tau_{mnv} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad (3.31)$$

La manœuvre de conduite $f_{tr}(\underline{\theta}, t)$, peut être calculé en comparant les valeurs des fonctions f_1 , f_2 et f_3 , en fonction du type de manœuvre. Pour les accélérations ($a_{ex} \geq 0$),

nous devons calculer le minimum temporel entre les trois fonctions ; lorsque nous avons des décélérations ($a_{ex} \leq 0$), nous devons calculer le maximum des trois fonctions. Ainsi, le modèle trapézoïdal de manœuvres est donné par :

$$f_{tr}(\underline{\theta}, t) = \begin{cases} \max\{f_1(\underline{\theta}, t) f_2(\underline{\theta}, t) f_3(\underline{\theta}, t)\} & , \theta_3 = a_{ex} < 0 \\ \min\{f_1(\underline{\theta}, t) f_2(\underline{\theta}, t) f_3(\underline{\theta}, t)\} & , \theta_3 = a_{ex} \geq 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

En ce qui concerne la définition des paramètres d'optimisation, $\underline{\theta}$, la condition (3.31) nous permettra de calculer l'un des paramètres de f_{tr} ; dans notre formulation, nous avons choisi de l'utiliser pour le calcul de τ_2 . Ainsi, dans le cas général, nous avons comme paramètres d'optimisation $\underline{\theta} = [\tau_1, \tau_3, a_{ex}, a_0, a_f]^T$.

Il existe plusieurs choix envisageables des contraintes que l'on peut appliquer sur les valeurs limites de la manœuvre, $\theta_4 = a_0$ et $\theta_5 = a_f$, dont chacun implique des avantages et des limitations. A continuation, nous présentons les trois qui nous semblent les plus intéressants :

- **Manœuvre avec des valeurs limites libres** : si on n'impose pas de contraintes sur les valeurs de a_0 et a_f , et que l'on résout le problème d'optimisation (3.27), nous aurons la plus grande flexibilité pour pouvoir approximer les valeurs mesurées. En revanche, du fait que le problème n'est pas convexe dans le cas général, l'optimisation peut tomber sur un minimum local avec des valeurs non pertinentes de a_0 et a_f . Nous l'avons constaté ce fait, de manière empirique, sur des cas où l'optimisation s'est arrêtée avec $a_0 = a_{ex}$, ce qui éliminait la première phase transitoire de la manœuvre. Cette solution correspondait à un minimum local, mais on pouvait voir facilement qu'il ne s'agissait pas du minimum global de problème.
- **Manœuvre avec des valeurs limites fixées** : une autre possibilité de formulation du problème d'optimisation est donnée par :

$$\begin{aligned} & \underset{\underline{\theta}}{\text{minimiser}} && \Phi(\underline{\mathbf{a}} - \underline{\mathbf{f}}_{tr}(\underline{\theta}, \underline{\mathbf{t}})) \\ & \text{tel que} && \theta_4 = a_1 \\ & && \theta_5 = a_n \end{aligned} \quad (3.33)$$

où les contraintes $a_0 = \theta_4 = a_1$ et $a_f = \theta_5 = a_n$ imposent au modèle de prendre les mêmes valeurs initiales et finales que les mesures. Cela a l'avantage de garantir que la topologie de la manœuvre soit respectée ; par contre, le fait de copier les valeurs des mesures implique de prendre également le bruit qu'elles contiennent, pouvant être assez conséquent dans certains cas.

Ce problème peut être aussi représenté par la formulation de (3.27), en définissant $\underline{\theta} = [\tau_1, \tau_3, a_{ex}]^T$. Cela permet d'avoir un problème d'optimisation sans contraintes, plus facile et moins coûteux à résoudre.

- **Manœuvre avec des contraintes « de boîte » sur ses valeurs limites** : finalement, une solution nous permettant de faire un bon compromis entre les deux formulations précédentes consiste en imposer que les valeurs initiale et finale du modèle ne

doivent pas trop s'éloigner des valeurs des mesures, ce qui peut-être représenté par des contraintes d'inégalité. Cela donnerait lieu au problème d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} & \underset{\underline{\theta}}{\text{minimiser}} \quad \Phi(\underline{\mathbf{a}} - \underline{\mathbf{f}}_{\text{tr}}(\underline{\theta}, \underline{\mathbf{t}})) \\ & \text{tel que} \quad \check{a}_0 \leq \theta_4 (= a_0) \leq \hat{a}_0 \\ & \quad \quad \check{a}_f \leq \theta_5 (= a_f) \leq \hat{a}_f \end{aligned} \quad (3.34)$$

Où les valeurs limites sont définies par (3.35)-(3.38), où c_0^{lim} et c_f^{lim} permettent de faire varier la plage de valeurs autorisées pour l'accélération initiale et finale, respectivement. Ces paramètres peuvent être vus comme des pourcentages admissibles de variation autour de la valeur mesurée, avec le signe qui convient dans tous les cas.

$$\check{a}^0 = |a_1| \cdot (\text{sign}(a_1) - c_0^{lim}) \quad (3.35)$$

$$\hat{a}^0 = |a_1| \cdot (\text{sign}(a_1) + c_0^{lim}) \quad (3.36)$$

$$\check{a}^f = |a_n| \cdot (\text{sign}(a_n) - c_f^{lim}) \quad (3.37)$$

$$\hat{a}^f = |a_n| \cdot (\text{sign}(a_n) + c_f^{lim}) \quad (3.38)$$

Pour notre étude, nous avons décidé de retenir la dernière solution concernant les valeurs limites, ce qui nous permet de faciliter le respect de la topologie des manœuvres, tout en gardant suffisamment de flexibilité à l'optimisation pour chercher la solution la plus convenable ; la tolérance sur les valeurs limites évite également de devoir copier le bruit de mesure.

Le choix des valeurs de c_0^{lim} et c_f^{lim} peut être difficile dans la mesure où l'on a à faire à deux situations paradoxales : si l'on choisit des valeurs trop grandes, on laissera trop de liberté aux paramètres d'optimisation, ce qui peut conduire à des solutions sous-optimales ; en revanche, si l'on choisit des valeurs trop petites, et que les valeurs d'accélération initiale et finale mesurées sont proches de zéro, on ne laissera pas assez de liberté à l'optimisation pour trouver une bonne solution. En vue de cela, nous avons trouvé de manière empirique les valeurs présentées sur (3.39) et (3.40), lesquelles permettent d'adapter les contraintes à chaque situation. Ces valeurs nous ont permis de trouver des solutions acceptables sur une trentaine de manœuvres testées manuellement.

$$c_0^{lim} = \begin{cases} 1 & , \quad |a_1| \leq 0.2 \\ 0.25 & , \quad |a_1| \geq 0.2 \end{cases} \quad (3.39)$$

$$c_f^{lim} = \begin{cases} 1 & , \quad |a_n| \leq 0.2 \\ 0.25 & , \quad |a_n| \geq 0.2 \end{cases} \quad (3.40)$$

Si les hypothèses sur le modèle trapézoïdal de mesure sont pertinentes, l'identification permettra aussi d'éliminer le bruit de mesure ; pour cela, il est nécessaire de choisir correctement la forme de la fonction Φ . La section qui suit s'intéresse au choix de cette fonction.

3.3.1.2 Choix de la fonction de coût des résidus, $\Phi(\underline{v})$

Si l'on souhaite comparer la pertinence d'un certain modèle, $f_{tr}(\underline{\theta}, t)$, pour représenter les mesures d'accélération associées à une manœuvre, \underline{a} , il est nécessaire de définir une notion de *distance* entre les valeurs issues du modèle et les mesures. Dans notre problème, cette distance est quantifiée en appliquant la fonction $\Phi(\underline{v})$, aux résidus $\underline{v} = \underline{a} - \underline{f}_{tr}(\underline{\theta}, t)$. Les normes vectorielles étant des fonctions qui se prêtent particulièrement bien pour la définition de distances [22, 191], nous allons nous focaliser sur ce type de fonctions pour le choix de $\Phi(\underline{v})$, quoi que d'autres choix soient possibles¹⁴.

Selon le choix de la fonction $\Phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, on peut faire varier ce que l'on privilégiera au moment de faire l'identification, ainsi que les hypothèses par rapport à la nature du bruit. Par exemple, choisir la norme euclidienne comme fonction de coût sur les résidus, $\Phi(\underline{v}) = \|\underline{v}\|_2$, revient à supposer que le bruit de mesure est gaussien, comme montré sur le Théorème 1.1 de l'Annexe II. Le théorème en question est directement inspiré du chapitre 7 de Boyd & Vandenberghe [22], mais appliqué au cas d'un modèle trapézoïdal de mesure.

La même logique peut être appliquée pour démontrer que l'utilisation d'une norme unitaire, $\|\cdot\|_1$, revient à supposer que l'on a à faire à du bruit laplacien, et celle d'une norme infinie, $\|\cdot\|_\infty$, à supposer que le bruit suit une distribution uniforme (cf. [22]).

De plus, selon le type de fonction choisie pour Φ , la robustesse vis-à-vis des erreurs de mesure ne sera pas la même ; par exemple, en choisissant $\Phi = \|\cdot\|_1$ on sera, en principe, moins sensible à la présence de valeurs aberrantes dans les signaux que si l'on choisissait $\Phi = \|\cdot\|_2$. En revanche, l'utilisation de $\Phi = \|\cdot\|_\infty$ peut rendre le résultat assez sensible aux valeurs aberrantes.

* * *

Nous présentons à continuation des exemples de l'utilisation des normes 1, 2 et infinie pour l'identification des manœuvres de conduite. La Figure 3.25 présente une manœuvre de d'accélération, issue d'un roulage urbain, alors que la Figure 3.26 illustre une manœuvre de décélération qui a eu lieu dans un scénario extra-urbain. Les détails sur la résolution du problème d'optimisation seront discutés dans la suite de ce document.

Nous constatons qu'il existe des différences plus ou moins importantes entre les résultats obtenus à partir des différentes type de norme. Lorsqu'on utilise la norme $\|\cdot\|_\infty$ on constate qu'elle diffère considérablement des deux autres identifications. Par exemple, sur le modèle de la Figure 3.25c, le plateau d'accélération est relativement proche des extrêmes supérieurs des oscillations présentées sur les données réelles, alors que dans les deux autres cas, le plateau d'accélération est plutôt centré sur les oscillations. Sur la manœuvre de la Figure 3.26 les différentes normes ont donné lieu à des modèles avec des différences relativement marquées. Il est cependant difficile de déterminer à simple vue lequel de ces choix est le plus pertinent.

¹⁴. A titre d'exemple, une définition possible de Φ , qui n'est pas un norme est: $\Phi(\underline{v}) = \sum_{i=0}^n \phi_{zm}(v_i)$, où $\phi_{zm} = \max\{0, |u| - \alpha\}$ est une fonction de pénalité de zone morte de largeur α [22].

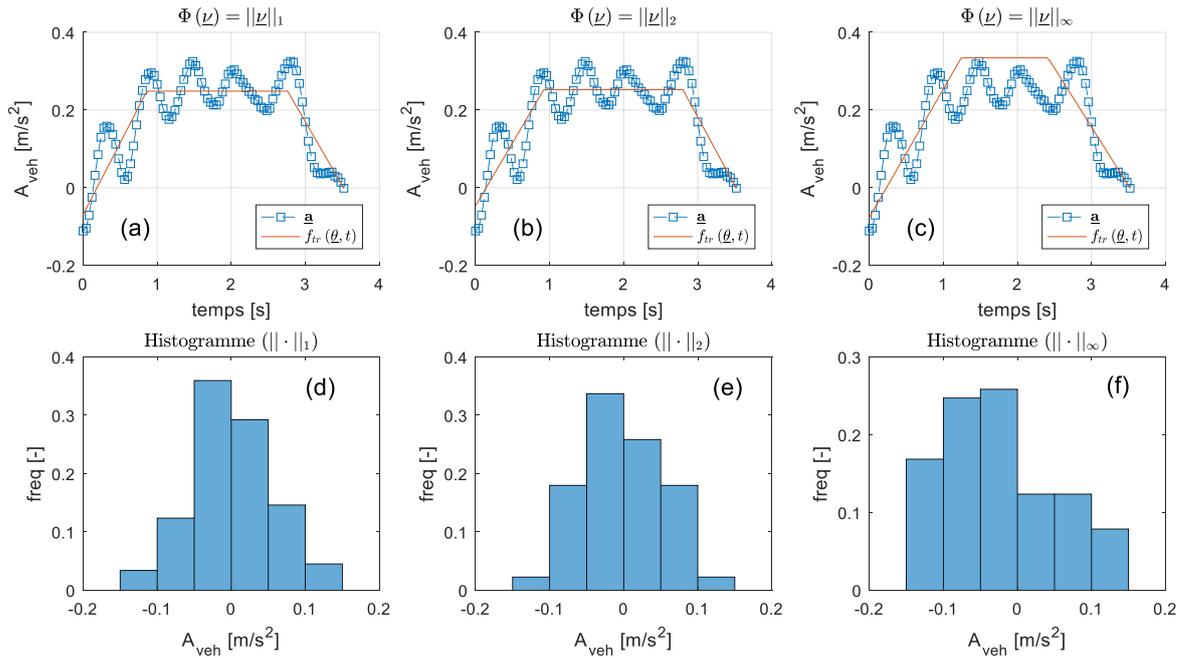


FIG. 3.25 – Comparaison des fonctions de coût pour l’identification d’une manœuvre trapézoïdale d’accélération, issue de la conduite urbaine ; (a) et (d) estimation et histogramme des résidus pour la norme d’ordre 1, (b) et (e) estimation et histogramme des résidus pour la norme d’ordre 2, (c) et (f) estimation et histogramme des résidus pour la norme infinie

Si nous considérons les résidus associés à chaque norme, illustrés sur les histogrammes des deux figures, nous pouvons avoir une idée si les résidus respectent la nature du bruit qui leur est associé. En ce qui concerne l’utilisation de la norme infinie, sur les résultats présentés sur la Figure 3.25f, les résidus respecteraient assez difficilement une distribution uniforme ; par contre, ceux de la Figure 3.26f, semblent le faire. Du fait de la faible quantité des points des manœuvres (la valeur de n étant petite), il est difficile de déterminer si les histogrammes des Figures 3.25d et 3.26d, associées à la norme 1, correspondent à du bruit laplacien ; ou si ceux des Figures 3.25e et 3.26e, sont compatibles avec du bruit gaussien. Ainsi, cette première analyse permet d’alimenter un doute raisonnable sur la pertinence de l’utilisation de la norme infinie ; en revanche, il est difficile de décider laquelle des deux autres normes est la plus pertinente.

En vue de cela, nous avons étudié la corrélation entre les signaux mesurés et les modèles identifiés. Pour ce faire, le coefficient de corrélation de Pearson, présenté sur (3.21), a permis d’évaluer $r_{\underline{a}, \underline{f}_{tr}}(\underline{\theta}, \underline{t})$, comparant la mesure \underline{a} et l’estimation $\underline{f}_{tr}(\underline{\theta}, \underline{t})$. Nous avons calculé les valeurs de $r_{\underline{a}, \underline{f}_{tr}}(\underline{\theta}, \underline{t})$ associées à toutes les manœuvres disponibles. Le Tableau 3.3 et la Figure 3.27 font la synthèse des résultats.

Nous constatons que, pour tous les scénarii, les coefficients de corrélation sont plus faibles lorsqu’on utilise comme fonction de coût $\Phi = \|\cdot\|_{\infty}$, indiquant que cette fonction de coût n’est pas la plus pertinente pour ce problème ; en revanche, les valeurs de $r_{\underline{a}, \underline{f}_{tr}}(\underline{\theta}, \underline{t})$ sont très proches lorsqu’on utilise $\Phi = \|\cdot\|_1$ et $\Phi = \|\cdot\|_2$, et ce n’est pas facile de décider laquelle des deux fonctions de coût est la mieux adaptée à l’identification de trapèzes. En

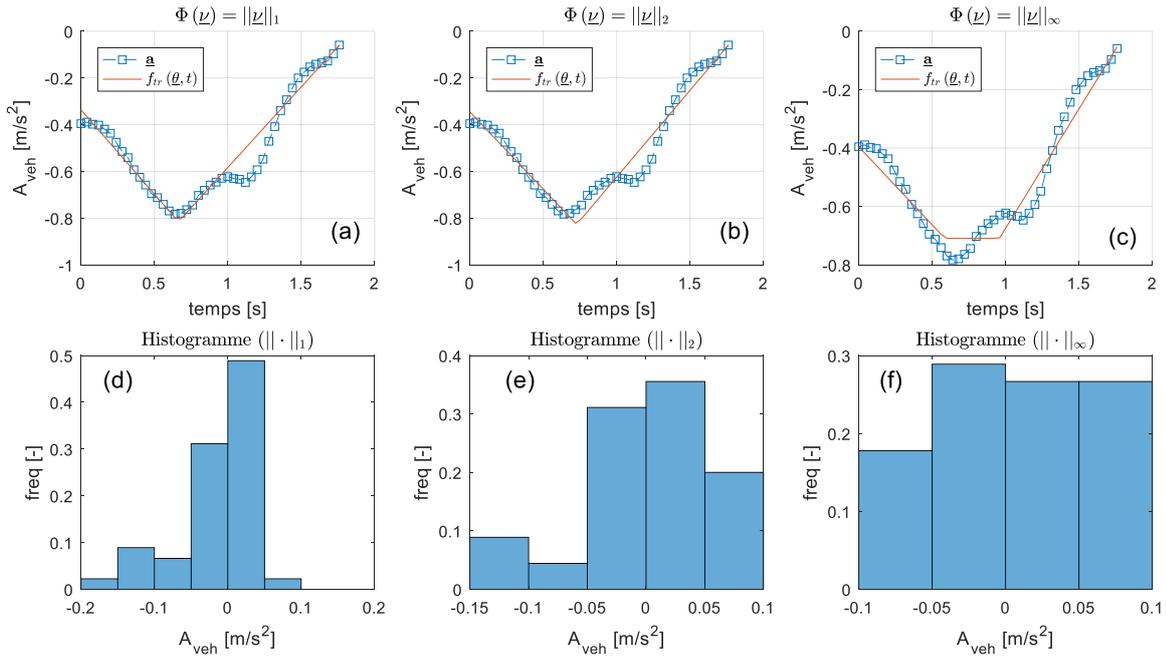


FIG. 3.26 – Comparaison des fonctions de coût pour l'identification d'une manœuvre trapézoïdale de décélération, issue de la conduite extra-urbaine ; (a) et (d) estimation et histogramme des résidus pour la norme d'ordre 1, (b) et (e) estimation et histogramme des résidus pour la norme d'ordre 2, (c) et (f) estimation et histogramme des résidus pour la norme infinie

Contexte	Manœuvres	Coefficient de corrélation $r_{a, f_{tr}(\theta, t)}$		
		$\ \cdot\ _1$	$\ \cdot\ _2$	$\ \cdot\ _\infty$
Urbain	Accélération	0.9497 ± 0.0525	0.9522 ± 0.0466	0.9220 ± 0.0734
	Décélération	0.9581 ± 0.0499	0.9594 ± 0.0489	0.9288 ± 0.0767
Extra-urbain	Accélération	0.9376 ± 0.0617	0.9426 ± 0.0586	0.9092 ± 0.0898
	Décélération	0.9022 ± 0.1039	0.9063 ± 0.0990	0.8768 ± 0.1150

TAB. 3.3 – Coefficients des corrélation de Pearson, associés à l'identification des trapèzes, pour chaque type de norme ; valeur moyenne et déviation standard

vue de cela, nous avons décidé, pour chaque manœuvre, de faire les deux identifications (avec $\Phi = \|\cdot\|_1$ et $\Phi = \|\cdot\|_2$), et de retenir celle dont le coefficient de corrélation sera le plus grand.

3.3.1.3 Correction des paramètres du trapèze dans le cas des manœuvres triangulaires

Certaines manœuvres pourraient comporter uniquement deux phases transitoires, sans qu'il y ait de phase stabilisée au milieu ; la manœuvre aura donc une forme *triangulaire*. Dans ce cas, même si les paramètres obtenus permettent de générer une fonction $f_{tr}(\theta, t)$ qui approxime les points de la manœuvre, ces paramètres pourraient ne plus être associés physiquement aux valeurs de la manœuvres. Cela est illustré sur la Figure 3.28, où τ_1^* , τ_3^* , a_{ex}^* , a_0^* et a_f^* , sont les résultats de l'optimisation. Nous pouvons voir que, dans ce cas, il est difficile d'accorder un sens physique aux paramètres τ_1^* , τ_3^* et a_{ex}^* ; ceux que nous

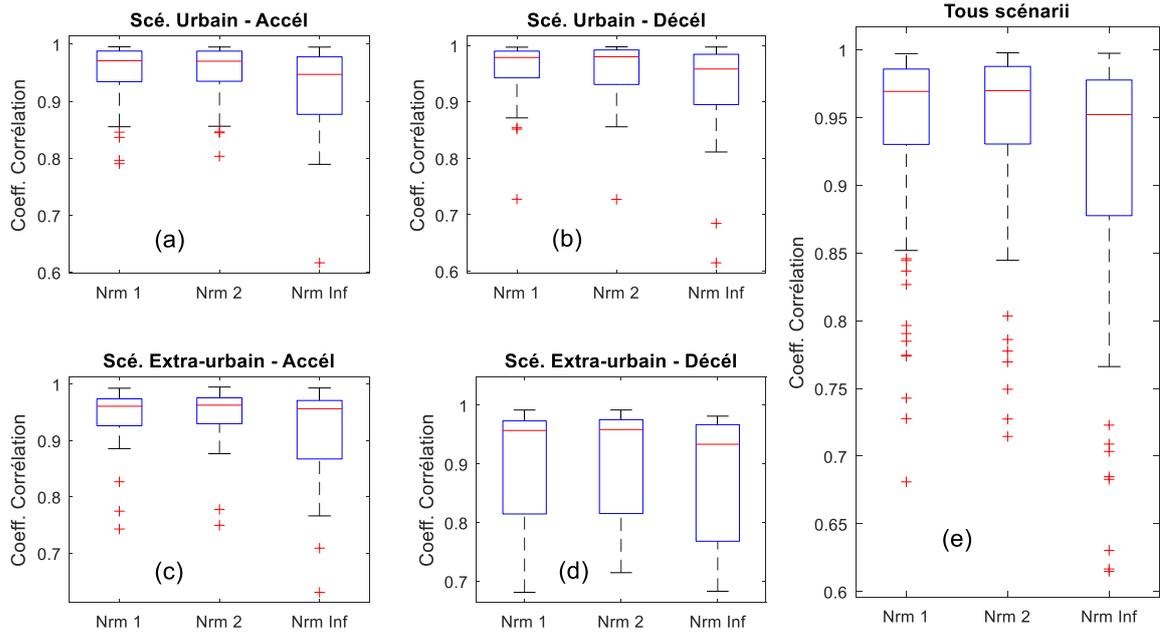


FIG. 3.27 – Comparaison des coefficients de corrélation associé à chaque fonction de coût pour l'identification d'une manœuvre trapézoïdale de décélération, sur plusieurs scénarii de conduite ; (a) accélération conduite urbaine, (b) décélération conduite urbaine (c) accélération conduite extra-urbaine, (d) décélération conduite extra-urbaine, (e) tous scénarii confondus

voudrions avoir sont plutôt les paramètres τ_1^{corr} , τ_3^{corr} et a_{ex}^{corr} , selon la notation employée sur la figure.

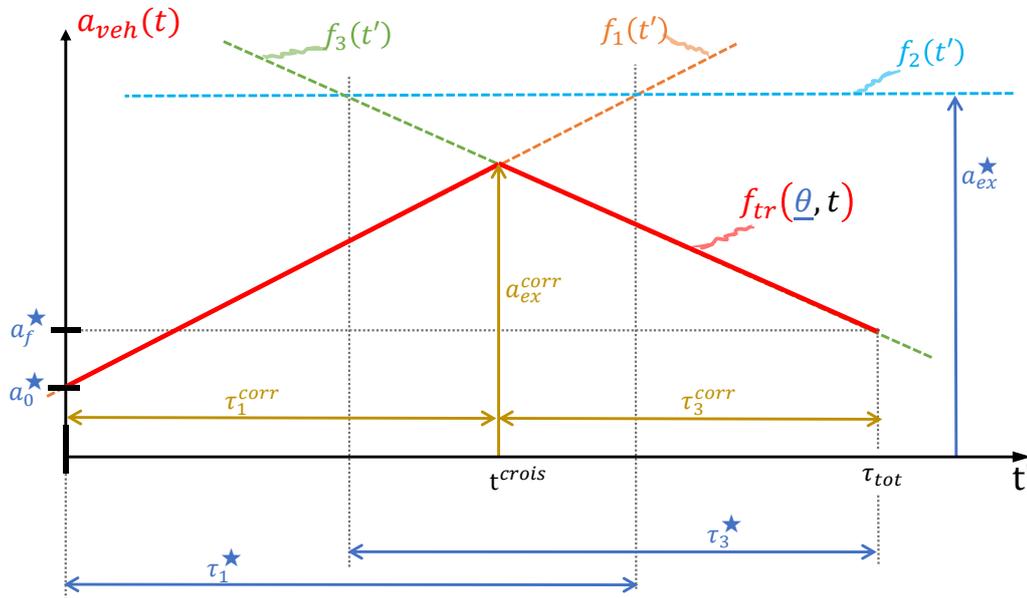


FIG. 3.28 – Correction des paramètres de l'identification des trapèzes : illustration du problème et notation

Pour obtenir ces paramètres, il est nécessaire de déterminer l'instant t^{crois} , où les fonctions $f_1(t')$ et $f_3(t')$ se croisent. Cette valeur est donnée par :

$$t^{crois} = \frac{a_f^* - a_0^* - \left(\frac{a_f^* - a_{ex}^*}{\tau_3^*}\right) \tau_{mnv}}{\left(\frac{\tau_1^* + \tau_3^*}{\tau_1^* \tau_3^*}\right) a_{ex}^* - \frac{a_0^*}{\tau_1^*} - \frac{a_f^*}{\tau_3^*}} \quad (3.41)$$

Ce qui permet de calculer les valeurs des paramètres τ_1^{crois} , τ_3^{crois} et a_{ex}^{crois} :

$$a^{crois} = \left(\frac{a_{ex}^* - a_0^*}{\tau_1^*} \right) t^{crois} + a_0^* \quad (3.42)$$

$$\tau_1^{crois} = t^{crois} \quad (3.43)$$

$$\tau_3^{crois} = \tau_{mno} - t^{crois} \quad (3.44)$$

Finalement, nous pouvons calculer les paramètres τ_1^{corr} , τ_3^{corr} et a_{ex}^{corr} comme suit :

$$a_{ex}^{corr} = \begin{cases} \max\{a_{ex}^*, a_{ex}^{crois}\} & , a_{ex}^* < 0 \\ \min\{a_{ex}^*, a_{ex}^{crois}\} & , a_{ex}^* \geq 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

$$\tau_1^{corr} = \min\{\tau_1^*, \tau_1^{crois}\} \quad (3.46)$$

$$\tau_3^{corr} = \min\{\tau_3^*, \tau_3^{crois}\} \quad (3.47)$$

3.3.2 Identification de manœuvres de conduite réelles

Pour résoudre le problème d'optimisation, nous avons utilisé la fonction *fmincon* de la boîte à outils d'Optimisation de Matlab [216]. Celle-ci utilise par défaut une méthode des points intérieurs (voir par exemple [22]), ce qui garanti la faisabilité de la solution proposée, mais qui exige en revanche d'avoir un point d'initialisation *faisable*¹⁵. Pour initialiser l'algorithme, nous avons utilisé le point présenté sur (3.48), dont la faisabilité est garantie (par contre, il peut être à la frontière de certaines des contraintes). Sur l'équation, moy (\mathbf{a}) = $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$ représente l'accélération moyenne de la manœuvre.

$$\underline{\theta}_0 = \begin{bmatrix} \theta_{1,0} \\ \theta_{2,0} \\ \theta_{3,0} \\ \theta_{4,0} \\ \theta_{5,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{1,0} \\ \tau_{3,0} \\ a_{ex,0} \\ a_{0,0} \\ a_{f,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{tot}/3 \\ \tau_{tot}/3 \\ \text{moy}(\mathbf{a}) \\ \max\{\min\{0, \hat{a}^0\}, \check{a}^0\} \\ \max\{\min\{0, \hat{a}^f\}, \check{a}^f\} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Étant donné le fait que le problème d'optimisation n'est pas convexe, il y a toujours la possibilité que le résultat de l'algorithme d'optimisation corresponde à un minimum local. Cependant, du fait de l'utilisation des contraintes de boîte sur a_0 et a_f , ce risque devrait être limité.

Il existe aussi la possibilité que le modèle trapézoïdal ne soit pas suffisamment représentatif de certaines des manœuvres enregistrées. Afin de privilégier les manœuvres trapézoïdales, nous ne retiendrons que les enregistrements dont le coefficient de corrélation entre les mesures et le modèle, $r_{\mathbf{a}, \mathbf{f}_{tr}}(\theta, \mathbf{t})$, soit supérieur à un seuil. Nous avons décidé de garder $r_{\mathbf{a}, \mathbf{f}_{tr}}(\theta, \mathbf{t}) \geq 0.82$ qui, dans la pratique, semble permettre la distinction entre les manœuvres « suffisamment trapézoïdales » et celles qui ne le sont pas. Dans le cas où il y avait des valeurs aberrantes dans l'enregistrement, nous avons réaliser d'abord un nettoyage supplémentaire des signaux, avant de calculer $r_{\mathbf{a}, \mathbf{f}_{tr}}(\theta, \mathbf{t})$.

15. Dans un problème d'optimisation, un point est dit *faisable* s'il respecte toutes les contraintes du problème.

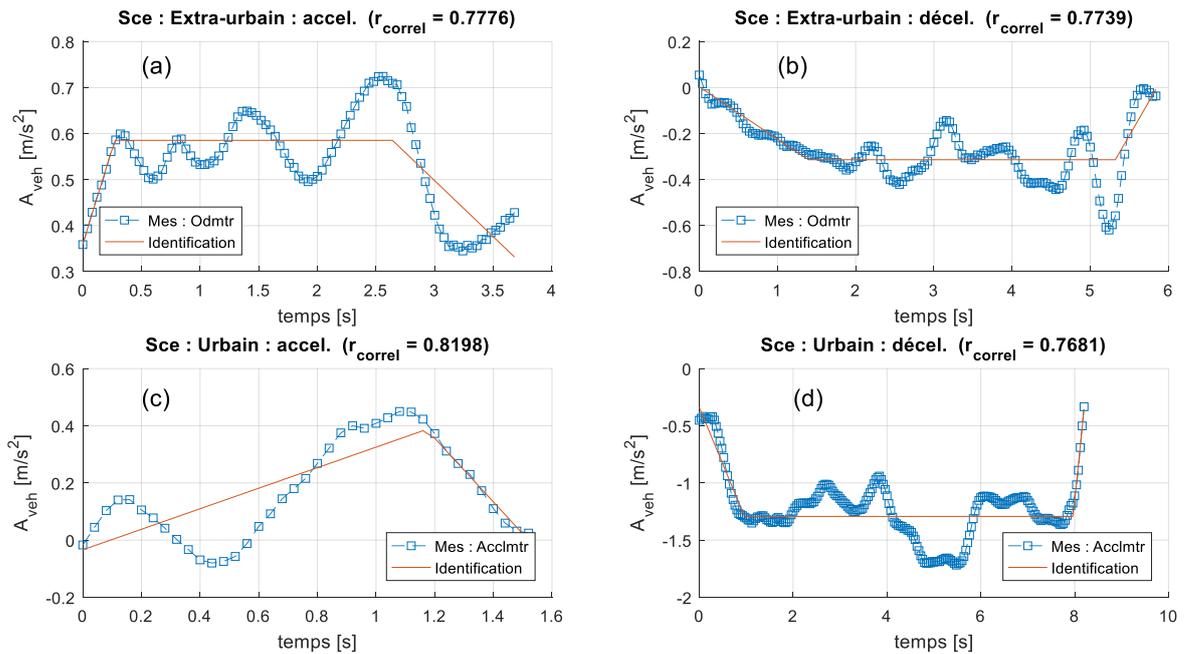


FIG. 3.29 – Exemples de manœuvres pour lesquelles le modèle trapézoïdal n'est pas assez représentatif; (a) scénario extra-urbain d'accélération (mesure odométrie), (b) scénario extra-urbain de décélération (mesure odométrie), (c) scénario urbain d'accélération (mesure accéléromètre), (d) scénario urbain de décélération (mesure accéléromètre)

La Figure 3.29 présente des exemples des manœuvres éliminées en utilisant ce critère. Au total, nous avons éliminé 10 cas, tous scénarios et tous capteurs confondus. Les exemples correspondent à des accélérations et des décélérations, en conduite urbaine et extra-urbaine et mesurées par l'accéléromètre ou estimées à partir de l'odométrie. Nous constatons que, sur ces manœuvres, il y a des éléments qui diffèrent du modèle trapézoïdal. Ainsi, le critère proposé semble valable. En revanche, il existe des cas particuliers où le critère pourrait moins bien marcher; par exemple, la Figure 3.29d, a la plus faible valeur de $r_{a, f_{tr}}(\theta, t)$ parmi les exemples, alors que sa topologie semble se rapprocher plus d'un trapèze que celle des autres manœuvres. Il est peut-être possible trouver un indicateur de ressemblance plus performant, mais cela sort du cadre de notre étude, et sera donc réservé aux perspectives de ces travaux.

De plus, nous avons analysé manuellement les manœuvres et en exclu certaines qui ne semblaient pas être assez bien représentables par des trapèzes, même si elles respectaient le critère basé sur la valeur de $r_{a, f_{tr}}(\theta, t)$. Nous en avons exclu donc 9 manœuvres supplémentaires, réparties entre les différents types de scénarii et issues des différents capteurs. Le Tableau 3.4 présente le nombre de manœuvres que nous avons retenues pour notre étude, selon le type de scénario, le type de manœuvre et le capteur utilisé.

La Figure 3.30 présente un échantillon de manœuvres de conduite, ainsi que l'approximation trapézoïdale identifiée en utilisant notre méthodologie. Le choix des manœuvres affichées se veut représentatif de la diversité dans les enregistrements. Nous montrons des manœuvres d'accélération et de décélération, en roulage urbain et extra-urbain; certaines

Contexte	Manœuvres	Capteur	Nb. Mnv.	Durée	% Ret.
Urbain	Accélération	odmètre	49	4.0947 ± 2.3989	98%
		accéléromètre	46	4.1878 ± 2.4318	92%
	Décélération	odmètre	45	2.8542 ± 1.6921	90%
		accéléromètre	49	3.0261 ± 1.8268	98%
Extra-urbain	Accélération	odmètre	26	4.3877 ± 2.7077	92.86%
		accéléromètre	26	4.3877 ± 2.7077	92.86%
	Décélération	odmètre	10	3.9840 ± 1.3037	83.33%
		accéléromètre	10	4.1320 ± 1.3681	83.33%

TAB. 3.4 – Nombre des manœuvres analysées pendant l'étude. « % Ret. »: pourcentage de manœuvres retenues (par rapport aux manœuvres identifiées).

des manœuvres ont clairement une topologie trapézoïdale, alors que sur d'autres cela est moins évident ; la durée et l'intensité des manœuvres peut varier. La colonne de gauche présente des signaux issus de l'odmètre, alors que celle de droite montre des mesures de l'accéléromètre. Aussi, à l'exception des Figures 3.30i et j, chaque ligne correspond à une même manœuvre, ce qui permet de comparer les deux mesures ; nous constatons que l'amplitude des accélérations n'est pas la même entre les deux signaux, ce qui serait dû à l'effet de la pente.

Le nombre important de manœuvres représentables par des trapèzes qui ont eu lieu pendant à peine une heure de roulage, ainsi que la valeur élevée du coefficient de corrélation $r_{a,f_{tr}(\theta,t)}$ (cf. Tableau 3.3 et Figure 3.27), montrent la pertinence du modèle trapézoïdal de manœuvres. Il faut, néanmoins, faire une nuance : le modèle trapézoïdal ne permet pas d'exprimer tout le spectre de manœuvres de conduite ; nous avons même vu quelques manœuvres qui seraient difficilement représentables par une fonction affine par morceaux. Ce que notre étude montre est que la topologie *grossièrement trapézoïdale* fait partie du répertoire de manœuvres qu'un conducteur utiliserait au quotidien.

3.4 ANALYSE DES PARAMÈTRES DES MANŒUVRES

Objectif de la section

A partir des manœuvres identifiées, déterminer des valeurs limites pour les paramètres des trapèzes d'accélération, qui permettraient de respecter l'agrément de conduite

Dans cette section, nous considérerons les résultats de l'identification des profils trapézoïdaux, selon la méthode proposée. Cela nous a permis, pour chaque manœuvre enregistrée, de déterminer les valeurs de τ_1 , τ_3 , a_{ex} , a_0 , et a_f , comme montré sur la Figure 3.24. Cependant, tel qu'il a été discuté dans le Chapitre II.1, l'à-coup est une variable ayant une forte influence sur l'agrément de conduite. Ainsi, nous devons déterminer les valeurs

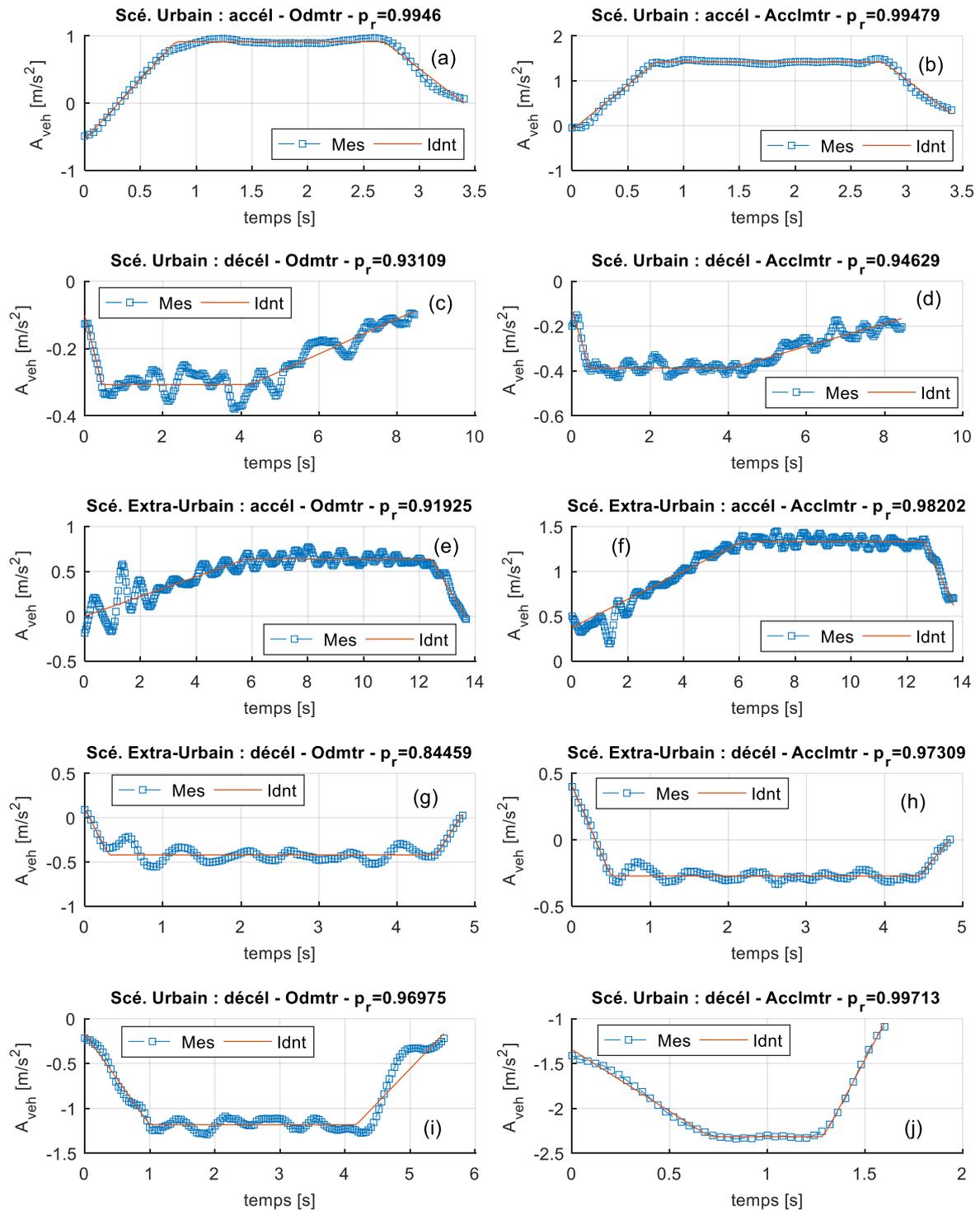


FIG. 3.30 – Exemples de manœuvres représentables par un modèle trapézoïdal ; (a) ...

d'à-coup dans les phases initiale et finale de chaque manœuvre. Pour calculer les valeurs de J_1 et J_3 (cf. Figure 3.24) nous pouvons utiliser les équations suivantes :

$$J_1 = \frac{a_{ex} - a_0}{\tau_1} \quad (3.49)$$

$$J_3 = \frac{a_{ex} - a_f}{\tau_3} \quad (3.50)$$

Nous avons pris comme convention que J_1 et J_3 soient de même signe, et qu'ils soient positifs lorsque la manœuvre est une accélération, et négatifs dans le cas contraire.

Comme discuté précédemment, nous avons considéré les mesures issues de deux capteurs. Les informations provenant de l'odométrie devraient être représentatives des accélérations dans le référentiel du véhicule ; d'autre part, les informations associées à l'accéléromètre devraient représenter les accélérations perçues par le conducteur, dans son propre référentiel. Pour chaque paramètre, nous analyserons donc ces valeurs dans le référentiel du véhicule et, ensuite, celles dans le référentiel du conducteur.

Les conducteurs n'agissent pas systématiquement de la même manière. Dans certaines situations, ils peuvent être contraints d'agir d'une forme qui leur résulte moins plaisante (par exemple, lors que l'aspect sécuritaire prend la priorité, ou lorsque le comportement des véhicules autour est atypique). De ce fait, certaines des manœuvres de conduite que nous allons étudier peuvent ne pas être représentatives de ce que les conducteurs trouvent agréable.

Ainsi, afin de ne pas considérer ces manœuvres, nous avons décidé d'appliquer l'algorithme présenté sur la section II.3.2.4, qui est basé sur la déviation absolue autour de la médiane [70]. En revanche, en toute rigueur, cette fois-ci, nous ne pouvons pas parler de *valeurs aberrantes* des paramètres des manœuvres, dans la mesure où ces valeurs ont eu lieu dans des situations réelles de conduite. Nous parlerons plutôt de *valeurs régulières* pour parler des valeurs qui suivent le mieux la tendance, et de *valeurs atypiques* pour parler de celles qui sont moins présentes dans les événements de conduite.

Aussi, nous avons déterminé des statistiques sur les observations, qui devraient pouvoir nous renseigner sur le choix de paramètres pour un SAC. Nous avons retenu la *médiane* comme *indicateur de tendance centrale* et la DAM comme *indicateur d'échelle*. Le choix de ces mesures est dû à leur robustesse face à la présence de valeurs atypiques [115, 177]. En plus, nous voudrions un *indicateur de position* qui engloberait la plupart des valeurs de chaque paramètre. Nous avons décidé de retenir le quantile associé aux trois quarts des valeurs les plus proches de zéro. La définition de cette indicateur, noté $Q(3/4)$, variera selon que nous ayons à faire à des manœuvres d'accélération où à des manœuvres de décélération :

$$Q_{\underline{x}}(3/4) = \begin{cases} Q_{\underline{x}}(0.75) & , \text{ median }(\underline{x}) \geq 0 \\ Q_{\underline{x}}(0.25) & , \text{ median }(\underline{x}) < 0 \end{cases} \quad (3.51)$$

Où $Q_{\underline{x}}(0.75)$ et $Q_{\underline{x}}(0.25)$ sont les quantiles associés respectivement au 75% et au 25% des valeurs les plus grandes de \underline{x} . Nous supposons que, pour un même scénario, toutes les instances de chaque paramètre ont le même signe.

Les valeurs des paramètres associées à l'intégralité des manœuvres, sont présentés sur l'Annexe I.

3.4.1 A-coup de la phase initiale du trapèze : J_1

Dans un premier temps nous porterons notre intérêt sur l'à-coup de la phase initiale des manœuvres, en considérant son amplitude, J_1 , et sa durée, τ_1 . Nous allons étudier quatre types de scénarios, à savoir : *accélérations - conduite urbaine*, *accélérations - conduite extra-urbaine*, *décélérations - conduite urbaine* et *décélérations - conduite extra-urbaine*. Pour chaque scénario, nous considérerons les informations issues de l'odométrie et celles provenant de l'accéléromètre.

Le nombre de valeurs *atypiques* est relativement importante. Cela pourrait indiquer que le conducteur adapterait son niveau d'agressivité selon la situation de conduite ; dans certaines situations, il pourrait agir d'une manière plus agressive que son comportement normal. Cette variabilité pourrait aussi avoir son origine dans des imprécisions ou des problèmes dans la phase d'identification¹⁶. Cependant, les similitudes entre les valeurs associées à l'odométrie et celles associées à l'accéléromètre, rendent cette possibilité moins vraisemblable (c.f. Figure 1.1, Annexe I). Tout de même, la considérations de valeurs statistiques, robustes à la présence de valeurs atypiques, devrait limiter des possibles imprécisions dans les résultats de l'identification.

La Figure 3.31 montre des histogrammes des valeurs de J_1 , pour les différents scénarii. En vue du nombre considérable de valeurs atypiques, nous avons appliqué l'algorithme de Freedman-Diaconis [70], qui est robuste à la présence de valeurs aberrantes [77], pour la division des intervalles. Pour chaque scénario, nous superposons un histogramme prenant en considération toutes les manœuvres et un autre excluant les valeurs atypiques ; nous constatons que, en général, les deux graphiques sont assez proches.

Nous pouvons noter une concentration d'occurrences des faibles valeurs d'à-coup, indiquant que le conducteur aurait tendance à réaliser des transitoires plutôt en douceur. Il est donc possible de définir une plage de valeurs d'à-coup J_1 englobant la majorité des manœuvres réalisées par le conducteur lui-même. Nous pouvons imaginer que, si un SAC exécutait des manœuvres trapézoïdales dont J_1 restait à l'intérieur de cette plage, le conducteur devrait retrouver une familiarité dans le comportement de son véhicule. Cela permettrait au SAC de respecter l'agrément de conduite.

Les Tableaux 3.5 et 3.6 présentent les données statistiques de l'amplitude J_1 et la durée τ_1 de la phase initiale des manœuvres. Tab. 3.5 concerne l'à-coup dans le référentiel du véhicule et Tab. 3.6 celui dans le référentiel du conducteur. Les valeurs dans les deux cas sont relativement proches. Toutefois, il est difficile de savoir, dans le cas de l'à-coup, si les différences sont dues à la présence de bruit dans le signal, à l'identification, ou à un phénomène physique.

16. Une partie de la variabilité et de la présence de valeurs atypiques dans les estimations d'à-coup, pourrait être expliquée par le fait que des petites différences dans les moments de début et de fin de manœuvres pourraient légèrement biaiser l'étape d'identification. Cela pourrait notamment être le cas s'il y avait un retard dans l'une des mesures ; par exemple, le signal de vitesse, étant le résultat d'un calcul basé sur les capteurs aux roues, pourrait présenter une certaine latence par rapport à l'évènement réel.

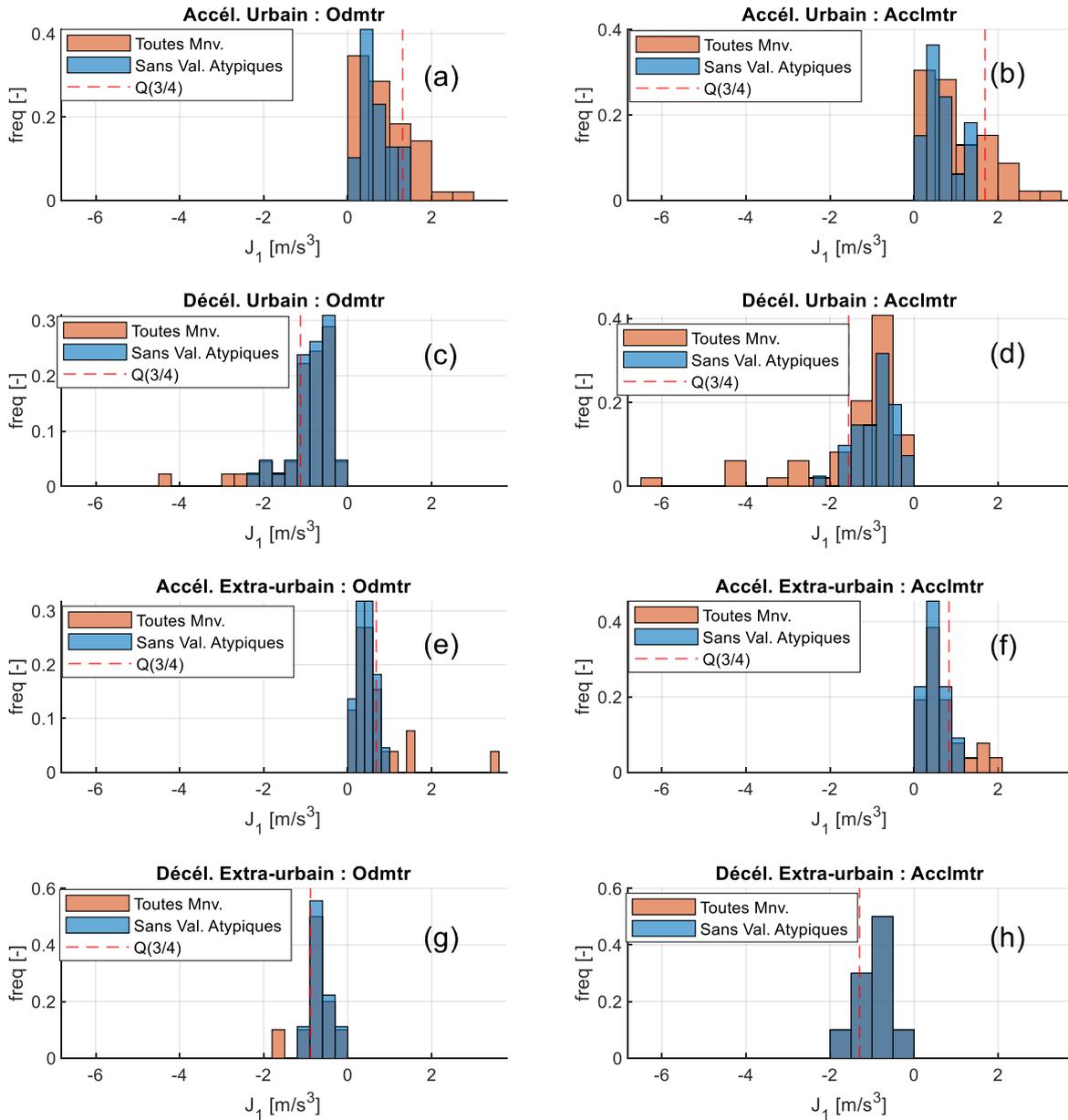


FIG. 3.31 – Histogramme des valeurs d'à-coup de la phase initiale des manœuvres, J_1 . (a, c, e, g) référentiel véhicule, à partir des mesures issues de l'odométrie; (b, d, f, h) référentiel du conducteur, à partir des mesures de l'accéléromètre. (a) et (b) Scénario urbain - manœuvres d'accélération, (c) et (d) Scénario urbain - manœuvres de décélération, (e) et (f) Scénario extra-urbain - manœuvres d'accélération, (g) et (h) Scénario extra-urbain - manœuvres de décélération. Pour faciliter la comparaison, les axes horizontaux sont identiques sur toutes les figures.

3.4.2 A-coup de la phase finale du trapèze : J_3

Ensuite nous allons considérer l'à-coup de la phase finale, J_3 . La Figure 3.32 présente les histogrammes associés à chacun des scénarios. De façon similaire à J_1 , il existe une grande proportion des faibles valeurs d'à-coup. Cela pourrait montrer la préférence du conducteur pour des manœuvres peu agressives.

Les histogrammes associés aux référentiels du véhicule et du conducteur montrent

Contexte	Mnv.	Amplitude ($J_1 [m/s^3]$)			Durée ($\tau_1 [s]$)		
		Médiane	DAM	Q(3/4)	Médiane	DAM	Q(3/4)
Urbain	Accél.	0.691	0.366	1.31	0.907	0.383	1.49
	Décél.	-0.752	0.294	-1.12	0.847	0.265	1.096
Extra-urbain	Accél.	0.473	0.163	0.679	1.047	0.353	1.58
	Décél.	-0.745	0.152	-0.887	1.26	0.525	1.95

TAB. 3.5 – Valeurs statistiques de l'à-coup de la phase initiale, J_1 , dans le référentiel du véhicule (à partir des mesures issues de l'odométrie).

Contexte	Mnv.	Amplitude ($J_1 [m/s^3]$)			Durée ($\tau_1 [s]$)		
		Médiane	DAM	Q(3/4)	Médiane	DAM	Q(3/4)
Urbain	Accél.	0.783	0.488	1.69	0.982	0.452	1.69
	Décél.	-0.921	0.413	-1.56	0.757	0.270	1.075
Extra-urbain	Accél.	0.577	0.2198	0.833	1.145	0.393	1.626
	Décél.	-0.7996	0.320	-1.298	1.089	0.512	1.37

TAB. 3.6 – Valeurs statistiques de l'à-coup de la phase initiale, J_1 , dans le référentiel du conducteur (à partir des mesures de l'accéléromètre).

des distributions similaires ; toutefois, à l'exception du scénario extra-urbain, les valeurs atypiques de J_3 semblent être plus fortes dans le référentiel du conducteur. Plusieurs explications à ce phénomène sont possibles ; par exemple, la présence d'hétérogénéités dans la route pourrait engendrer des fortes variations d'à-coup pouvant être détectées par l'accéléromètre, mais non détectables par les capteurs aux roues. Si cela s'avérait être le cas, la considération de ces valeurs pourrait avoir une importance limitée, dans la mesure où une fonction de conduite automatique ne serait probablement pas à même de répondre à des perturbations aussi soudaines.

Contexte	Mnv.	Amplitude (J_3)			Durée (τ_3)		
		Médiane	DAM	Q(3/4)	Médiane	DAM	Q(3/4)
Urbain	Accél.	0.498	0.265	0.987	1.13	0.437	1.88
	Décél.	-1.084	0.558	-1.79	0.608	0.225	0.903
Extra-urbain	Accél.	0.565	0.218	0.786	1.017	0.494	1.970
	Décél.	-1.177	0.538	-1.818	0.999	0.2897	1.195

TAB. 3.7 – Valeurs statistiques de l'à-coup de la phase finale, J_3 , dans le référentiel du véhicule (à partir des mesures issues de l'odométrie).

Les Tableaux 3.7 et 3.8 présentent les données statistiques de l'amplitude J_3 et la durée τ_3 de la phase finale des manœuvres, associées respectivement aux informations provenant de l'odométrie et de l'accéléromètre. En comparant les tableaux, nous remarquons que, pour un même scénario, les durées τ_3 montrent des statistiques relativement proches pour les informations provenant des deux capteurs. C'est le cas aussi pour les statistiques associées à J_3 , à l'exception du scénario *décélérations - conduite urbaine*, où nous constatons

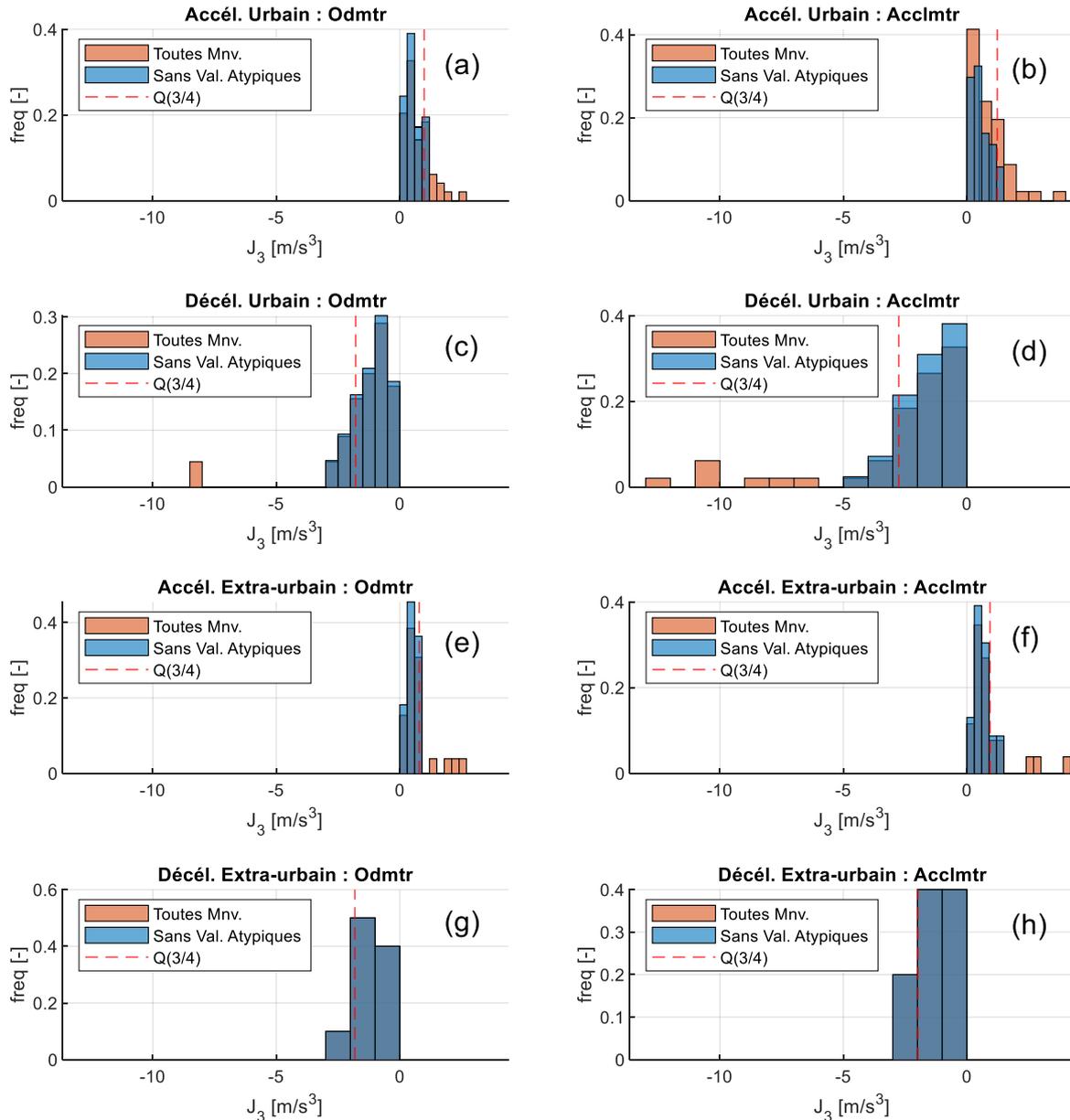


FIG. 3.32 – Histogramme des valeurs d'à-coup de la phase finale des manœuvres, J_3 . (a, c, e, g) référentiel véhicule, à partir des mesures issues de l'odométrie; (b, d, f, h) référentiel du conducteur, à partir des mesures de l'accéléromètre. (a) et (b) Scénario urbain - manœuvres d'accélération, (c) et (d) Scénario urbain - manœuvres de décélération, (e) et (f) Scénario extra-urbain - manœuvres d'accélération, (g) et (h) Scénario extra-urbain - manœuvres de décélération. Pour faciliter la comparaison, les axes horizontaux sont identiques sur toutes les figures.

d'importantes différences pour toutes les statistiques. Cela s'explique probablement par la présence d'un nombre important de valeurs atypiques (cf. Fig. 1.2 de l'Annexe I).

3.4.3 Accélération de la phase stabilisée du trapèze : a_{ex}

Nous considérons ici les distributions des valeurs d'accélération pendant les phases stabilisées, a_{ex} . Même si la présence de valeurs atypiques a été moins importante par

rapport aux analyses des phases transitoires, nous avons décidé de garder l'algorithme de Freedman-Diaconis [70] pour déterminer les intervalles des histogrammes. La Figure 3.33 présente les distributions de valeurs de a_{ex} . Nous constatons le même phénomène de concentrations de faibles valeurs que lors des analyses de l'à-coup.

Les Tableaux 3.9 et 3.10 présentent les données statistiques de l'amplitude a_{ex} et la durée τ_2 de la phase finale des manœuvres, associées respectivement aux informations provenant de l'odométrie et de l'accéléromètre. Les valeurs statistiques issues des deux capteurs sont relativement similaires.

Il est d'intérêt de comparer s'il y a une différence dans le comportement du conducteur lors des manœuvres d'accélération et de décélération. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser les observations issues des scénarios urbain car le nombre est plus important, est donc plus représentatif de la variabilité de conduite. Étant donné que a_{ex} n'a pas le même signe selon qu'il d'agisse d'accélérations ou de décélérations, nous allons considérer plutôt sa valeur absolue, ce qui revient à étudier s'il existe une *symétrie miroir* entre les deux types de manœuvre.

Avant de choisir un test d'hypothèse pour étudier les valeurs de a_{ex} dans les deux types de manœuvre, nous avons comparé la forme des distributions. Pour cela nous avons appliqué le test de Kolmogorov-Smirnov [130] aux valeurs absolues de a_{ex} moins la médiane de chaque classe. Dans le cas des données dans le référentiel du véhicule, associé à l'odométrie, le test a donné $p = 0.5693$; en considérant le référentiel du conducteur, à partir des informations de l'accéléromètre, nous obtenons $p = 0.1839$. Sur aucun des deux cas, le test ne permet de rejeter l'hypothèse nulle (« les deux échantillons suivent la même distribution de probabilité »). Ainsi, pour les deux référentiels, les deux distributions semblent avoir une forme similaire pour des accélérations et de décélérations.

En vue de la similarité des distributions, il semble possible d'utiliser le test U de Mann-Whitney pour comparer les médianes de a_{ex} associés à des manœuvres d'accélération et de décélération¹⁷ [62, 63, 152]. L'application du test a donné $p = 0.0509$ pour a_{ex} dans le référentiel du véhicule et $p = 0.0173$ pour a_{ex} dans celui du conducteur. Il est difficile d'interpréter ces résultats. *A priori*, la médiane de a_{ex} semble varier entre des accélérations et des décélérations, ces dernières ayant des plus fortes valeurs d'accélération stabilisée. Cependant, vu que les valeurs de p ne sont pas aussi faibles qu'on aurait pu le souhaiter, il vaut mieux rester prudent dans l'interprétation de ces résultats. Des expériences sup-

Contexte	Mnv.	Amplitude (J_3)			Durée (τ_3)		
		Médiane	DAM	Q(3/4)	Médiane	DAM	Q(3/4)
Urbain	Accél.	0.614	0.361	1.231	1.182	0.571	2.279
	Décél.	-1.601	0.902	-2.76	0.483	0.215	0.765
Extra-urbain	Accél.	0.679	0.294	0.938	0.953	0.603	1.72
	Décél.	-1.285	0.637	-1.98	0.774	0.376	1.214

ТАВ. 3.8 – Valeurs statistiques de l'à-coup de la phase finale, J_3 , dans le référentiel du conducteur (à partir des mesures de l'accéléromètre).

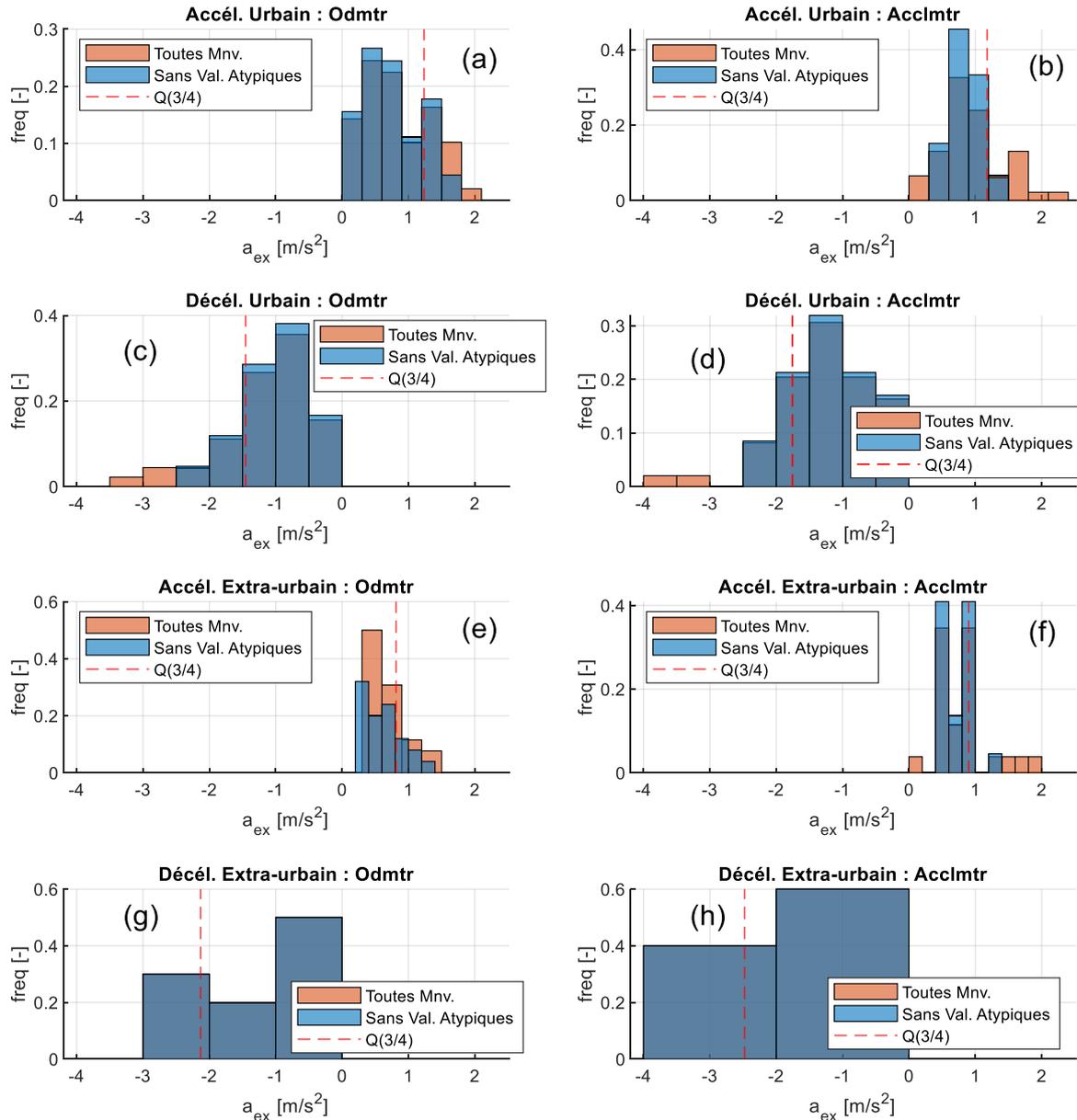


FIG. 3.33 – Histogramme des valeurs d'accélération stabilisée des manœuvres, a_{ex} . (a, c, e, g) référentiel véhicule, à partir des mesures issues de l'odométrie; (b, d, f, h) référentiel du conducteur, à partir des mesures de l'accéléromètre. (a) et (b) Scénario urbain - manœuvres d'accélération, (c) et (d) Scénario urbain - manœuvres de décélération, (e) et (f) Scénario extra-urbain - manœuvres d'accélération, (g) et (h) Scénario extra-urbain - manœuvres de décélération. Pour faciliter la comparaison, les axes horizontaux sont identiques sur toutes les figures.

plémentaires avec un nombre plus important de manœuvres semblent nécessaires pour trancher la question.

17. L'hypothèse nulle du test de Mann-Whitney pour les deux variables aléatoires est $\mathbb{P}(X < Y) = 0.5$, pour les variables aléatoires X et Y [62, 63, 152]. Cela n'équivaut pas à comparer les médianes des échantillons à moins que les deux distributions aient la même forme (avec la même échelle) [62].

Contexte	Mnv.	Amplitude (a_{ex})			Durée (τ_2)		
		Médiane	DAM	Q(3/4)	Médiane	DAM	Q(3/4)
Urbain	Accél.	0.773	0.390	1.23	0.823	0.569	1.895
	Décél.	-0.961	0.419	-1.454	0.554	0.420	1.403
Extra-urbain	Accél.	0.593	0.207	0.813	1.141	0.801	2.024
	Décél.	-1.127	0.681	-2.132	1.071	0.445	2.7

TAB. 3.9 – Valeurs statistiques de l'accélération de la phase stabilisée, a_{ex} , dans le référentiel du véhicule (à partir des mesures issues de l'odométrie).

Contexte	Mnv.	Amplitude (a_{ex})			Durée (τ_2)		
		Médiane	DAM	Q(3/4)	Médiane	DAM	Q(3/4)
Urbain	Accél.	0.880	0.250	1.178	0.902	0.891	1.648
	Décél.	-1.325	0.5	-1.756	0.833	0.554	1.712
Extra-urbain	Accél.	0.780	0.211	0.9	1.298	0.703	2.235
	Décél.	-1.083	0.819	-2.477	1.31	0.747	2.049

TAB. 3.10 – Valeurs statistiques de l'accélération de la phase stabilisée, a_{ex} , dans le référentiel du conducteur (à partir des mesures de l'accéléromètre).

3.4.4 Rapidité longitudinale de la manœuvre : q_{long}

Jusqu'à présent, nous avons uniquement considéré des paramètres qui sont exprimés de manière explicite dans la formulation des manœuvres ; cependant, les ergonomes peuvent regarder d'autres informations au moment de décider de l'acceptabilité d'une manœuvre par un utilisateur. Par exemple, la *rapidité* est une mesure de l'*agilité* dans l'exécution d'une manœuvre qui est utilisée pour quantifier la qualité de vol des hélicoptères [139]. Bellem et al. proposent une extension de cette mesure à la conduite des véhicules routiers, en l'appliquant aux manœuvres latérales et longitudinales [18]. Pour ces dernières, le paramètre proposé est nommé *rapidité longitudinale*, que nous noterons q_{long} dans ce document. q_{long} est définie par (3.52), où \bar{a}_{long} est l'accélération longitudinale moyenne de la manœuvre et ΔV_{long} est la variation de vitesse longitudinale de celle-ci.

$$q_{long} = \frac{\bar{a}_{long}}{\Delta V_{long}} = \frac{\bar{a}_{long}}{\int_0^{\tau_{mnv}} a_{veh}(t') dt'} = \frac{\bar{a}_{long}}{\tau_{mnv} \bar{a}_{long}} = \frac{1}{\tau_{mnv}} \quad (3.52)$$

L'équation (3.52) montre que la *rapidité longitudinale* correspond à l'inverse de la durée de la manœuvre τ_{mnv} . En revanche, nous ne pouvons pas être sûrs que cette information soit perçue par le conducteur, de point de vue physiologique, en mesurant le temps écoulé pendant l'exécution de la manœuvre. Il se peut que le conducteur intègre, de manière inconsciente, sa perception d'accélération moyenne fournie par son SV, et sa perception de la variation de vitesse. Ainsi, nous calculerons deux grandeurs supplémentaires, $q_{long}^{perc-odom}$ et $q_{long}^{perc-accl}$, définies sur (3.53) et (3.54).

La variable $q_{long}^{perc-odom}$ est calculée en intégrant l'accélération du véhicule, et en divisant le résultat par la variation de vitesse entre le début et la fin de la manœuvre, tel que

montré sur (3.53). A l'exception de la durée de la manœuvre, τ_{mnv} , pouvant être déterminée, en principe, indépendamment du capteur utilisé, tous les paramètres de l'équation peuvent être obtenues à partir de l'odométrie : V_0^{odom} et V_f^{odom} sont respectivement les vitesses initiale et finale du véhicule, qui peuvent être directement mesurées ; a_0^{odom} , a_{ex}^{odom} , a_f^{odom} , τ_1^{odom} , τ_2^{odom} , τ_3^{odom} résultent d'appliquer la méthode d'identification à l'estimation d'accélération à partir du signal de vitesse. Considérer $q_{long}^{perc-odom}$ revient à supposer que l'accélération dans le référentiel du véhicule ne serait pas directement ressentie par le conducteur, mais elle pourrait être inférée à partir des retours visuels et auditifs.

$$q_{long}^{perc-odom} = \frac{\bar{a}_{long}^{odom}}{V_f^{odom} - V_0^{odom}} = \frac{\left[\frac{1}{2} a_{ex}^{odom} + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_1^{odom} a_0^{odom} + \tau_2^{odom} a_{ex}^{odom} + \tau_3^{odom} a_f^{odom}}{\tau_{mnv}} \right) \right]}{V_f^{odom} - V_0^{odom}} \quad (3.53)$$

Par définition, q_{long} et $q_{long}^{perc-odom}$ sont identiques ; dans la pratique, il peut y avoir des petites différences entre les deux variables. Toutefois, le fait d'obtenir des valeurs similaires de q_{long} et $q_{long}^{perc-odom}$ permettrait de montrer la légitimité des méthodes proposées dans ce chapitre.

$$q_{long}^{perc-accl} = \frac{\bar{a}_{long}^{accl}}{V_f^{odom} - V_0^{odom}} = \frac{\left[\frac{1}{2} a_{ex}^{accl} + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_1^{accl} a_0^{accl} + \tau_2^{accl} a_{ex}^{accl} + \tau_3^{accl} a_f^{accl}}{\tau_{mnv}} \right) \right]}{V_f^{odom} - V_0^{odom}} \quad (3.54)$$

La variable $q_{long}^{perc-accl}$ tient compte du fait que la perception d'accélération est majoritairement due aux retours vestibulaires, associés à l'accélération dans le référentiel du conducteur. Ainsi, la valeur moyenne d'accélération, \bar{a}_{long}^{accl} , est calculée dans ce référentiel, en utilisant les résultats de l'identification à partir des données issues de l'accéléromètre. La variation de vitesse entre le début et la fin de manœuvre est toujours calculée à partir des mesures de l'odométrie. Cela est cohérent avec le fait que ces informations seraient perçues à travers les autres sens, le SV étant insensible à la vitesse. Ainsi, *a priori*, l'accélération serait perçue dans le référentiel du conducteur et la vitesse dans celui du véhicule.

La Figure 3.34 présente des histogrammes de distribution associés à $q_{long}^{perc-odom}$ et $q_{long}^{perc-accl}$ pour chacun des scénarios considérés. En vue du faible nombre de valeurs atypiques dans les manœuvres étudiées (cf. Figure 1.4 de l'Annexe I), nous avons décidé cette fois-ci d'utiliser l'algorithme de groupement que Matlab utilise par défaut [132].

Il est difficile de déceler une fonction de distribution propre à tous les scénarios, ou de comparer les distributions associées à $q_{long}^{perc-odom}$ et $q_{long}^{perc-accl}$ pour un même scénario ; cela peut être associé au faible nombre d'observations considérées. En revanche, il semblerait que la plus forte concentration de manœuvres ne corresponde pas au plus petit intervalle, mais à un intervalle légèrement supérieur, que l'on pourrait situer grossièrement entre 0.2 et 0.5 [1/s].

Le lecteur aura remarqué, sur la Figure 3.34.b, la présence d'un intervalle associé à des valeurs négatives de $q_{long}^{perc-accl}$. Il correspond à la manœuvre No. 30 de la Figure 1.4 de l'Annexe I et il est probablement dû à la présence d'une pente positive. Étant donné que

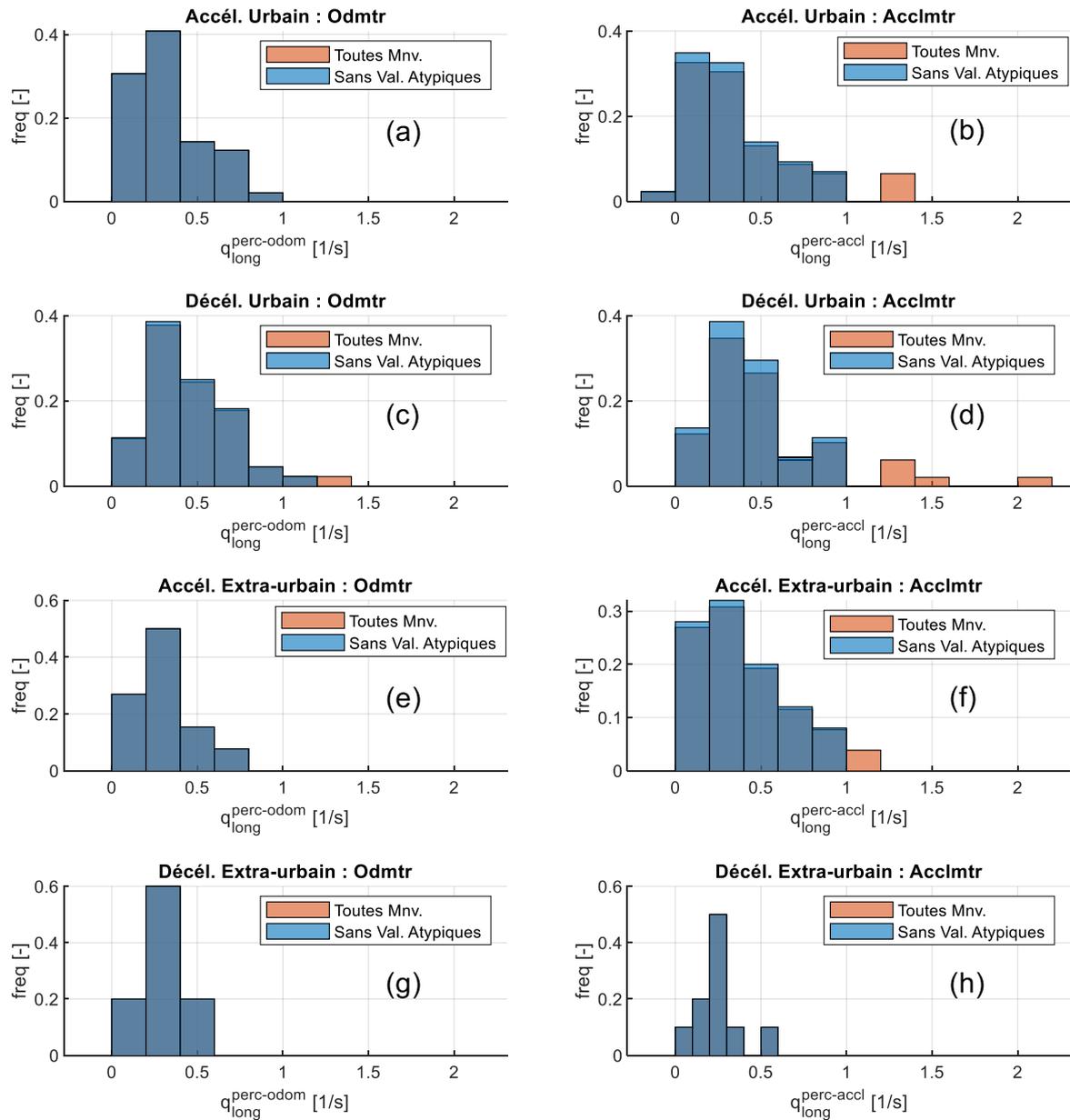


FIG. 3.34 – Histogramme des valeurs de rapidité longitudinale des manœuvres, q_{long} . (a, c, e, g) référentiel véhicule, à partir des mesures issues de l'odométrie; (b, d, f, h) référentiel du conducteur, à partir des mesures de l'accéléromètre. (a) et (b) Scénario urbain - manœuvres d'accélération, (c) et (d) Scénario urbain - manœuvres de décélération, (e) et (f) Scénario extra-urbain - manœuvres d'accélération, (g) et (h) Scénario extra-urbain - manœuvres de décélération. Pour faciliter la comparaison, les axes horizontaux sont identiques sur toutes les figures.

pendant cette manœuvre le niveau d'accélération est faible, la composante de la pesanteur dans le référentiel longitudinal du conducteur¹⁸ compenserait le ressenti vestibulaire associé à l'accélération du véhicule. De ce fait, on aurait une accélération négative dans le référentiel du conducteur, alors que l'écart de vitesse resterait positif; en revanche,

la faible amplitude de l'accélération laisse penser qu'elle ne serait pas traduite par une réponse vestibulaire, et elle passerait donc inaperçue par le conducteur.

Le Tableau 3.11 présente les statistiques associées à q_{long} et à τ_{mnv} pour chaque scénario. Les valeurs médianes restent relativement proches entre les différents scénarios. Afin de tester s'il existe des différences significatives dans la rapidité longitudinale des manœuvres d'accélération et de décélération, nous avons comparé les valeurs de q_{long} dans le cas du scénario urbain. Nous avons choisi pour la comparaison le test U de Mann-Whitney [62, 63, 152] et obtenu une valeur $p = 0.0046$, ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle. En outre, nous avons appliqué le test de Kolmogorov-Smirnov [130] aux valeurs de q_{long} moins la médiane de chaque classe ; le test n'a pas permis de rejeter l'hypothèse nulle ($p = 0.2738$), ce qui laisse penser que les deux distributions ont des formes similaires. En vue de ce résultat, il est raisonnable de penser que l'application du test de Mann-Whitney permet de comparer les valeurs médianes des deux distributions. Une interprétation vraisemblable de ces résultats est que « la médiane de la rapidité longitudinale du conducteur est supérieure pour des manœuvres d'accélération que pour des décélérations. »

Contexte	Mnv.	Amplitude (q_{long})			Amplitude (τ_{mnv})		
		Médiane	DAM	Q(3/4)	Médiane	DAM	Q(3/4)
Urbain	Accél.	0.276	0.0912	0.424	3.52	1.48	5.23
	Décél.	0.397	0.176	0.592	2.44	0.88	3.47
Extra-urbain	Accél.	0.267	0.0893	0.397	3.74	1.28	5.04
	Décél.	0.238	0.0388	0.281	3.9	0.84	4.84

TAB. 3.11 – Valeurs statistiques de la Rapidité longitudinale, q_{long} , et de la durée, τ_{mnv} , des manœuvres

Le test U de Mann-Whitney est basé sur les rangs des éléments [62, 63, 152]. De plus, q_{long} est une variable strictement positive. En vue de cela, nous pouvons conclure que l'étude de cette variable revient *exactement* à comparer les durées totales des manœuvres, τ_{mnv} . Nos résultats semblent donc montrer que, en milieu urbain, les manœuvres *élémentaires* de décélération du conducteur ont été exécutées en moins de temps que celles d'accélération. Malheureusement, le nombre d'observations dans le scénario extra-urbain ne semble pas suffisant pour faire des comparaisons fiables.

La Table 3.12 présente les statistiques associées à $q_{long}^{perc-odom}$ et $q_{long}^{perc-accl}$. Les valeurs semblent être assez proches dans les deux cas ; cependant, les conditions d'inclinaison de la route n'ont pas été contrôlées lors de notre test. Il serait d'intérêt de étudier les différences entre $q_{long}^{perc-odom}$ et $q_{long}^{perc-accl}$, dans des scénarios à forte pente, où celle-ci est contrôlée, pour vérifier son influence sur la rapidité des manœuvres.

18. En toute rigueur, on devrait parler plutôt de « la projection du champ d'accélération dû à la pesanteur sur l'axe antéropostérieur du conducteur. »

Contexte	Mnv.	Amplitude ($q_{long}^{perc-odom}$)			Amplitude ($q_{long}^{perc-accl}$)		
		Médiane	DAM	Q(3/4)	Médiane	DAM	Q(3/4)
Urbain	Accél.	0.283	0.1004	0.426	0.29	0.159	0.512
	Décél.	0.404	0.170	0.625	0.412	0.190	0.686
Extra-urbain	Accél.	0.267	0.0886	0.393	0.372	0.175	0.559
	Décél.	0.255	0.0508	0.278	0.219	0.0587	0.287

TAB. 3.12 – Valeurs statistiques de la Rapidité longitudinale des manœuvres, q_{long}^{perc} ; indicateurs basés sur la perception du conducteur

3.4.5 Synthèse des résultats et discussion

Dans cette section, nous avons étudié certains des paramètres des manœuvres, obtenus grâce à la méthodologie proposée dans ce chapitre. Nous avons considéré des manœuvres d'accélération et de décélération, en contexte urbain et extra-urbain. Des informations en provenance de deux capteurs ont été utilisées: d'une part, le signal d'accélération issu des capteurs des roues, serait représentatif du mouvement du véhicule dans son référentiel; d'autre part, la mesure de l'accéléromètre tient compte aussi des effets dus à la gravité, quand la pente n'est pas nulle, et serait donc associée à l'accélération *perçue* par le conducteur, dans son propre référentiel.

Nous constatons que les observations d'accélération stabilisée, a_{ex} , et d'à-coup des phases transitoires, J_1 et J_3 , tendent à se concentrer autour de valeurs relativement faibles. Cela pourrait indiquer que, dans la plupart des manœuvres, le conducteur a eu un style de conduite relativement doux, mais qu'il a adopté une façon de conduire plus agressive dans d'autres situations de roulage, moins récurrentes.

Il est possible que, lorsque le conducteur fait appel à une fonction de délégation de conduite, il soit plus sensible au comportement du véhicule, dans la mesure où son niveau de maîtrise est moindre. De ce fait, il est possible d'imaginer que, de manière analogue à ce qui se passe quand on est passager dans un véhicule, on serait moins à même d'accepter certains niveaux d'accélération et d'à-coup que si on était au volant. Ainsi, nous pensons qu'une limite pertinente aux valeurs de a_{ex} , J_1 et J_3 peut être obtenue en considérant le quantile 0.75 de chaque paramètre, c'est-à-dire, ce que les conducteurs font le 75% du temps. Ces limites sont représentées par des traits pointillés sur les Figures 3.31-3.33 et sur les colonnes notées **Q(3/4)** des tableaux correspondants.

Comme discuté précédemment résultats associés aux phases transitoires doivent être traités avec précaution, à cause des potentielles imprécisions associées à l'identification. En revanche, les estimations d'accélération en phase stabilisée, a_{ex} , ne seraient pas concernées par ce genre de phénomènes (de nature temporelle) dans la mesure où elles sont basées sur plusieurs points *au milieu* de l'enregistrement de la manœuvre.

Lorsqu'il s'agit de réaliser des tests statistiques sur les paramètres des manœuvres proposés, il faut tenir compte de la non-normalité des distributions et du fait qu'elles

soient bornées, par définition, par la valeur zéro¹⁹. Ces considérations devraient orienter la sélection des tests.

En raison du nombre limité d'enregistrements de manœuvres de conduite, nous avons préféré rester prudents dans les études statistiques réalisées. Nous nous sommes limités à faire deux analyses, sur des scénarios urbains, où le nombre d'observations a été le plus important. D'abord, nous avons comparé la rapidité longitudinale, q_{long} des manœuvres d'accélération et de décélération du conducteur considéré ; l'étude semble montrer que les manœuvres de décélération se font *en médiane* en moins de temps que celles d'accélération.

En étudiant la durée totale des manœuvres, τ_{mnv} , nous constatons que la plupart des manœuvres sont exécutées assez rapidement (cf. Table 3.11). Parmi les observations étudiées, lorsque le conducteur a dû répondre à des scénarios de roulage complexes, il semble avoir exécuté des manœuvres composées, en enchaînant plusieurs trapèzes de durée relativement faible. Ainsi, nos résultats ne sont pas représentatifs de la durée totale de la réponse du conducteur à une situation de conduite, soit une *manœuvre complexe*, mais de celle des actions élémentaires du conducteur, soit des *manœuvres simples*.

Aussi, nous avons comparé aussi les valeurs médianes de a_{ex} , montrant que, *a priori*, l'amplitude des décélérations serait plus importante que celle des accélération ; toutefois, les p-valeurs relativement importantes nous invitent à rester prudents dans l'interprétation de ces résultats. Une étude de même type, considérant un nombre plus important de manœuvres, serait nécessaire pour confirmer cette observation.

Dans la section II.1.5 nous avons évoqué la possibilité que les accélérations et les décélérations soient perçues de manière différente par le conducteur, ce qui serait dû à la configuration de ses organes otholitiques ; si nos résultats étaient confirmés par d'autres études, cela viendrait supporter cette hypothèse. En revanche, d'autres phénomènes pourraient expliquer aussi le fait que l'amplitude de décélérations soit supérieure à celle des accélérations. Nous pouvons mentionner, pour n'en citer que deux : la différence dans la perception de *criticité* par le conducteur et l'effet que le siège exerce sur celui-ci entre les deux types de manœuvres.

Pour confirmer nos analyses, il serait intéressant d'appliquer le cadre méthodologique que nous proposons, à un panel de conducteurs représentatif de la population qu'on souhaiterait étudier. Cela fait partie des perspectives de ces travaux.

3.5 DÉPENDANCE ENTRE L'À-COUP ET LA DURÉE DES PHASES TRANSITOIRES

19. Si on parle des manœuvres d'accélération, par définition, a_{ex} , J_1 et $J_3 > 0$ (sinon, on aurait à faire à des décélérations), et vice-versa

Objectif de la section

Étudier, sur des données réels de conduite, l'influence entre la durée des phases transitoires et l'intensité de l'à-coup utilisé.

Dans cette section nous nous intéresserons à la relation entre la durée d'application de l'à-coup et son acceptabilité par le conducteur. Sur la section II.1.3, nous avons montré que, d'après les travaux de Jones et al. [106], il existe une relation entre le temps d'application d'un stimulus d'à-coup et sa capacité à générer une réponse neuronale chez les mammifères (voir Figure 1.15). Aussi, sur la section II.1.4, nous avons évoqué les travaux de Browning [23, 92], montrant que des sujets debout sur une plateforme motorisée ont eu plus de difficulté à garder l'équilibre, pour un stimulus d'à-coup de même valeur, lorsque la phase transitoire s'est prolongé. L'étude a montré une relation inverse entre la valeur d'à-coup acceptable et la durée de l'application du stimulus (voir Figure 1.17).

A partir des résultats de la section II.3.3, nous pouvons désormais voir la relation entre les valeurs d'à-coup *moyen* et la durée de phases transitoires. Cela est présenté sur la Figure 3.35 pour les manœuvres d'accélération. En vue du faible nombre de points, nous avons décidé de considérer en même temps les scénarii urbain et extra-urbain. Ces résultats suggèrent que l'intensité de l'à-coup appliqué par les conducteurs lors des phases transitoires suit une relation de la même nature que celle montrée sur [23, 106, 92]. Nous proposons un modèle pour capturer cette dépendance.

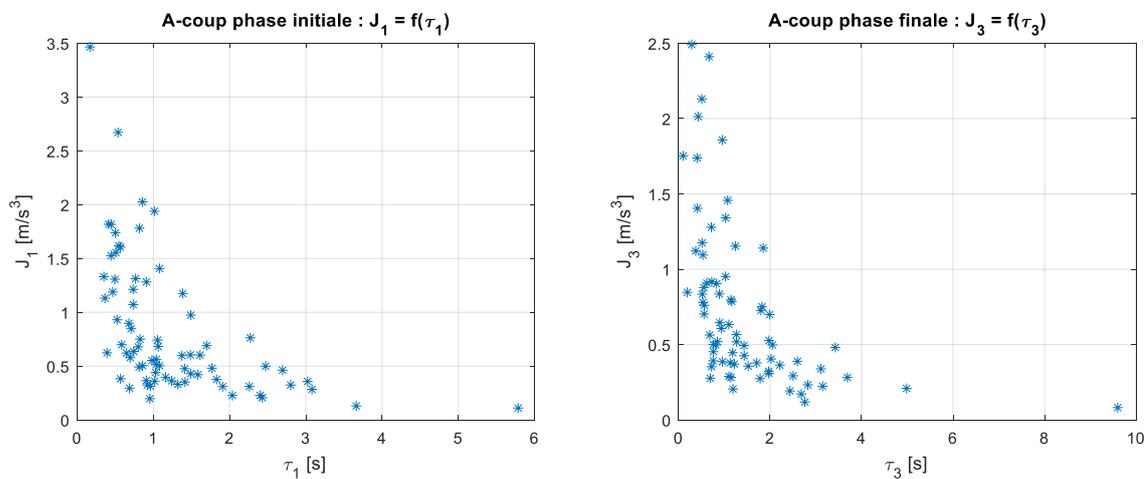


FIG. 3.35 – Influence de la durée de la phase transitoire sur la valeur d'à-coup - manœuvres d'accélération. Les données sont issues de l'odométrie.

Nous ferons l'hypothèse que la valeur limite d'à-coup tolérable, \hat{J}_k pour des manœuvres d'accélération et \check{J}_k pour des décélérations, dépend de la durée de la phase transitoire en question. L'indice $k \in \{1,3\}$, indique la phase transitoire de la manœuvre (1 : phase initiale ; 3 : phase finale). Cette relation peut être représentée par (3.55), où $\hat{J}_k = J_k^{lim}(\tau_k)$ dans le cas des accélérations et $\check{J}_k = J_k^{lim}(\tau_i)$ pour les décélérations ; τ_k est la durée de la phase transitoire correspondante et c_J , b_J et d_J sont des constantes associées à chaque

phase et à chaque type de manœuvre. Pour des manœuvres d'accélération $b_J > 0$, et $b_J < 0$ pour des décélérations.

$$J_k^{lim}(\tau_k) = f_J(\tau_k) = c_J + \frac{b_J}{\tau_k + d_J} \quad (3.55)$$

Sur l'Annexe VII, nous proposons une méthode permettant d'obtenir des valeurs pertinentes des paramètres du modèle (c_J , b_J et d_J), à partir des données issues de roulages réels. Pour la méthode revient à résoudre trois problèmes d'optimisation imbriqués ; l'annexe présente les détails techniques, ainsi que des considérations pratiques pour son implémentation.

3.5.1 Limites d'à-coup en fonction de la durée des phases transitoires

Grâce à la méthode proposée, nous avons trouvé des limites d'à-coup en fonction de la durée de la phase transitoire, pour des manœuvres d'accélération et de décélération. Nous avons aussi pris en compte les deux sources d'information, l'odométrie et l'accéléromètre, associées respectivement aux référentiels du véhicule et du conducteur. De plus, nous avons considéré la relation entre l'à-coup de la phase initiale, J_1 , et sa durée, τ_1 , ainsi que celle entre l'à-coup de la phase finale, J_3 , et sa durée, τ_3 . Cela fait au total huit instances de l'Algorithme 6 de l'Annexe VII qu'il a fallu résoudre.

Le Tableau 3.13 présente les résultats de l'identification : les paramètres « optimaux » du modèle, b_J^* , c_J^* et d_J^* , les quantiles cible q_J^{cib} et obtenu q_J^* , ainsi que le paramètre de calibration, c_d^* , et la valeur de la fonction de coût, Φ^* , correspondantes²⁰. Pour les manœuvres d'accélération, où les valeurs de J_1 sont positives, nous avons pris $q_J^{cib} = 0.75$; pour celles de décélération nous avons utilisé $q_J^{cib} = 0.25$. Ces chiffres traduisent dans les deux cas la volonté de garder 75% des valeurs « les plus récurrentes. »

Mnv.	Capteur	Variab.	Param. Modèle			Quantile		c_d^*	Φ^*
			b_J^*	c_J^*	d_J^*	q_J^{cib}	q_J^*		
Accél.	Odmtr	J_1, τ_1	0.2807	0.3426	-0.4117	0.75	0.76	0.153	6.57
		J_3, τ_3	0.2426	0.3722	-0.4049	0.75	0.747	0.197	7.64
	Acclmtr	J_1, τ_1	0.4052	0.31	-0.3553	0.75	0.75	0.244	7.08
		J_3, τ_3	0.484	0.1726	-0.2497	0.75	0.75	0.26	7.46
Décél.	Odmtr	J_1, τ_1	-0.1321	-0.7439	-0.4489	0.25	0.255	8.03	26.3
		J_3, τ_3	-0.5082	-0.2668	-0.1972	0.25	0.236	4.04	27.8
	Acclmtr	J_1, τ_1	-0.1439	-0.7717	-0.3987	0.25	0.254	4.67	23.7
		J_3, τ_3	-0.6967	-0.3093	-0.1365	0.25	0.237	3.79	27.8

TAB. 3.13 – Synthèse des résultats de l'optimisation - dépendance entre la limite d'à-coup acceptable et la durée de la phase transitoire

Le lecteur aura noté que les valeurs de Φ^* sont beaucoup plus importantes quant il s'agit des accélérations, par rapports aux décélérations. Cela s'explique par la dissymétrie

20. Pour comprendre le sens de ces paramètres, le lecteur est invité consulter l'Annexe VII.

des fonctions (1.50) et (1.51). Cela met en évidence le fait que la fonction $\Phi(\underline{\theta}, X)$ doit être uniquement vue comme un *outil* pour l'identification des données réelles, et non pas comme un indice de la *qualité* des résultats obtenus. Toutefois, le fait d'obtenir des valeurs très différentes au sein d'un même type de manœuvre, peut être un indice que la résolution du problème (1.54) a conduit à un minimum local. Cela n'a pas été le cas pour notre étude, comme le montre le tableau.

La Figure 3.36 présente les résultats de l'algorithme d'identification sur nos données issues de roulages réels. Nous constatons que les résultats obtenus semblent correspondre bien à des minima globaux. En revanche, nous observons aussi que, dans le cas des manœuvres d'accélération, la plupart des points *sur la courbe* correspondent à des durées intermédiaires, alors que la répartition semble être plus équilibrée pour les décélérations. Cela pourrait montrer l'intérêt de choisir une valeur de q_J^{cib} plus importante. Nous avons vérifié que, dans ce cas, la répartition est plus équilibrée. Pour confirmer la pertinence de cette hypothèse, il faudrait appliquer la méthode proposée à un échantillon plus importante, et surtout plus représentatif, des manœuvres de conduite.

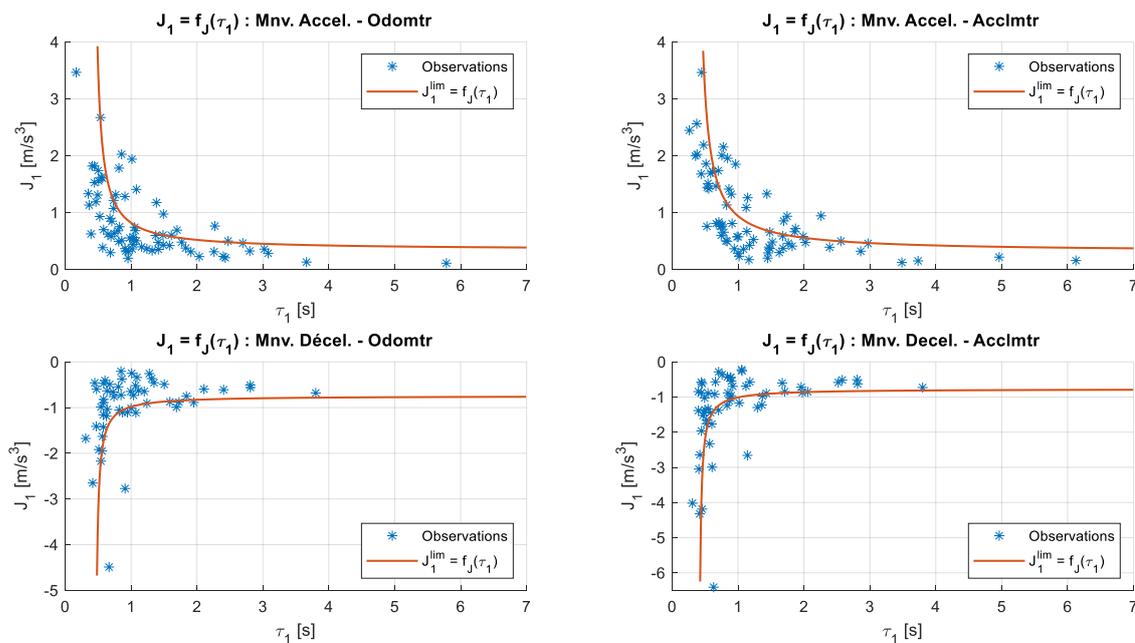


FIG. 3.36 – Identification - phase initiale de la manœuvre : à-coup acceptable J_1^{lim} en fonction de la durée de la phase 1, τ_1 .

Malgré la réserve que nous venons de mentionner, nous pouvons observer que, grâce à la méthode d'identification, il a été possible d'obtenir une représentation de l'acceptabilité du conducteur à l'à-coup de la phase initiale des manœuvres trapézoïdales d'accélération, en fonction de sa durée. Nous constatons que les fonctions semblent avoir un comportement *plus raide* lorsqu'il s'agit des décélérations, ce qui est compatible avec la présence de valeurs plus importantes d'à-coup dans ce type de manœuvres.

La Figure 3.37 présente les résultats associés à la phase finale des manœuvres, et donc à la relation entre la limite acceptable de J_3 et la valeur de τ_3 . De même que pour les

phases initiales, la pertinence de l'identification pourrait être enrichie par un nombre plus important d'observations.

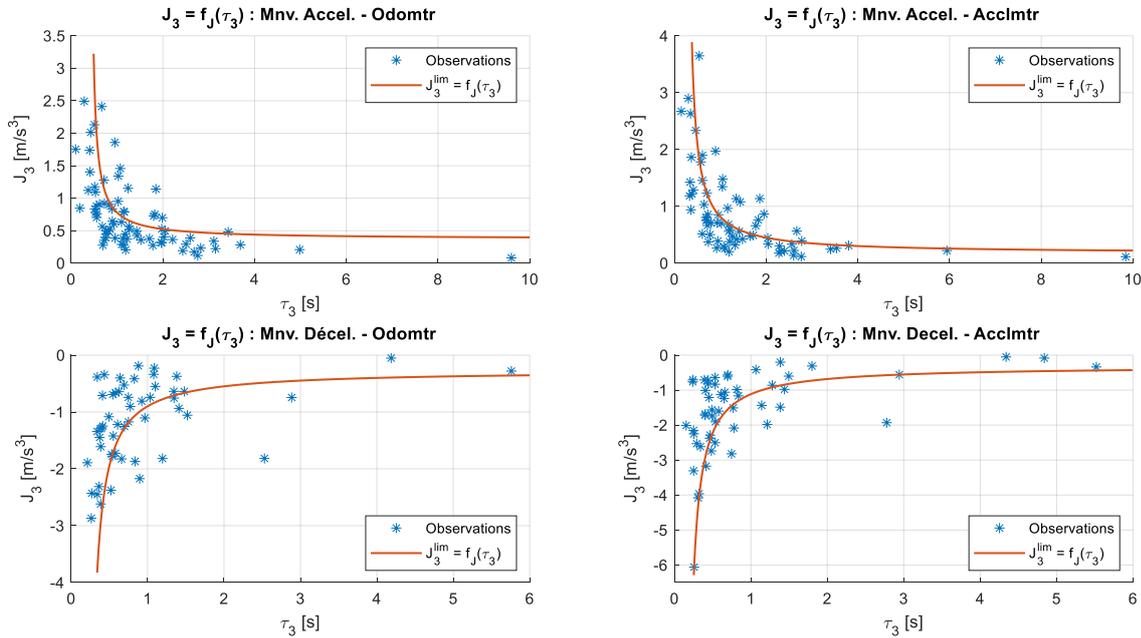


FIG. 3.37 – Identification - phase finale de la manœuvre : à-coup acceptable J_3^{lim} en fonction de la durée de la phase 3, τ_3 .

3.6 ANALYSE DES ROULAGES RÉELS : DISCUSSION

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à ce que des données issues des roulages réels peuvent nous apprendre sur l'agrément de conduite. Nous avons donc proposé une méthodologie permettant de le faire, et présenté quelques résultats obtenus grâce à son application. D'abord, nous nous sommes intéressés au traitement et au ré-échantillonnage de données. Ensuite, à l'extraction de manœuvres issues des roulages réelles, en concevant un outil pour leur extraction, lequel a été utilisé pour enregistrer plus d'une centaines de manœuvres à topologie *grossièrement trapézoïdale*, incluant des accélérations et des décélérations, issues des roulages en ville et extra-urbains. Puis, nous avons proposé une méthodologie pour identifier les manœuvres par un modèle trapézoïdal. Suite à cela, nous avons analysé certains paramètres des manœuvres qui devraient avoir une influence sur l'agrément de conduite. Finalement, nous avons étudié l'influence de la durée d'application d'un stimulus d'à-coup, en nous basant sur le comportement du conducteur en situation réelle.

Pendant cette étude nous avons considéré un nombre relativement faible de manœuvres ; aussi, l'étude s'est concentré sur un nombre limité de conducteurs. Pour confirmer nos observations, l'idéal serait qu'une étude similaire soit réalisée, en appliquant la méthodologie proposée, sur un panel de conducteurs plus représentatif (au moins de la

population française) et dans des conditions mieux maîtrisées. En particulier, il y aurait un fort intérêt à contrôler la pente pour étudier son influence sur l'agrément de conduite.

Malgré ces limitations, nos résultats présentent quelques avantages assez importants, dont nous mentionnerons deux : d'une part, le fait de travailler avec des données issues de roulages réels nous épargne d'un possible biais méthodologique. En effet, **l'acceptabilité du conducteur à un certain stimulus semble être associée au contexte** dans lequel il se trouve ; ainsi, ce n'est pas parce que le conducteur trouve acceptable un certain stimulus vestibulaire, dans des conditions de laboratoire, qu'il acceptera un tel comportement de la part de son véhicule.

En outre, d'autres facteurs peuvent rentrer en compte en situation réelle. Par exemple, si l'on voit que le véhicule précédent est en train de freiner, on sera plus à même d'accepter une décélération plus agressive que si on est à l'approche d'un panneau signalant une réduction de la vitesse limite. En revanche, cet aspect sort du cadre de notre étude. Ce serait fort intéressant d'analyser la corrélation entre l'inter-distance avec le véhicule précédent en début de manœuvre, et l'agressivité du conducteur, pouvant être exprimée par l'amplitude des paramètres de la manœuvre. Nous réservons cela aux perspectives de ce travail.

Un deuxième avantage de notre méthodologie réside dans la **considération de manière individuelle des manœuvres**. Tel qu'il a été discuté dans la section I.1.6, les décisions prises par le conducteur se traduisent sous forme de manœuvres ; ainsi, **cette manière de découper les situations de conduite correspondrait à la causalité du comportement du véhicule** (*si on a décéléré, c'est parce qu'il y avait un véhicule devant qui roulait moins vite*). De plus, grâce au modèle de topologie de manœuvre proposé, ayant un nombre restreint de paramètres, il est possible de caractériser, de manière systématique, le comportement du conducteur. **Cela offre un levier pour la définition de critères quantitatifs d'agrément de conduite**, tels ceux proposés dans le chapitre II.2.

* * *

La méthodologie proposée offre la possibilité d'étudier, sur une base bien définie et relativement objective, le comportement des conducteurs. Une manière de le faire est d'utiliser des tests d'hypothèses. A titre d'exemple, nos résultats semblent montrer que, au niveau des *manœuvres élémentaires*, les décélérations seraient exécutées en moins de temps que les accélérations, et avec une amplitude d'accélération plus importante. L'efficacité de notre méthode étant montrée sur un nombre de manœuvre, il est désormais possible et souhaitable, de vérifier nos observations dans des conditions mieux représentatives et contrôlées.

Cela n'est qu'un exemple du type d'étude qu'on pourrait réaliser grâce aux résultats de notre méthode. D'autres questions qui pourraient être adressées en appliquant des tests hypothèses aux résultats de l'identification sont :

- *La phase initiale des manœuvres est-elle exécutée avec la même intensité et dans une durée similaire que la phase finale ?* ou, dit autrement, *Les conducteurs réalisent-ils des manœuvres symétriques ou dissymétriques ?*

- Sur quels paramètres des manœuvres il y aurait des différences significatives entre des styles de conduite différents (« écologique, » « normal, » « sportif »)?
- Il y a-t-il des différences significatives entre le style de conduite en ville et sur autoroute?
- Il y-a-t-il des différences significatives entre le style de conduite d'un même conducteur en semaine et le week-end?

Pour répondre à certaines de ces interrogations, il est nécessaire de concevoir une campagne de test dédiée, avec un panel de conducteurs représentatif.

* * *

Concernant les perspectives industrielles de notre étude, tel qu'il a été mentionné précédemment, **il est possible de caractériser quantitativement l'agrément de conduite** grâce à l'identification de données issues de roulages en situation réelle. Ces informations peuvent être exploitées pour la conception et la mise au point des *fonctions d'aide à la conduite*.

L'analyse des enregistrements réels montre qu'**une topologie d'accélération grossièrement trapézoïdale fait partie du répertoire des manœuvres dont le conducteur dispose**. Ainsi, l'utilisation de manœuvres trapézoïdales pour une fonction d'aide à la conduite, lui conférerait un comportement qui serait familier pour le conducteur, ce qui devrait contribuer à l'acceptation de la fonction par celui-ci ; cela accorderait un caractère *intuitif* au comportement du véhicule.

En ce qui concerne la définition de critères d'agrément, il est possible d'établir des limites aux paramètres des manœuvres, en se basant sur un pourcentage des valeurs que les conducteurs appliquent dans la conduite réelle ; un exemple de cela est le quantile $Q(3/4)$, présenté sur ce chapitre. Aussi, on pourrait imaginer l'adaptation des seuils d'agrément en fonction de la situation de conduite (*dépassement, changement de vitesse réglementaire, accostage sur véhicule...*), et aussi selon le style de conduite du conducteur.

L'état de l'art, ainsi que nos propres observations, semblent montrer que **le seuil de tolérance d'un individu à l'à-coup diminue lorsque le stimulus se prolonge**. Nous avons proposé un modèle capturant ce phénomène, ainsi qu'une méthodologie d'identification. Le modèle est assez simple et il est caractérisé par seulement trois paramètres, ce qui se prête bien pour des applications embarquées. Dans la partie IV nous discuterons une approche permettant d'exploiter ce modèle pour la conception d'un système d'écoconduite automatique.

Une autre application qui pourrait découler de la modélisation discutée tout au long de cette partie, est la conception d'une fonction embarquée capable de caractériser le style de conduite et les habitudes d'un conducteur, afin de permettre à un *système de conduite automatisée* de le reproduire. **Un tel système pourrait donc apprendre les préférences du conducteur**, ce qui rendrait le comportement du véhicule beaucoup plus familier et intuitif, et **faciliterait l'acceptation par le public des fonctions de conduite autonome**.

III

Modélisation énergétique des manœuvres de conduite - Potentiel de l'écoconduite

MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DES MANŒUVRES DE CONDUITE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE

1

Objectif du chapitre

Modéliser la consommation énergétique d'un véhicule lors des manœuvres de conduite et proposer une représentation du rendement global d'un GMP électrique

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Modélisation physique de la consommation associée à une manœuvre de conduite, basée sur des données industrielles*
- *Modélisation analytique simplifiée, pour la réduction du coût de calcul*
- *Représentation graphique des manœuvres de conduite pour l'analyse des performances énergétiques*

Dans cette partie nous allons nous intéresser à l'enjeu énergétique associé à la conduite. Notre attention portera sur les VE. Pour ce faire, nous considérerons d'abord la chaîne des transformations d'énergie permettant à l'énergie chimique emmagasinée dans la batterie de changer le comportement du véhicule. Chacune de ces transformations engendre des pertes.

Dans un premier temps, nous présenterons un modèle numérique de la consommation du véhicule, en intégrant les pertes des différents organes du GMP. Ce modèle étant relativement coûteux en temps de calcul, nous proposerons quelques simplifications permettant d'obtenir un modèle analytique. Des indications pour l'identification d'un tel modèle à partir des données empiriques seront proposées.

Tel qu'il a été discuté, les actions du conducteur semblent se traduire sous forme de manœuvres, c'est-à-dire des profils d'accélération. En nous basant donc sur le modèle de manœuvre de conduite que nous avons proposé, nous présenterons un modèle de consommation d'énergie d'une manœuvre. Cela nous permettra d'associer l'effet des caractéristiques du style de conduite sur la consommation d'énergie.

Finalement, comme nous le verrons, le rendement des différents étages de transformation d'énergie dépend de celui des autres. Les interactions pouvant être assez complexes. Nous proposerons à la fin de ce chapitre une définition de *rendement global du GMP*, ainsi qu'une méthode pour le calculer et une représentation simplifiant son interprétation.

1.1 MODÉLISATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Objectif de la section

Proposer des modèles énergétiques adaptés à des études en-ligne et hors-ligne

Trouver une définition de VE, qui tient compte de la diversité de GMP électriques, tout en excluant les architectures série des véhicules hybrides, n'est pas une tâche triviale. Nous retiendrons la définition basée sur [88], en ajoutant une légère modification :

Un véhicule électrique est celui où une ou plusieurs machines électriques sont les seuls convertisseurs actifs d'énergie.

Cette définition est indépendante de la source d'énergie et elle inclue donc des VE à pile à combustible et des VE à Batterie (VEB). En revanche, dans le cadre de ce document, nous traiterons uniquement la modélisation de ces derniers, qui restent la grande majorité des VE sur le marché, à la date où j'écris ces lignes. Ainsi, toute la discussion qui suivra portera implicitement sur les VEB, même si des fois on peut utiliser l'acronyme VE. Toutefois, beaucoup des développements qui seront proposés devraient pouvoir s'appliquer aussi à des véhicules à pile à combustible, en faisant juste quelques modifications mineures.

Dans le cadre de cette étude, nous nous focaliserons sur l'architecture de GMP qui semble être la plus répandue sur le marché, et qui correspond aussi au produit industriel sur lequel ces travaux pourraient être appliqués. Ainsi, nous étudierons un véhicule électrique avec une seule batterie de traction, de type Lithium-ion, alimentant une seule machine électrique, associée à un réducteur de vitesse (c'est-à-dire, à une transmission mono-rapport). Nous considérerons que la transmission étudiée est de type *traction*. En outre, nous supposerons que les décélérations sont entièrement opérées à travers l'essieu avant ; hypothèse raisonnable, vu les ordres de grandeurs des décélérations étudiées. Pour l'étude de transmissions plus complexes, comme des transmission à quatre roues

motrices, il serait nécessaire de tenir compte des contraintes liées au transfert de masses et à la répartition de freinage [223]. Cela sort du cadre de notre étude.

La modélisation qui sera présentée par la suite peut être facilement appliquée à des véhicules à des rapports multiples, dans la mesure où elle est valable instantanément au maintien d'un rapport fixe. En revanche, en ce qui concerne la prise en compte de l'agrément de conduite, l'effet des changements de rapport devrait être aussi intégré dans la modélisation. Il est connu du monde industriel que l'à-coup associé à un passage de vitesse a une forte incidence sur son acceptation. Ainsi, même si nous ne traiterons pas cet aspect par la suite, les discussions de la Partie II devraient apporter un certain éclairage sur comment modéliser ces phénomènes. En outre, pour considérer des motorisations plus complexes intégrant plusieurs machines électriques, il est possible d'imaginer que, pour une certaine plage de fonctionnement, l'utilisation d'un modèle de *machine électrique équivalente* optimisant les pertes en fonction d'un état supplémentaire pourrait être appliqué (pour avoir une idée d'à quoi peut ressembler une telle modélisation, le lecteur est invité à consulter [82]); en revanche, dans d'autres plages de fonctionnement à plus forte criticité, des considérations associées à l'adhérence et à l'agrément de conduite devraient être prises en compte.

1.1.1 Modèle physique de la consommation

Le véhicule considéré pour nos études est une *Renault Zoé*, avec une batterie *ZE40*. Il s'agit donc d'un VE dont la motorisation est composée par une Machine Électrique (ME), plus précisément une machine synchrone à rotor bobiné de 68kW, avec une transmission mono-rapport la connectant à l'essieu avant. Le véhicule est alimenté par une batterie Li-ion de 400V et 41kWh. Un onduleur *réversible* assure le couplage électrique entre la batterie et la ME.

Nous précisons la terminologie utilisée par la suite : quand nous parlons de « motorisation, » nous faisons référence à l'ensemble onduleur-ME-transmission ; en revanche, lorsque le terme « GMP » est employé alors nous considérons, en plus de la motorisation, la batterie de traction. Les freins et les roues seront donc considérés à part, faisant partie du « véhicule ». Et le réseau de basse tension, constitué par un convertisseur DC-DC, une batterie 14V et des consommateurs, sera tout simplement modélisé comme une sollicitation de puissance sur la batterie ; à cela on ajoutera la demande d'énergie de la climatisation et on nommera le tout « auxiliaires ». La Figure 1.1 représente l'architecture considérée.

Dans le véhicule, l'énergie subit différentes transformations, ce qui engendre des pertes. De plus, l'énergie peut être stockée de différentes manières : dans la batterie, sous forme d'*énergie chimique*, et dans la masse du véhicule, sous forme d'*énergie cinétique* (en augmentant la vitesse) et d'*énergie potentielle* (en faisant *monter* le véhicule). Pour faciliter l'analyse, nous avons arrangé les équations par rapport à la nature des transformations de l'énergie. Pour modéliser la consommation du VE, nous avons utilisé le cadre de modélisation

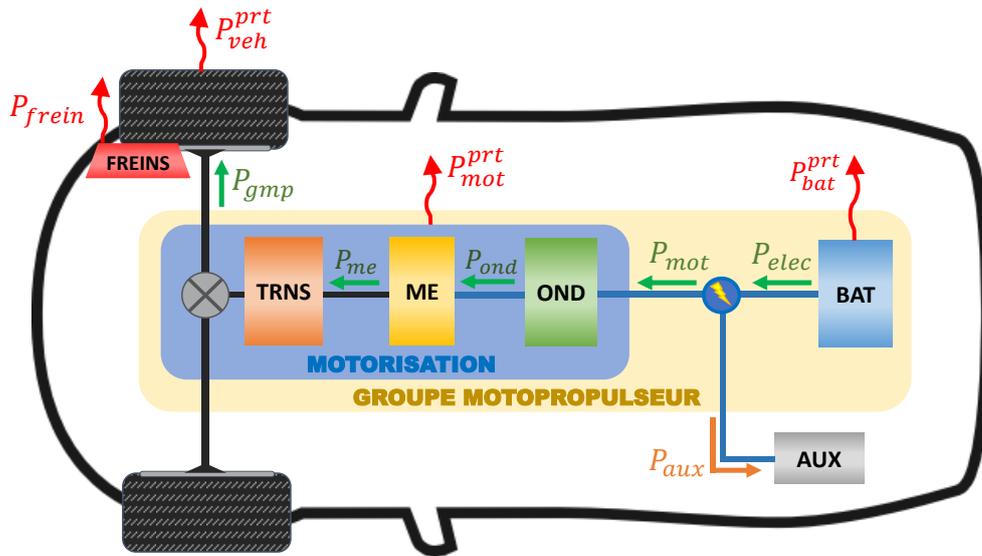


FIG. 1.1 – Architecture du VEB ; TRNS : Transmission, ME : Machine Électrique, OND : Onduleur, BAT : Batterie, AUX : Auxiliaires. La direction des flèches droites représente la convention pour des valeurs positives de puissance ; les flèches courbées représentent des pertes, dont le signe est toujours positif.

proposé par [81], en l'adaptant aux données disponibles. Les paramètres du modèle nous ont été fournis par Renault S.A.S.

1.1.1.1 Véhicule

Pour nos modèles, nous prenons comme convention que l'énergie sortant du GMP et appliquée au véhicule sera de signe positif. Celle-ci peut être emmagasinée dans la masse du véhicule, sous forme d'énergie cinétique et / ou potentielle, ou « consommée » afin de faire avancer le véhicule, en vainquant la traînée due aux forces aérodynamiques, à la résistance au roulement et autres [81]. Dans certains cas, l'énergie cinétique ou potentielle préalablement stockée dans le véhicule peut être prélevée par le GMP et / ou par les freins, ou utilisée pour faire avancer le véhicule. Nous noterons P_{veh} la somme de la puissance venant du GMP, P_{gmp} , qui peut être positive ou négative, et la puissance dissipée par les freins, $P_{frein} \geq 0$ choisi comme convention.

Pour une vitesse de véhicule donnée, V_{veh} , les forces appliquées sur le véhicule sont l'image des échanges d'énergie. Ainsi, nous avons préféré exprimer la distribution d'énergie comme un bilan de forces, tel que présenté sur (1.1), où F_{accl} est la composante de la force accélérant (ou décélérant) le véhicule, F_{pente} la composante de la pesanteur sur l'axe longitudinal du véhicule sur des pentes non-nulles et F_{res} est la somme des forces *dissipatives* s'opposant au mouvement du véhicule. Ces forces sont respectivement associées avec l'énergie cinétique, l'énergie potentielle, et l'énergie nécessaire pour faire avancer le véhicule. La puissance associée à chacune des forces peut être calculée comme le produit de celle-ci avec la vitesse du véhicule, dans les unités adéquates. La Figure 1.2 représente les différentes forces subies par le véhicule.

$$F_{veh} = F_{gmp} - F_{frein} = F_{accl} + F_{pente} + F_{res} \quad (1.1)$$

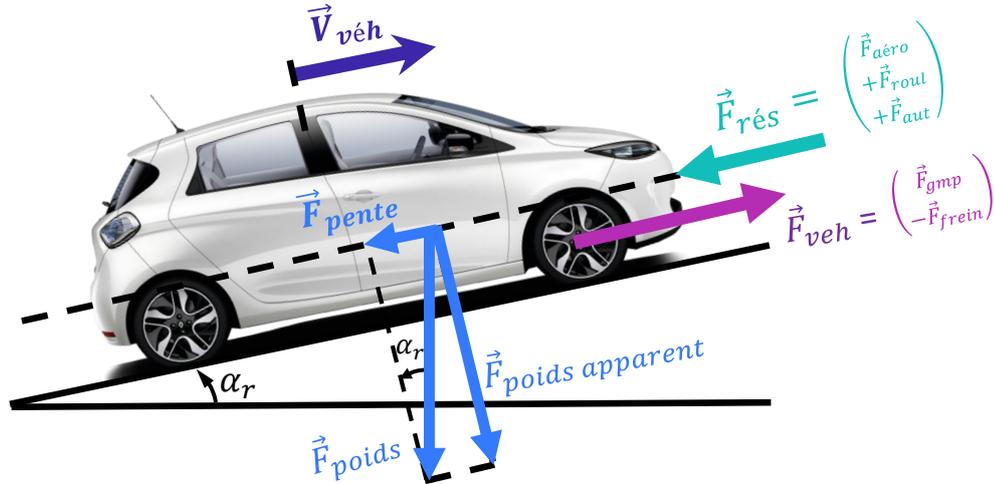


FIG. 1.2 – Bilan des forces du véhicule

Les efforts F_{accl} , F_{pente} et F_{res} peuvent être calculés à partir de (1.2)-(1.4), où M_{veh} est la masse du véhicule, $g = 9.81 [m/s^2]$ est l'accélération de la pesanteur, α_r est la pente de la route (en radians), c_r est le coefficient de résistance au roulement en fonction de la vitesse du véhicule, SCx et le coefficient de résistance à la pénétration dans l'air du véhicule, résultant du produit de la surface frontale du véhicule par le coefficient de traînée aérodynamique, V_{air} est la composante de la vitesse de l'air orientée dans la direction d'avancement du véhicule, $\rho_{air} = 1.225 [kg/m^3]$ est la densité de l'air et F_{aut} est un terme englobant les pertes dues à d'autres phénomènes comme le léchage des freins¹. Finalement, M_{veh}^{eq} est la *masse équivalente* du véhicule, qui intègre l'inertie des parties rotatives associées à la motorisation.

$$F_{accl} = M_{veh}^{eq} \frac{dV_{veh}}{dt} = M_{veh}^{eq} a_{veh} \quad (1.2)$$

$$F_{pente} = F_{poids} \sin \alpha_r = M_{veh} g \sin \alpha_r \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} F_{res} &= F_{roul} + F_{aero} + F_{aut} \quad (1.4) \\ &= [c_r (V_{veh}) M_{veh} g \cos \alpha_r] + \left[\frac{1}{2} SCx \rho_{air} (V_{veh} - V_{air})^2 \right] + F_{aut} \end{aligned}$$

1.1.1.2 Motorisation

Tel qu'il a été expliqué, la motorisation est l'association de l'onduleur, la ME et le réducteur de vitesse (Figure 1.1). Sa fonction est de convertir l'énergie électrique en provenance de la batterie en énergie mécanique vers les roues, et vice-versa. Pour nos études, nous utilisons un modèle des pertes dans la motorisation, en fonction du couple *efficace*² de la machine électrique T_{me} , de sa vitesse de rotation ω_{me} , et de la tension en entrée de l'onduleur, correspondant à la tension à la sortie de la batterie U_{bat} .

1. Le véhicule considéré n'a pas d'embrayage ; si c'était le cas, il aurait fallu aussi considéré le phénomène de léchage de cette organe.

2. Le couple *efficace* d'une ME, est analogue à celui d'un moteur thermique (voir par exemple [48]) ; il s'agit d'une *vue de l'esprit* qui tient compte des pertes mécaniques dans la transmission et dans la ME. C'est le couple

En supposant que les freins ne sont pas actionnés, la relation entre les variables du côté du véhicule, F_{veh} et V_{veh} , et celles de la machine, T_{me} et ω_{me} , sont données par (1.5) et (1.6), où R_{roue} est le rayon des roues et r_{trms} le rapport de transformation (incluant le pont différentiel). Grâce à l'utilisation du couple efficace de la ME, on peut considérer un modèle de transmission « sans pertes, » celles-ci étant prises en compte ailleurs.

$$T_{me} = \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} \cdot F_{veh} \quad (1.5)$$

$$\omega_{me} = \frac{r_{trsm}}{R_{roue}} \cdot V_{veh} \quad (1.6)$$

La masse équivalente du véhicule, qui tient compte de l'inertie de chaque roue J_{roue} , des arbres primaire J_{prim} , et secondaire J_{sec} , et de l'inertie de la machine électrique J_{me} , est donnée par (1.7).

$$M_{veh}^{eq} = M_{veh} + M_{rot}^{eq} = M_{veh} + \frac{1}{R_{roue}^2} [4J_{whl} + J_{prim} + r_{trms}^2 (J_{sec} + J_{me})] \quad (1.7)$$

Pour calculer les pertes totales associées à la motorisation P_{mot}^{prt} , nous utilisons une cartographie en fonction de T_{me} , ω_{me} et U_{bat} . Les pertes dans la motorisation dépendent de la tension de la batterie car le rendement de l'onduleur varie selon la tension d'entrée, à cause des pertes par commutation [82]. La considération de U_{bat} nous permet de tenir compte de l'effet sur le rendement de la motorisation de l'état de charge de la batterie SoC, et de la chute ou montée de tension batterie dues à la sollicitation de puissance. L'équation (1.8) permet de calculer la puissance totale à l'entrée de la motorisation P_{mot} , et (1.9) présente le calcul de P_{mot}^{prt} .

$$P_{mot} = P_{gmp} + P_{mot}^{prt} = \omega_{me} T_{me} + P_{mot}^{prt} \quad (1.8)$$

$$P_{mot}^{prt} = f(\omega_{me}, T_{me}, U_{bat}) \quad (1.9)$$

Les limites de couple de la motorisation dépendent de ω_{me} et U_{bat} , selon il est montré sur (1.10).

$$\check{T}_{me}(\omega_{me}, U_{bat}) \leq T_{me} \leq \hat{T}_{me}(\omega_{me}, U_{bat}) \quad (1.10)$$

La Figure 1.3 présente les pertes dans la motorisation, P_{mot}^{prt} , en fonction de ω_{me} , T_{me} , pour deux valeurs de U_{bat} , notamment $U_{bat} = 270V$ et $U_{bat} = 360V$. Étant donné qu'il s'agit de données industrielles, qui sont confidentielles, dans toutes nos figures nous allons utiliser des unités normalisées à 1 ; pour que les comparaisons soient justes, la référence de normalisation est la même pour les deux valeurs de U_{bat} ³. Nous pouvons constater que les distributions de pertes varient en fonction de la tension en entrée de l'onduleur. En outre, à partir d'une certaine vitesse de la ME, les limites de couple sont

que la machine électrique devrait fournir, en entrée du réducteur, s'il n'y avait pas de pertes mécaniques. Le couple efficace est donné par $T_{me} = T_{me}^i - T_{trms-me}^{prt}$, où T_{me}^i est le couple *indiqué* de la machine électrique, c'est-à-dire le couple de nature électrique produit par la machine et $T_{trms-me}^{prt}$ représente les pertes mécaniques dans la ME et la transmission.

inférieures lorsque U_{bat} est plus petite; cela est dû à une réduction du flux magnétique maximale pouvant agir sur la ME, associée à la diminution de la tension en entrée.

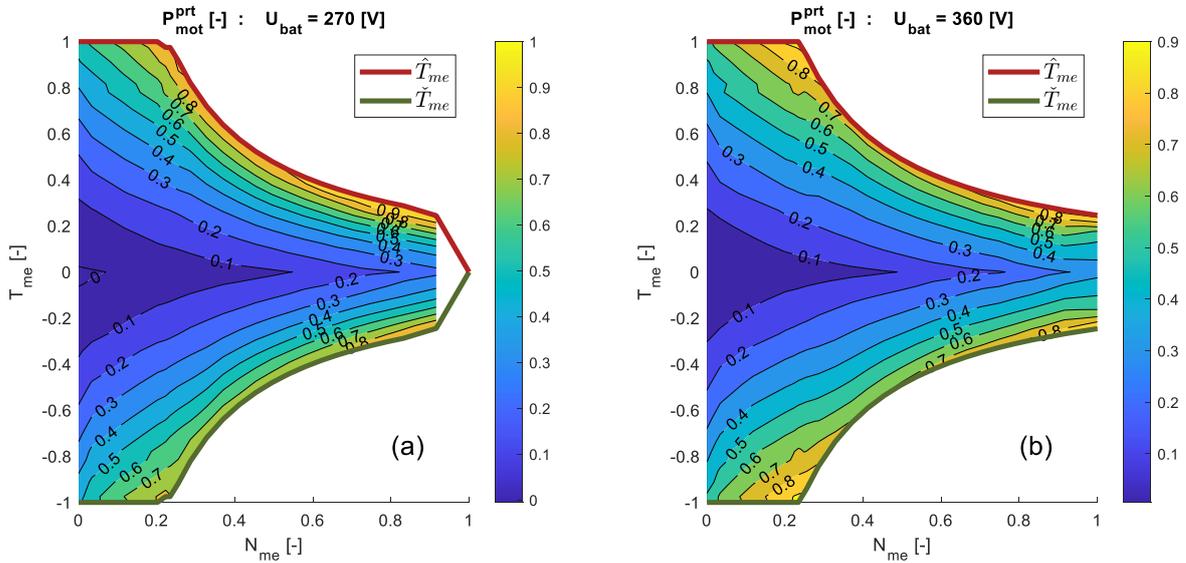


FIG. 1.3 – Cartographie des pertes dans la motorisation, P_{mot}^{prt} , en fonction de ω_{me} , T_{me} et U_{bat} ; (a) données pour $U_{bat} = 270V$, (b) données pour $U_{bat} = 360V$. Toutes les unités ont été normalisées, avec une référence commune entre les deux figures.

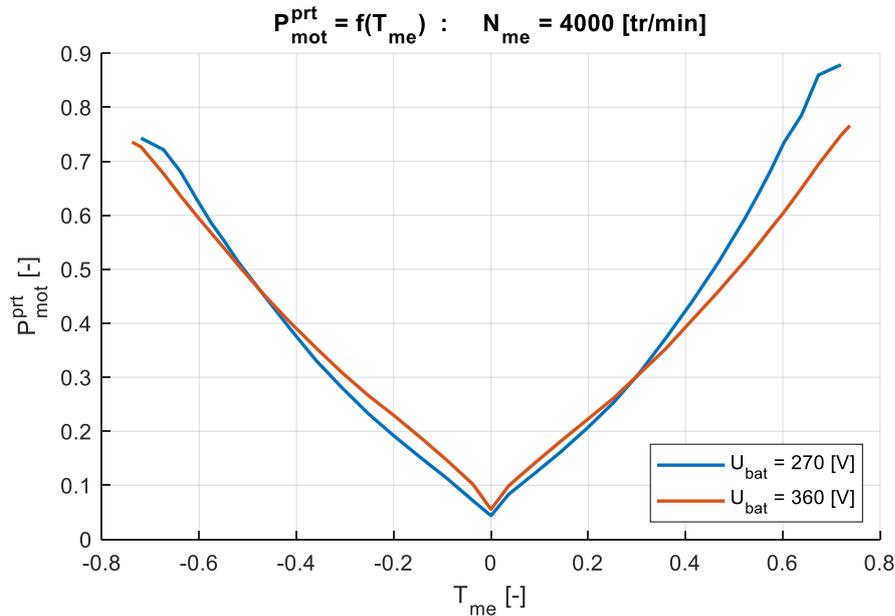


FIG. 1.4 – Comparaison des pertes dans la motorisation pour deux valeurs de tension batterie : $U_{bat} = 270V$ et $U_{bat} = 360V$. Toutes les unités ont été normalisées, avec une référence commune entre les deux figures.

Sur la Figure 1.3, il est difficile de comparer les pertes à différentes valeurs de U_{bat}). Sur la Figure 1.4, nous comparons P_{mot}^{prt} en fonction de T_{me} , pour une valeur fixe du régime de la ME, notamment $\omega_{me} = 418.8[rad/s]$ (ou $N_{me} = 4000[tr/min]$), associée à une

3. Ces références correspondent aux valeurs maximale et minimale, pour chaque grandeur, dans tous les cas considérés. Par exemple, dans le cas de P_{mot}^{prt} , cela correspond aux valeurs maximale et minimale, pour les deux valeurs de U_{bat} considérées.

vitesse intermédiaire. Pour des faibles valeurs de T_{me} , les pertes sont plus importantes lorsque U_{bat} est plus grand ; en revanche, pour des niveaux de couple plus importants, les pertes sont inférieures quand la tension batterie augmente. Cela peut s'expliquer par la nature des pertes : les *pertes par commutation* augmentent avec la tension de U_{bat} , et les *pertes résistives* le font lorsque T_{me} augmente ; pour une valeur fixe de U_{bat} , les pertes par commutation restent relativement constantes, alors que les résistives augmentent en fonction de la sollicitation en couple. De ce fait, à faible couple les pertes par commutation sont prépondérantes, alors que ce sont les pertes par effet Joule qui prédominent quand la sollicitation en couple augmente, et donc le courant demandé.

* * *

Les Figures 1.3 et 1.4 mettent en évidence la variation des limites de couple en fonction de ω_{me} et U_{bat} . En vue de cela, si on gardait une *densité des valeurs de référence* constante dans la cartographie, alors pour certains points de fonctionnement (ω_{me}, U_{bat}) , à peine quelques valeurs de couple seraient considérées. Ainsi, afin de maximiser le nombre de points dans les cartographies associées au couple, tout en gardant leur forme matricielle *rectangulaires* (ayant potentiellement plus de 2 dimensions), on introduit la notion de *couple normalisé*⁴. Ainsi, au lieu d'exprimer le couple en Nm , il est possible de l'exprimer comme une quantité adimensionnelle, T_{me}^{nrm} , tel que définie par (1.11). La définition a été choisie de sorte que $-1 \leq T_{me}^{nrm} \leq 1$.

$$T_{me}^{nrm}(T_{me}) = \left(\frac{2}{\hat{T}_{me} - \check{T}_{me}} \right) T_{me} - \left(\frac{\hat{T}_{me} + \check{T}_{me}}{\hat{T}_{me} - \check{T}_{me}} \right) \quad (1.11)$$

Pour tenir compte de la dépendance entre la capacité de la ME à fournir du couple et son régime, ainsi qu'avec la tension d'entrée de l'onduleur, l'astuce utilisée est d'avoir une fonction qui associe les couples maximum et minimum à ω_{me} et U_{bat}). Cela est représenté par (1.12).

$$-1 \leq \check{T}_{me}^{nrm}(\omega_{me}, U_{bat}) \leq T_{me}^{nrm} \leq \hat{T}_{me}^{nrm}(\omega_{me}, U_{bat}) \leq 1 \quad (1.12)$$

1.1.1.3 Batterie

La batterie de traction est le principal réservoir d'énergie d'un VE. Celle-ci est constituée par une combinaison d'*accumulateurs*, ou *cellules*. Les accumulateurs sont de nature réversible et permettent de stocker de l'énergie sous forme de potentiel électrochimique, grâce au transport d'espèces chimiques chargées entre les électrodes [116, 142]. Dans le cas des batteries Li-ion, les charges sont transportées par des ions de lithium, Li^+ , d'où leur nom. Pendant la décharge, les Li^+ se désinsèrent de l'électrode positive, traversent l'électrolyte et le séparateur, et s'insèrent dans l'électrode positive ; pendant la charge, les Li^+ se déplacent dans le sens inverse [116]. Dans chacune des électrodes, des réactions

4. Il est nécessaire de faire la distinction entre cette normalisation qui permet d'optimiser le stockage d'information associée aux pertes, de la normalisation d'unités présentées sur les figures. Cette dernière, n'a pas d'intérêt autre que protéger des informations confidentielles.

d'oxydoréduction ont lieu. Le déplacement des Li^+ est compensé par le passage d'électrons dans un circuit électrique extérieur.

Un paramètre important, associé à la proportion de Li^+ entre les deux électrodes est l'état de charge ou *SoC*⁵. Il s'agit du rapport de la charge disponible, Q_{bat} , sur la capacité maximale de la batterie⁶, \hat{Q}_{bat} [116]. Quand la batterie est pleinement chargée, le *SoC* vaut 100% et quand elle est complètement déchargée, le *SoC* vaut 0%. L'équation (1.13) permet de calculer la valeur de *SoC* [142]. Nous considérons, par convention, un courant positif lorsque la batterie est déchargée.

$$SoC(t) = \frac{Q_{bat}(t)}{\hat{Q}_{bat}} = SoC(t_0) - \frac{1}{\hat{Q}_{bat}} \int_{t_0}^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (1.13)$$

Les différents phénomènes au sein d'un accumulateur induisent des pertes d'énergie ; ceux-ci peuvent être de diverses natures et avoir lieu à des échelles temporelles et spatiales variées [69, 116]. Quelques sources de pertes sont : les rendements dans les réactions chimiques, la viscosité de l'électrolyte lors du transport d'ions, des pertes ohmiques lorsque les électrons traversent les électrodes, etc. Pour nos études, l'ensemble des pertes sera représenté en utilisant un modèle à résistance interne, tel que présenté sur [81]. Cela revient à faire l'hypothèse que l'ensemble des pertes peut être représentées de manière analogue à l'effet Joule. Ainsi, la batterie sera modélisée par un circuit électrique, composée par une tension à vide, *OCV*⁷, et une résistance en série, R_{bat} . R_{bat} représente simultanément la chute de tension ayant lieu quand la batterie est déchargée (où le saut de tension, s'il s'agit d'une décharge) et les pertes. Ce modèle néglige donc la *dynamique rapide* de la batterie. La Figure 1.5 représente le modèle utilisé.

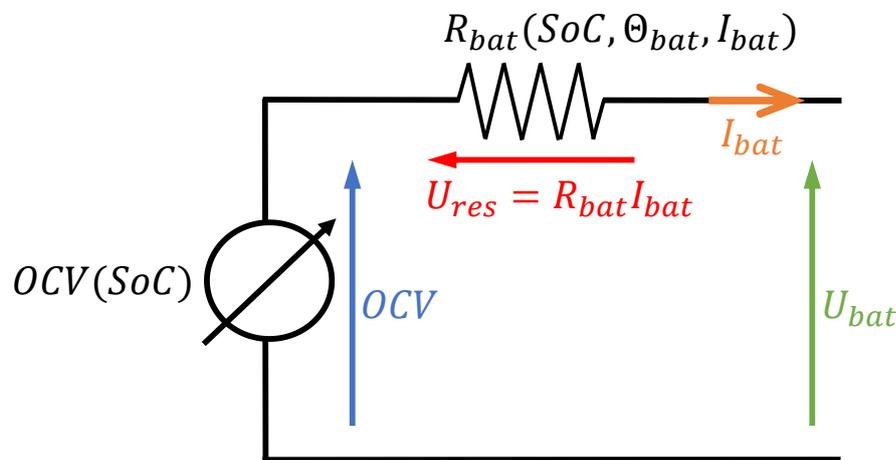


FIG. 1.5 – Modèle de batterie à résistance interne.

Pour un courant batterie donné I_{bat} , la tension de la batterie U_{bat} est donnée par (1.14), où Θ_{bat} est la température de la batterie ou, plus précisément, la température d'une cellule

5. De l'anglais *State of Charge*, que l'on peut traduire par « État de Charge. »

6. Pour des applications industrielles, on peut considérer deux types de *SoC* : le *SoC batterie*, SoC_b , qui est le ratio entre la charge actuelle et la charge maximale de la batterie, et le *SoC utilisateur*, SoC_u , correspondant au ratio entre la charge actuelle et la capacité exploitable par l'utilisateur, selon le choix du fabricant du produit. Nous considérerons ici le SoC_b .

7. De l'anglais *Open Circuit Voltage*, que l'on peut traduire par « Tension en Circuit Ouvert. »

qui, à condition d'avoir une bonne gestion de la thermique batterie, devrait être relativement uniforme et représentative de l'ensemble des cellules du pack [52, 51].

$$U_{bat} = OCV(SoC) - R_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, I_{bat}) \cdot I_{bat} \quad (1.14)$$

Tel qu'il a été dit précédemment, une batterie est une association de *cellules*. La mise en série d'un nombre important de cellules permet d'augmenter la tension de la batterie, ce qui contribue à diminuer les pertes Joule du système. La mise en parallèle des cellules permet d'additionner leur capacités [142]. En supposant que les cellules soient équilibrées, les équations (1.15) et (1.16) permettent de calculer les valeurs globales de OCV et R_{bat} , de l'ensemble du *pack batterie*, pour une configuration avec N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle.

$$OCV(SoC) = N_s OCV_{cell}(SoC) \quad (1.15)$$

$$R_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, I_{bat}) = \frac{N_s}{N_p} R_{cell}(SoC, \Theta_{bat}, I_{bat}) \quad (1.16)$$

Les pertes d'énergie ne sont pas identiques en charge et en décharge; la variation de U_{bat} ne l'est, non plus. Pour tenir compte de ce phénomène, (1.17) introduit les notions de résistance de charge, R_{cell}^{chg} et de décharge, R_{cell}^{dchg} .

$$R_{cell}(SoC, \Theta_{bat}, I_{bat}) = \begin{cases} R_{cell}^{dchg}(SoC, \Theta_{bat}) & , I_{bat} \geq 0 \\ R_{cell}^{chg}(SoC, \Theta_{bat}) & , I_{bat} < 0 \end{cases} \quad (1.17)$$

La tension à vide varie en fonction de l'état de charge de la batterie, comme montré sur la Figure 1.6. Étant donnée l'hypothèse d'équilibrage des cellules, parler de SoC batterie ou de SoC cellule est équivalent.

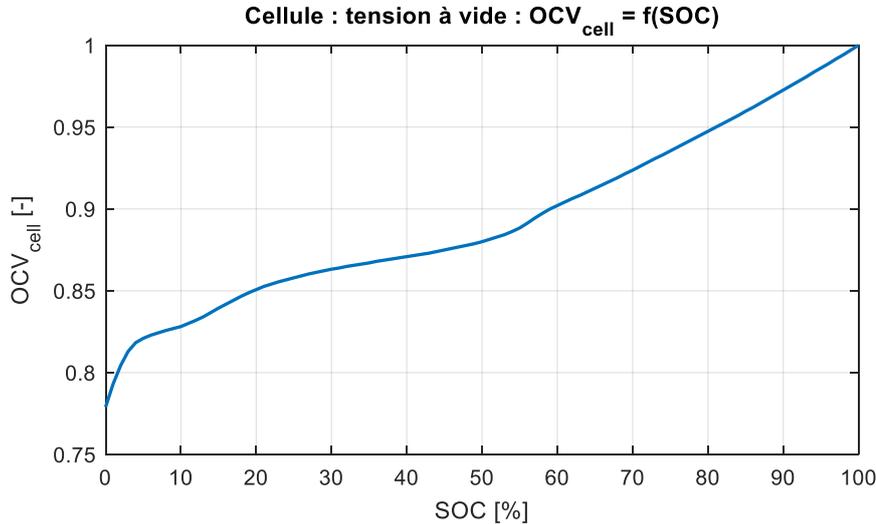


FIG. 1.6 – Cartographie de tension de la cellule, OCV_{cell} en fonction du SoC . Les valeurs de OCV_{cell} ont été normalisées à 1.

La Figure 1.7 présente des valeurs de R_{cell}^{chg} et R_{cell}^{dchg} , normalisées sur une base commune, en fonction de l'état de charge et de la température batterie.

* * *

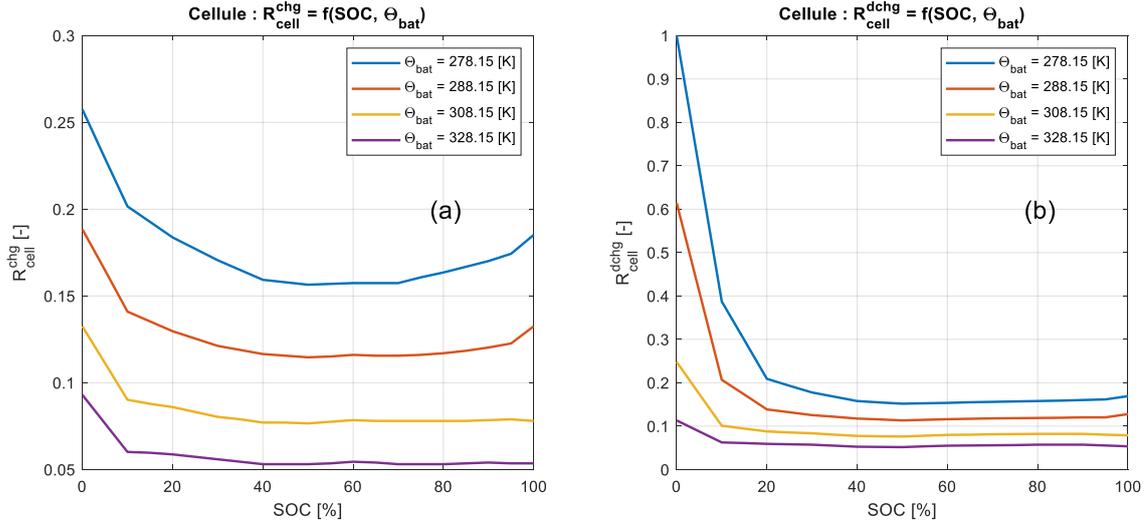


FIG. 1.7 – Cartographies des résistances de charge R_{cell}^{chg} , et de décharge R_{cell}^{dchg} , d'une cellule en fonction du SoC et de la température de la batterie, Θ_{bat} . (a) résistance de charge d'une cellule, R_{cell}^{chg} ; (b) résistance de décharge d'une cellule, R_{cell}^{dchg} . Les valeurs de R_{cell}^{chg} et R_{cell}^{dchg} ont été normalisées à 1, sur une base commune.

Tel que montré par la Figure 1.1, la batterie fournit de la puissance à la motorisation et aux auxiliaires électriques, y compris la climatisation. La puissance totale délivrée par la batterie sera dénotée P_{elec} , et elle est donnée par (1.18), où P_{aux} correspond à la consommation des auxiliaires électriques.

$$P_{elec} = P_{mot} + P_{aux} \quad (1.18)$$

Comme vu précédemment, en charge comme en décharge, une part de l'énergie entrant ou sortant de la batterie est perdue à cause des phénomènes chimiques, électriques et mécaniques. Nous noterons cette perte de puissance P_{bat}^{prt} . Cela nous permettra de définir la *puissance indiquée* de la batterie, P_{bat} , qui correspond à la variation de la quantité d'énergie chimique stockée dans la batterie, pouvant être calculée grâce à (1.19). Les pertes dans la batterie, analogues à de l'effet Joule, sont données par (1.20) et le courant batterie, nécessaire au calcul, par (1.21).

$$P_{bat} = P_{elec} + P_{bat}^{prt} = P_{mot} + P_{aux} + P_{bat}^{prt} \quad (1.19)$$

$$P_{bat}^{prt}(SoC, \Theta_{bat}, I_{bat}) = R_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, I_{bat}) I_{bat}^2 \quad (1.20)$$

$$I_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, P_{elec}) = \frac{OCV - \sqrt{OCV^2 - 4 P_{elec} \cdot R_{bat}}}{2R_{bat}} \quad (1.21)$$

1.1.1.4 Modèle global du système

Grâce aux équations présentées dans cette section, nous pouvons exprimer la variation de l'énergie chimique stockée dans la batterie, en termes des différents phénomènes physiques ayant lieu dans le VEB, tel que présenté sur (1.22). Comme nous pouvons le voir, lors de la traction du véhicule, la puissance de la batterie peut se traduire par une variation des énergies cinétique (P_{accl}) ou potentielle (P_{pente}) du véhicule, être utilisée pour alimenter

les auxiliaires électriques (P_{aux}), ou être dissipée comme des pertes dues à l'avancement du véhicule (P_{veh}^{prt}), ou dans la motorisation (P_{mot}^{prt}) ou la batterie (P_{bat}^{prt}). La variable P_{veh}^{prt} est équivalente à P_{res} et peut être calculée comme $P_{veh}^{prt} = F_{res} V_{veh}$.

$$P_{bat} = P_{accl} + P_{pente} + P_{veh}^{prt} + P_{mot}^{prt} + P_{bat}^{prt} + P_{aux} + P_{frein} \quad (1.22)$$

Une version simplifiée de l'architecture globale du modèle du VEB est présentée sur la Figure 1.8. Cette représentation met en évidence les différents endroits où l'énergie peut aller (représentés par des flèches creuses), ainsi que les pertes ayant lieu lors de ces transformations (représentée par des flèches rouges courbées); bien que simplifiée, cette représentation permet d'associer les phénomènes énergétiques aux différents organes impliqués.

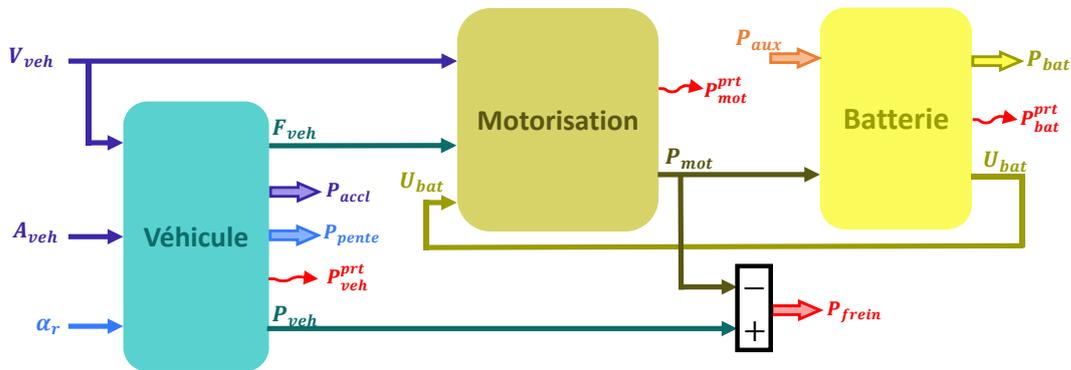


FIG. 1.8 – Architecture globale d'un VEB.

1.1.2 Modèle analytique de la consommation

Les modèles que nous venons de présenter permettent de représenter avec un bon degré de fidélité les transformations énergétiques ayant lieu dans un VEB, ainsi que la consommation d'énergie résultante. En revanche, ces modèles peuvent être lourds en temps de calcul et difficiles à manipuler de façon analytique; de ce fait, lorsque nous voudrions formuler l'écoconduite comme un problème d'optimisation, il sera utile d'avoir de modèles simplifiés, analytiques, afin de faciliter la modélisation et réduire la durée des calculs. Ainsi, dans cette section nous présenterons des modèles analytiques, adaptés pour la modélisation énergétique des manœuvres de conduite, tout en expliquant comment les paramétrer à partir des données empiriques des modèles physiques.

1.1.2.1 Véhicule

Dans le milieu industriel il est d'usage de modéliser la résistance à l'avancement d'un véhicule en utilisant une *loi de route*. Il s'agit d'une fonction analytique permettant d'estimer la force que le véhicule doit vaincre pour avancer à vitesse constante, sur du plat, en fonction de ladite vitesse. On utilise souvent des fonctions polynômiales de deuxième ordre [223, 195]. Nous utiliserons comme loi de route la fonction présentée sur (1.23),

où \tilde{F}_{res} est l'estimation analytique de la résistance à l'avancement, et b_0 , b_1 et b_2 sont les paramètres du modèle.

$$\tilde{F}_{res} = b_2 V_{veh}^2 + b_1 V_{veh} + b_0 \quad (1.23)$$

Les paramètres d'une loi de route peuvent être déterminés à partir d'un enregistrement de la décélération naturelle du véhicule sur route plate; il s'agit d'une pratique assez classique dans le milieu industriel. En revanche, nous nous intéressons ici à obtenir ces paramètres à partir d'un modèle pré-existant, qui est donné sur (1.4). Nous supposons ici de la conduite sur une route plate ($\alpha_r = 0$) et négligerons l'effet de la vitesse de l'air ($V_{air} = 0$). Sur ce modèle, la dépendance de F_{res} à V_{veh} est due au terme en V_{veh} carré et à la cartographie du coefficient de roulement $c_r(V_{veh})$; étant donné que la valeur de SCx ne dépend pas de la vitesse, c'est notre connaissance des valeurs de c_r qui limite notre connaissance de F_{res} . Ainsi, nous considérerons pour notre problème d'identification les valeurs de vitesse \underline{V}_{veh}^{pr} , correspondant au points de référence de la cartographie $c_r(V_{veh})$. Pour ces valeurs, nous calculerons les valeurs de résistance au roulement associées, \underline{F}_{res}^{pr} , avec $\underline{V}_{veh}^{pr}, \underline{F}_{res}^{pr} \in \mathbb{R}^m$.

En faisant l'hypothèse que notre modèle de route représente *parfaitement* la cinétique du véhicule, nous pouvons assimiler les écarts entre \underline{F}_{res}^{pr} et les estimations faites à partir de (1.23), $\tilde{\underline{F}}_{res}^{pr}$, à du bruit de mesure \underline{v} . Cela est montré sur (1.24), où $\underline{x}_k = \left[(V_{veh}^k)^2, V_{veh}^k, 1 \right]^T$ et $\underline{\theta}_{lr} = [b_2, b_1, b_0]^T$, pour un quelconque point de référence de la cartographie, k .

$$F_{res}^k = \tilde{F}_{res}^k + v_k = \underline{x}_k^T \underline{\theta}_{lr} + v_k \quad (1.24)$$

On peut faire le calcul pour l'ensemble des points \underline{V}_{veh}^{pr} en utilisant (1.25), avec $X_{pr} = [\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_m]^T$.

$$\underline{F}_{res}^{pr} = X_{pr} \underline{\theta}_{lr} + \underline{v} \quad (1.25)$$

En supposant que le bruit est de nature gaussienne, alors trouver le modèle maximisant la ressemblance⁸ avec les données revient à minimiser la valeur de $\|\underline{v}\|_2$, et peut être fait grâce à la résolution d'un problème des moindres carrés. La solution à ce problème est donnée par (1.26).

$$\underline{\theta}_{lr}^* = \left(X_{pr}^T \cdot X_{pr} \right)^{-1} \cdot X_{pr}^T \cdot \underline{F}_{res}^{pr} \quad (1.26)$$

La Figure 1.9 présente les résultats de l'identification de la loi de route. Nous constatons que le modèle (1.23) permet de représenter pertinemment la résistance à l'avancement du véhicule.

1.1.2.2 Motorisation

Pour représenter les pertes dans la motorisation, nous avons choisi d'utiliser un modèle quadratique, en fonction de ω_{me} et T_{me} , tel que présenté sur (1.27). Il peut être vue comme une simplification du modèle présenté sur [195]. Nous ferons ici l'hypothèse que

8. Plus exactement la *log-ressemblance*

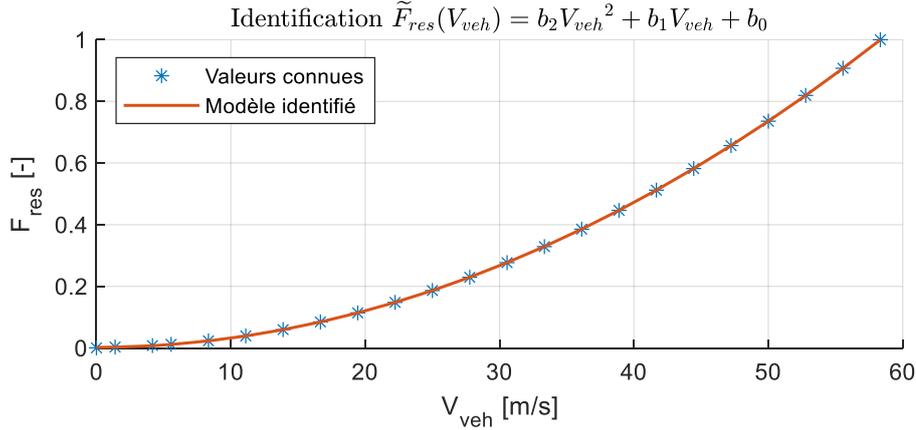


FIG. 1.9 – Identification de la loi de route $\tilde{F}_{res} = f(V_{veh})$. Les valeurs de F_{res} et \tilde{F}_{res} ont été normalisées à 1, avec une base commune.

les pertes dans la motorisation sont constantes par rapport à U_{bat} , ce qui est compatible avec le fait que, dans nos données, les variations de ω_{me} et T_{me} ont un effet bien plus important sur les pertes que celles de U_{bat} (cf. figures de la section III.1.1.1.2).

$$\tilde{P}_{mot}^{prt}(\underline{\mathbf{z}}) = \underline{\mathbf{z}}^T P_{prt} \underline{\mathbf{z}} + \underline{\mathbf{q}}^T \underline{\mathbf{z}} + r, \quad (1.27)$$

Avec : $\underline{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \omega_{me} \\ T_{me} \end{bmatrix}$, $P_{prt} = \begin{bmatrix} p_{1,1}^{prt} & p_{1,2}^{prt} \\ p_{2,1}^{prt} & p_{2,2}^{prt} \end{bmatrix}$, $\underline{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$

Les pertes dans la motorisation seront donc calculées à partir de sept paramètres. Cette équation peut être aussi exprimée par (1.28).

$$\tilde{P}_{mot}^{prt}(\omega_{me}, T_{me}) = p_{1,1}^{prt} \omega_{me}^2 + (p_{1,2}^{prt} + p_{2,1}^{prt}) \omega_{me} T_{me} + p_{2,2}^{prt} T_{me}^2 + q_1 \omega_{me} + q_2 T_{me} + r \quad (1.28)$$

De manière analogue à ce qui a été présenté sur (1.8), la puissance demandée (ou fournie) par la motorisation, \tilde{P}_{mot} , peut être calculée comme suit :

$$\tilde{P}_{mot} = P_{gmp} + \tilde{P}_{mot}^{prt} = \omega_{me} T_{me} + \tilde{P}_{mot}^{prt} \quad (1.29)$$

Cela veut donc dire que \tilde{P}_{mot} peut être retrouvé en appliquant l'équation (1.30), où $p_{1,1} = p_{1,1}^{prt}$; $p_{1,2} = (p_{1,2}^{prt} + 1/2)$; $p_{2,1} = (p_{2,1}^{prt} + 1/2)$ et $p_{2,2} = p_{2,2}^{prt}$. Une nouvelle matrice P peut être définie à partir de ces valeurs, afin d'obtenir une formulation vectorielle similaire à celle de (1.27).

$$\tilde{P}_{mot}(\omega_{me}, T_{me}) = p_{1,1} \omega_{me}^2 + (p_{1,2} + p_{2,1}) \omega_{me} T_{me} + p_{2,2} T_{me}^2 + q_1 \omega_{me} + q_2 T_{me} + r \quad (1.30)$$

Afin de renforcer la convexité de \tilde{P}_{mot} , ce qui peut simplifier la résolution de problèmes d'optimisation, on peut imposer la condition $p_{1,2} = p_{2,1}$, ce qui garantit que $P \in \mathcal{S}^2$.

* * *

Pour l'identification des paramètres de la motorisation, nous utiliserons une approche similaire à celle pour les paramètres du véhicule. Même s'il est possible d'identifier directement un modèle sous la forme (1.30), on privilégiera l'identification du modèle des

pertes ; en effet, la présence du terme $\omega_{me} \cdot T_{me}$ pourrait se traduire par une perte de sensibilité de l'algorithme d'identification aux pertes de la motorisation.

A la différence de \tilde{F}_{res} , \tilde{P}_{mot}^{prt} dépend de deux paramètres ω_{me} et T_{me} . Nous considérerons pour l'identification n_ω valeurs de régime de la machine, que nous noterons $\omega_{me}^{(i)}$, avec $i = 1, \dots, n_\omega$; de même, n_T valeurs de couple seront considérées, $T_{me}^{(j)}$, avec $j = 1, \dots, n_T$. De plus, nous considérerons toutes les m combinaisons possibles des régimes et des couples, avec $m = n_\omega \cdot n_T$. Pour tenir compte de cela, nous introduirons l'indice $k = (j - 1) n_\omega + i$, ce qui veut dire que $k \in \{1, \dots, m\}$. L'équation présente le calcul de \tilde{P}_{mot}^{prt} pour la k -ième combinaison de ω_{me} et T_{me} , en fonction d'un jeu de paramètres du modèle, $\underline{\theta}_{mot}$.

$$\tilde{P}_{mot}^{prt(k)} = (\mathbf{x}_k^{mot})^T \underline{\theta}_{mot} = \begin{bmatrix} \omega_{me}^{(i)2} & \omega_{me}^{(i)} T_{me}^{(j)} & T_{me}^{(j)2} & \omega_{me}^{(i)} & T_{me}^{(j)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1,1}^{prt} \\ (p_{1,2}^{prt} + p_{2,1}^{prt}) \\ p_{2,2}^{prt} \\ q_1 \\ q_2 \\ r \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

Nous supposons que les écarts \underline{v}_{mot} entre les modèles physique et empirique peuvent être calculés grâce à (1.32), où $X_{mot} = [\mathbf{x}_1^{mot}, \mathbf{x}_2^{mot}, \dots, \mathbf{x}_m^{mot}]^T$.

$$\underline{\mathbf{P}}_{mot}^{pr} = \tilde{\underline{\mathbf{P}}}_{mot}^{pr} + \underline{v}_{mot} = X_{mot} \underline{\theta}_{mot} + \underline{v}_{mot} \quad (1.32)$$

Nous avons constaté empiriquement que le modèle proposé ne représente que de manière approximative les pertes dans la motorisation cartographiées. Si l'on essayait de représenter les pertes dans toute la plage de fonctionnement de la motorisation, l'erreur pourrait être assez importante à certains endroits de la cartographie. Ainsi, nous proposons deux astuces permettant de palier à ce problème : d'une part, nous considérerons uniquement une *zone d'opération* de la motorisation, qui sera choisie en fonction du scénario de conduite à étudier. Aussi, nous proposons d'introduire un mécanisme de pondération afin d'accorder plus d'importance à certains points de fonctionnement de la cartographie, selon les caractéristiques du scénario.

Pour la pondération de certains points de fonctionnement de la motorisation, on peut introduire une nouvelle fonction de coût $\underline{v}_{mot}^T W_{mot} \underline{v}_{mot}$, où $W_{mot} = \text{diag}(\underline{\Omega}^{mot})$, $\underline{\Omega}^{mot} \in \mathbb{R}^m$, est une matrice avec la pondération de chaque point de fonctionnement. Ainsi, le problème correspond à des moindres carrés pondérés, et peut être résolu par (1.33). Si l'on veut avoir une identification *classique*, il suffit d'avoir une matrice de pondération égale à l'identité, $W_{mot} = I$.

$$\underline{\theta}_{mot}^* = \left(X_{mot}^T \cdot W_{mot} \cdot X_{mot} \right)^{-1} \cdot X_{mot}^T \cdot W_{mot} \cdot \underline{\mathbf{P}}_{mot}^{pr} \quad (1.33)$$

Avant d'expliquer comment définir la pondération de la matrice, nous allons discuter du choix de la zone d'opération pour l'approximation. Nous considérerons un scénario où l'on souhaite atteindre une vitesse v_f , en partant d'une vitesse initiale v_0 . Aussi, afin de respecter l'agrément, l'accélération a_{ex} , supposée constante tout au long de la manœuvre,

doit rester confinée à $\check{a}_{veh} \leq a_{ex} \leq \hat{a}_{veh}$. Ainsi, les régimes initial et final de la ME, ω_{me}^0 et ω_{me}^f respectivement, seront :

$$\omega_{me}^0 = \frac{r_{trsm}}{R_{roue}} v_0 \quad \wedge \quad \omega_{me}^f = \frac{r_{trsm}}{R_{roue}} v_f \quad (1.34)$$

En supposant que les freins ne sont pas actionnés, le couple pendant la manœuvre est donné par :

$$T_{me} = \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} F_{veh} = \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} [F_{accl}(a_{ex}) + F_{pente}(\alpha_r) + F_{res}(V_{veh})] \quad (1.35)$$

Ainsi, si la pente est constante, les valeurs de couple de la ME seront bornées par les limites définies sur (1.36) et (1.37), où $\check{V}_{veh} = \min\{v_0, v_f\}$ et $\hat{V}_{veh} = \max\{v_0, v_f\}$.

$$\check{T}_{me}^{accl} = \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} [F_{accl}(\check{a}_{veh}) + F_{pente}(\alpha_r) + F_{res}(\check{V}_{veh})] \quad (1.36)$$

$$\hat{T}_{me}^{accl} = \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} [F_{accl}(\hat{a}_{veh}) + F_{pente}(\alpha_r) + F_{res}(\hat{V}_{veh})] \quad (1.37)$$

Nous savons donc que, pendant l'accélération, les points de fonctionnement de la ME doivent rester confinées à l'intérieur des *contraintes de boîte* données sur (1.38) et (1.39), où $\check{\omega}_{me} = \min\{\omega_{me}^0, \omega_{me}^f\}$ et $\hat{\omega}_{me} = \max\{\omega_{me}^0, \omega_{me}^f\}$.

$$\check{\omega}_{me} \leq \omega_{me} \leq \hat{\omega}_{me} \quad (1.38)$$

$$\check{T}_{me}^{accl} \leq T_{me} \leq \hat{T}_{me}^{accl} \quad (1.39)$$

De plus, on sait qu'au début et à la fin de la manœuvre la ME aura les points de fonctionnement suivants :

$$\begin{aligned} \text{Amont : } & \omega_{me}^0 \quad \wedge \quad T_{me}^0 = \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} [F_{pente}(\alpha_r) + F_{res}(V_0)] \\ \text{Fin : } & \omega_{me}^f \quad \wedge \quad T_{me}^f = \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} [F_{pente}(\alpha_r) + F_{res}(V_f)] \end{aligned} \quad (1.40)$$

Sur la Figure 1.10a nous affichons la zone de fonctionnement pendant l'accélération *stabilisée*, pour une manœuvre d'accélération ($V_0 < V_f$). Les points limites régime-couple pendant cette phase sont représentés par des diamants oranges et les points de fonctionnement en début et à la fin de la manœuvre, quand l'accélération est nulle, par des étoiles vertes.

Étant donné que dans nos études nous considérerons un modèle trapézoïdale de manœuvre (cf. Partie II), qui tient compte des phases transitoires, en réalité, les points de fonctionnement de la motorisation démarreront de l'étoile verte à gauche, puis *monteront* jusqu'au rectangle orange, où la phase stabilisée aura lieu, finalement, il *descendront* jusqu'à l'étoile verte à droite, où la manœuvre prendra fin⁹. Ainsi, si l'on veut renforcer la représentativité de l'estimation de pertes pendant les phases transitoires, il est nécessaire de tenir compte aussi des points intermédiaires entre la zone à accélération constante et le début et la fin de la manœuvre. Pour cela, nous proposons de considérer la zone entourée en bleu de la Figure 1.10a, définie dans le cas général par les équations (1.38) et (1.41).

9. Ceci dans le cas d'une manœuvre d'accélération ; pour une décélération, $\omega_{me}^0 > \omega_{me}^f$ et $T_{me}^0 > T_{me}^f$, ce qui est bien pris en compte dans les équations.

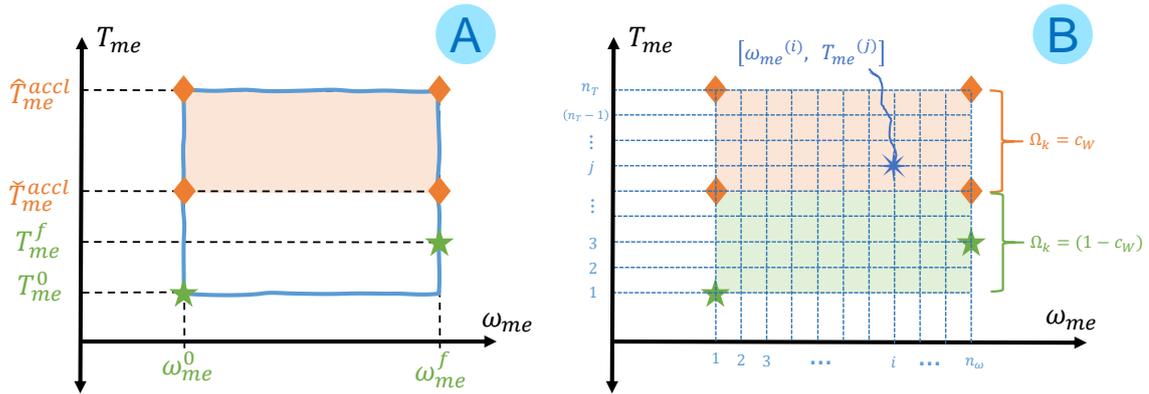


FIG. 1.10 – Zone de fonctionnement pour l'identification des pertes, \tilde{P}_{mot}^{prt} , dans la motorisation. (a) Points des fonctionnements limites du scénario ; (b) Grille de points pour l'identification, avec la pondération correspondante.

$$\min \left\{ \check{T}_{me}^{accl}, T_{me}^0, T_{me}^f \right\} \leq T_{me} \leq \max \left\{ \hat{T}_{me}^{accl}, T_{me}^0, T_{me}^f \right\} \quad (1.41)$$

Étant donné que, *a priori*, la plupart du temps associé à la manœuvre correspond à la phase stabilisée d'accélération, nous proposons de faire une pondération basée sur le découpage par zones présenté sur la Figure 1.10b, où la zone orange serait plutôt représentative des phases stabilisées et la zone verte le serait des phases transitoires. Cela se traduit par la définition du vecteur $\underline{\Omega}^{mot}$ donné par (1.42), où c_ω est un paramètre permettant d'ajuster la pondération entre les zones. Si l'on souhaite accorder plus d'importance aux phases stabilisées, alors $c_\omega \in [0.5, 1]$.

$$\Omega_k^{mot} = \begin{cases} c_\omega & , \check{T}_{me}^{accl} \leq T_{me}^{(j)} \leq \hat{T}_{me}^{accl} \\ (1 - c_\omega) & , T_{me}^{(j)} \notin [\check{T}_{me}^{accl}, \hat{T}_{me}^{accl}] \end{cases} \quad (1.42)$$

La Figure 1.11 montre les résultats de l'identification correspondant à une manœuvre d'accélération. Les paramètres du scénario utilisés sont : $V_0 = 90[km/h]$, $V_f = 110[km/h]$, $\check{a}_{veh} = 0.2825[m/s^2]$ et $\hat{a}_{veh} = 0.9035[m/s^2]$. Ces valeurs correspondent à une manœuvre d'accélération plausible en scénario extra-urbain. Les limites d'accélération sont issues de l'analyse des roulages réels, notamment des données issues de l'odométrie, en scénario extra-urbain (cf. section II.3.4.3) ; elles correspondent à la médiane de a_{ex} plus ou moins 1.5 fois sa DAM.

La Figure 1.11a présente la plage de fonctionnement du GMP utilisée pour l'identification, avec le découpage par zones pour la pondération. Pour l'identification, nous avons utilisé $c_\omega = 0.6$. La Figure 1.11b compare les pertes estimées, \tilde{P}_{mot}^{prt} , avec celles cartographiées, P_{mot}^{prt} . Nous constatons que les résultats de l'identification sont satisfaisants : en effet, l'amplitude maximale de l'erreur entre les deux modèles est à peine supérieure à 5%, la moyenne sur l'ensemble des points étant inférieure à 1%.

Vue la faible quantité de manœuvres de décélération pour des scénarios extra-urbains, nous allons considérer les résultats de l'identification pour un roulage en ville. La Figure 1.12 présente les résultats de l'identification d'un scénario de décélération. Les paramètres du scénario utilisés sont : $V_0 = 50[km/h]$, $V_f = 30[km/h]$, $\check{a}_{veh} = -1.5895[m/s^2]$ et $\hat{a}_{veh} =$

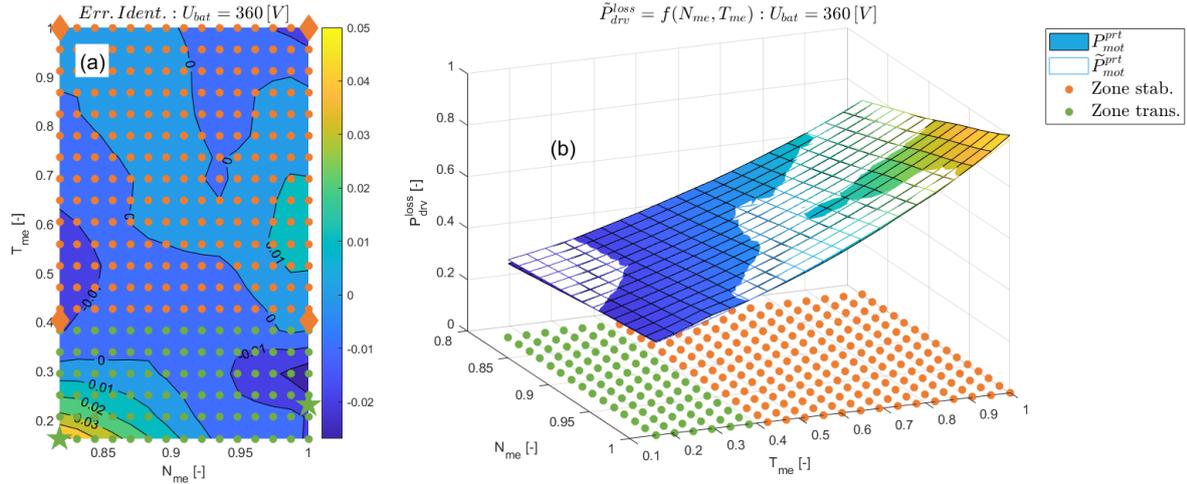


FIG. 1.11 – Identification du modèle analytique des pertes dans la motorisation, \tilde{P}_{mot}^{prt} , pour une manœuvre d'accélération. Les paramètres du scénario sont : $V_0 = 90$ [km/h], $V_f = 110$ [km/h], $\hat{a}_{veh} = 0.2825$ [m/s^2] et $\hat{a}_{veh} = 0.9035$ [m/s^2]. (a) Grille de points pour le scénario considéré, découpage en zones et erreur relative de l'identification ; (b) Comparaison du modèle identifié, \tilde{P}_{mot}^{prt} , avec la cartographie des pertes, P_{mot}^{prt} . Les variables ont été normalisées pour avoir une amplitude maximum égale à 1 (en gardant la valeur 0 inchangée).

–0.3325 [m/s^2]. Les limites d'accélération correspondent à la médiane de a_{ex} (issue de l'odométrie) plus ou moins 1.5 fois la DAM, pour les roulages urbains. Le paramètre de réglage c_ω a été maintenu à 0.6.

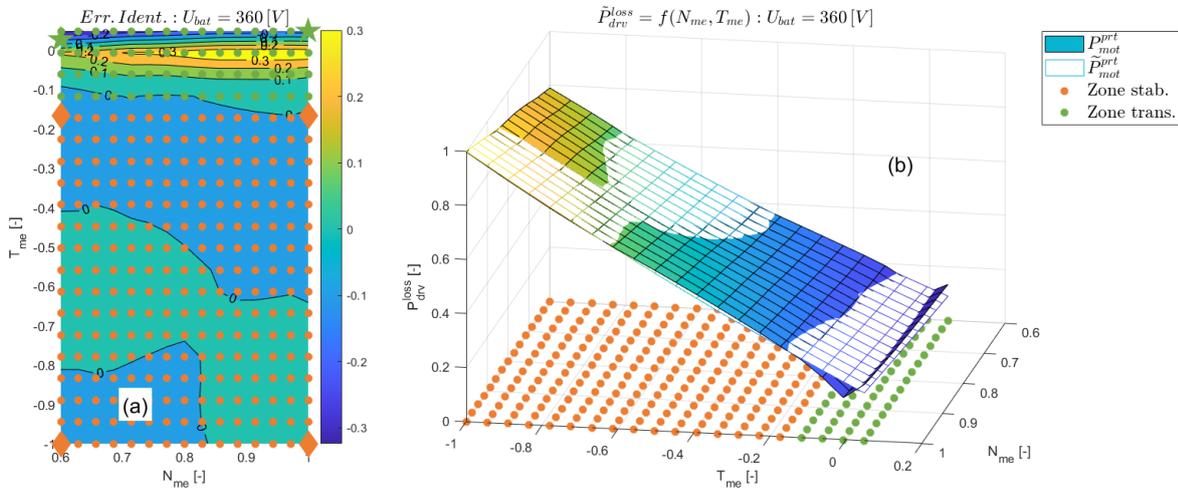


FIG. 1.12 – Identification du modèle analytique des pertes dans la motorisation, \tilde{P}_{mot}^{prt} , pour une manœuvre de décélération. Les paramètres du scénario sont : $V_0 = 50$ [km/h], $V_f = 30$ [km/h], $\hat{a}_{veh} = -1.5895$ [m/s^2] et $\hat{a}_{veh} = -0.3325$ [m/s^2]. (a) Grille de points pour le scénario considéré, découpage en zones et erreur relative de l'identification ; (b) Comparaison du modèle identifié, \tilde{P}_{mot}^{prt} , avec la cartographie des pertes, P_{mot}^{prt} . Les variables ont été normalisées pour avoir une amplitude maximum égale à 1 (en gardant le signe, inchangés).

On constate la présence de valeurs positives et négatives de couple. Cela est dû au fait qu'il est nécessaire d'appliquer un couple positif pour garder une vitesse constante, alors que la ME doit appliquer un couple négatif pour décélérer le véhicule au-delà de

sa décélération naturelle. De même, l'estimation des pertes présente des erreurs importantes au voisinage du couple nul, pouvant dépasser le 30%. Toutefois, l'identification est beaucoup plus adéquate sur le reste de la zone d'opération, permettant d'avoir une amplitude moyenne de l'erreur de 4.2937%. Il y a des raisons pour penser que l'estimation reste exploitable : d'une part, les zones à forte erreur correspondent à uniquement à une partie des phases transitoires et prennent *a priori* une faible proportion du temps de la manœuvre ; en outre, malgré les pourcentages d'erreur importants, la valeur absolue des écarts dans les pertes reste faible dans les zones concernées. De plus, lors de l'optimisation l'ensemble des manœuvres étudiées seraient affectées *plus ou moins* de la même manière par les imprécisions du modèle ; cela laisse penser que la *manœuvre optimale* basée sur \tilde{P}_{mot}^{prt} resterait au voisinage de celle obtenue en utilisant P_{mot}^{prt} .

1.1.2.3 Batterie

En principe, nous pouvons obtenir un modèle analytique de la batterie en utilisant des valeurs moyennes de R_{bat} et de OCV dans (1.20) et (1.21), selon les paramètres du scénario. En revanche, tel que nous le verrons par la suite, l'utilisation de ce modèle rendrait assez difficile l'obtention d'un modèle analytique du coût énergétique d'une manœuvre (supposant que cela soit possible).

Nous proposerons donc un modèle analytique mieux adapté à nos propos. Pour ce faire, nous considérerons une variable, notée \mathcal{P}_{bat} , assimilable au rendement de la batterie lors que celle-ci est chargée, et à l'inverse du rendement lors de sa décharge. Ainsi, on peut estimer la variation de l'énergie chimique stockée dans la batterie, \tilde{P}_{bat} , en utilisant (1.43).

$$\tilde{P}_{bat} = \mathcal{P}_{bat} P_{elec} \quad (1.43)$$

Nous ferons l'hypothèse que le rendement de la batterie décroît linéairement avec la valeur absolue de la puissance demandée/introduite à la batterie. Cela est valable pour des faibles valeurs de R_{bat} , ce qui est le cas des batteries Li-ion utilisées dans l'industrie automobile. Sous cette hypothèse, \mathcal{P}_{bat} est donné par (1.44), avec ρ_{bat} constant pour des valeurs de SoC et Θ_{bat} fixes.

$$\mathcal{P}_{bat} = 1 + \rho_{bat} P_{elec} \quad (1.44)$$

Ainsi, l'équation (1.43) peut être reformulée comme suit :

$$\tilde{P}_{bat} = (1 + \rho_{bat} P_{elec}) P_{elec} = P_{elec} + \rho_{bat} P_{elec}^2 \quad (1.45)$$

La Figure 1.13 présente les résultats de l'identification de la batterie pour SoC = 75% et $\Theta_{bat} = 30^\circ\text{C}$. La Figure 1.13a nous permet de vérifier la pertinence des hypothèses associées à l'équation (1.44). Sur la Figure 1.13b nous pouvons voir que le modèle (1.45) permet d'estimer de manière satisfaisante la variation de l'énergie chimique stockée dans la batterie.

Finalement, la Figure (1.14) présente une cartographie du paramètre ρ_{bat} en fonction du SoC et de la température de la batterie, Θ_{bat} . Grâce à la modélisation proposée, la

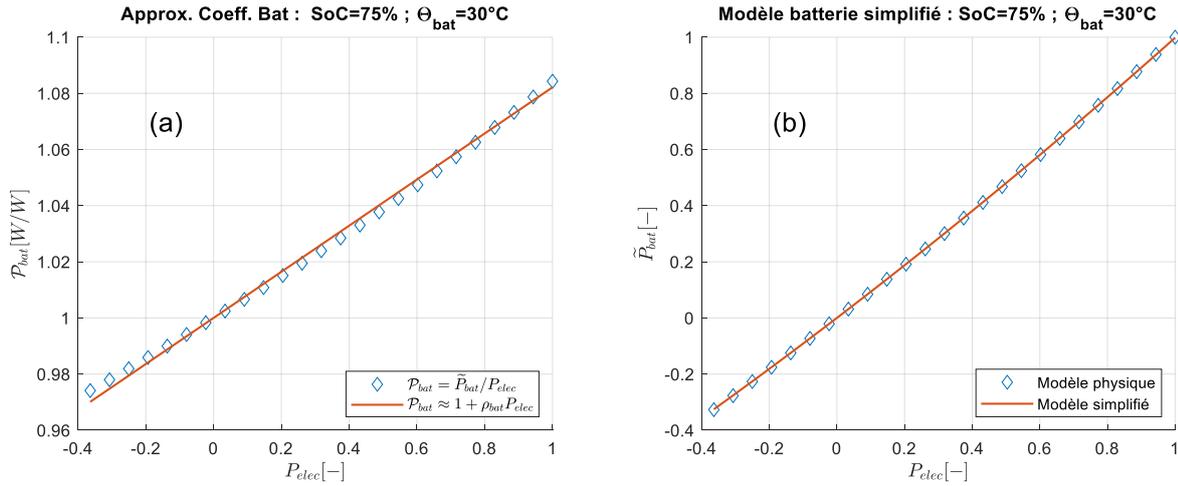


FIG. 1.13 – Identification du modèle analytique de la puissance de la batterie, \tilde{P}_{bat}^{prt} , les états de la batterie étant : SoC = 75% et $\Theta_{bat} = 30^{\circ}\text{C}$. (a) Validation de l'hypothèse sur le coefficient \mathcal{P}_{bat} ; (b) Comparaison du modèle identifié, \tilde{P}_{bat}^{prt} , avec les pertes issues du modèle cartographié, P_{bat}^{prt} . Les variables P_{elec} , P_{bat}^{prt} et \tilde{P}_{bat}^{prt} ont été normalisées pour avoir une amplitude maximum égale à 1 (en gardant la valeur 0, et donc le signe, inchangés).

batterie est représentée par un unique paramètre, ce qui peut être d'intérêt au moment d'estimer la consommation de la batterie pour des applications embarquées.

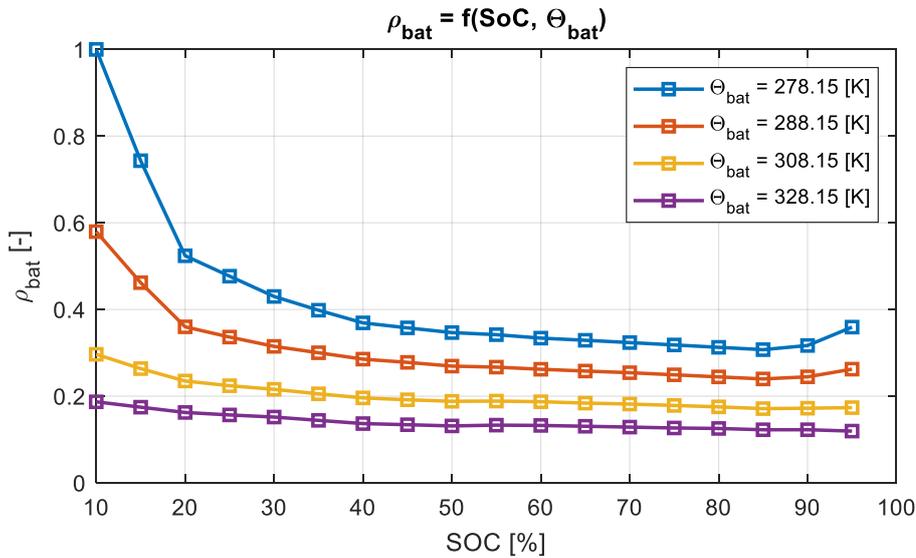


FIG. 1.14 – Cartographie du paramètre batterie, ρ_{bat} , en fonction de SoC et Θ_{bat} . Les valeurs de ρ_{bat} ont été normalisées pour avoir une amplitude maximum égale à 1 (en gardant la valeur 0 inchangée).

1.2 MODÈLE ÉNERGÉTIQUE DES MANŒUVRES DE CONDUITE

Objectif de la section

Modéliser la consommation d'énergie d'un véhicule électrique pour une manœuvre donnée, en fonction de ses paramètres

La partie II de ce document concernait l'étude de l'agrément de conduite, en nous basant sur l'état de l'art de différents domaines d'étude et l'analyse de roulages réels. Cela nous a permis d'identifier une *topologie de manœuvre* qui devrait être représentative du comportement du conducteur *dans certaines situations*. En particulier, nous avons représenté les manœuvres *élémentaires* sous la forme de *profils trapézoïdaux d'accélération*. L'observation des roulages en situation réelle nous a montré que ce type de profil ferait partie du *répertoire de manœuvres*, auquel le conducteur fait appel quand il est confronté à des situations réelles à bord de son véhicule.

Cette connaissance peut s'avérer de grand intérêt pour la conception de SAC car elle nous permet de représenter le comportement cinématique du véhicule à partir de quelques paramètres uniquement (cf. section II.3). Pour considérer l'aspect énergétique des manœuvres, il est nécessaire d'associer la consommation d'énergie du VE aux paramètres du profil trapézoïdal. La présente section sera consacrée à la modélisation énergétique des manœuvres trapézoïdales de conduite.

1.2.1 Modélisation cinématique d'une manœuvre de conduite

Dorénavant, nous considérerons des manœuvres trapézoïdales selon la topologie illustrée par la Figure 1.15. A la différence de la modélisation présentée sur la section II.3.3.1.1, nous considérerons ici que le véhicule attend une vitesse *parfaitement* stabilisée à la fin de la manœuvre, ce qui se traduit par une accélération finale nulle, $a_{veh}(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = 0$; cela correspond à une situation *idéale* où l'action du conducteur n'est pas perturbée par des événements extérieurs le faisant enchaîner plusieurs accélérations, ou décélérations. La définition des différents paramètres de la manœuvre sont les mêmes que pour la section II.3.3.1.1.

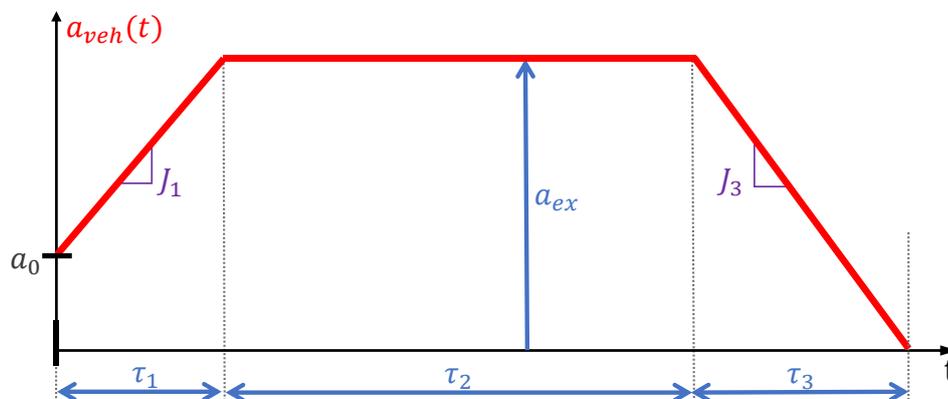


FIG. 1.15 – Profil de manœuvre trapézoïdale d'accélération, $a_{veh}(t)$.

Pour la mise en équation, nous prendrons la convention donnée par (1.46), où a_{ex} , J_1 et J_3 positifs correspondent à une manœuvre d'accélération et vice-versa. Aussi, pour simplifier les calculs et alléger la notation, nous considérerons, sans perte de généralité, que la manœuvre commence à $t = 0$.

$$\text{sign}(a_{ex}) = \text{sign}(J_1) = \text{sign}(J_3) \quad (1.46)$$

Nous exprimerons le profil d'accélération comme une fonction par parties¹⁰, selon il est montré sur (1.47).

$$a_{veh}(t) = \begin{cases} a_0 + J_1 t & , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ a_{ex} & , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ a_{ex} - J_3 (t - (\tau_1 + \tau_2)) & , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.47)$$

1.2.1.1 Profil de vitesse du véhicule

En connaissant la vitesse initiale du véhicule v_0 , nous pouvons calculer sa vitesse instantanée grâce à l'équation suivante :

$$V_{veh}(t) = v_0 + \int_0^t a_{veh}(\tau) d\tau \quad (1.48)$$

En appliquant la définition de manœuvre (1.47) à l'équation (1.48), nous obtenons :

$$V_{veh}(t) = \begin{cases} v_0 + a_0 t + \frac{J_1}{2} t^2 & , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] + a_{ex} t & , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \right. \\ \left. + [a_{ex} + J_3(\tau_1 + \tau_2)] t - \frac{J_3}{2} t^2 \right] & , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.49)$$

La vitesse à la fin de la manœuvre, quand $t = \tau_{mnv} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$, est donnée par :

$$V_{veh}(\tau_{mnv}) = v_0 + a_0 \tau_1 + \frac{1}{2} J_1 \tau_1^2 + a_{ex} \tau_2 + a_{ex} \tau_3 - \frac{1}{2} J_3 \tau_3^2 \quad (1.50)$$

1.2.1.2 Distance parcourue par le véhicule

En supposant que, au début de la manœuvre, le véhicule se trouve au point x_0 , il est possible de calculer sa position instantanée¹¹ X_{veh} , en fonction du temps, comme :

$$X_{veh}(t) = x_0 + \int_0^t v_{veh}(\tau) d\tau \quad (1.51)$$

En combinant (1.49) et (1.51), nous obtenons :

10. A différence de l'équation (3.32) de la section II.3.3.1.1, où nous avons exprimé un profil similaire comme le maximum (où le minimum) de trois fonctions affines, cette nouvelle formulation est beaucoup mieux adaptée au calcul d'intégrales, ce qui sera d'utilité par la suite.

11. Sur un référentiel qui suit la forme du parcours du véhicule et qui a, à peu près, la même forme que la route.

$$X_{veh}(t) = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} x_0 + v_0 t + \frac{a_0}{2} t^2 + \frac{J_1}{6} t^3 \\ x_0 + \left(\frac{(a_{ex} - a_0)}{2} - \frac{J_1 \tau_1}{3} \right) \tau_1^2 \end{array} \right] , & 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[\begin{array}{l} x_0 + \left(\frac{(a_{ex} - a_0)}{2} - \frac{J_1 \tau_1}{3} \right) \tau_1^2 + \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] t + \left[\frac{a_{ex}}{2} \right] t^2 \\ x_0 + \left(\frac{(a_{ex} - a_0)}{2} - \frac{J_1 \tau_1}{3} \right) \tau_1^2 + \frac{J_3}{6} (\tau_1 + \tau_2)^3 \\ + \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] t \\ + \frac{1}{2} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] t^2 - \left[\frac{J_3}{6} \right] t^3 \end{array} \right] , & \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\begin{array}{l} x_0 + \left(\frac{(a_{ex} - a_0)}{2} - \frac{J_1 \tau_1}{3} \right) \tau_1^2 + \frac{J_3}{6} (\tau_1 + \tau_2)^3 \\ + \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] t \\ + \frac{1}{2} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] t^2 - \left[\frac{J_3}{6} \right] t^3 \end{array} \right] , & \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.52)$$

A la fin de la manœuvre, à $t = \tau_{mnv}$, la position finale du véhicule est donnée par :

$$X_{veh}(\tau_{mnv}) = x_0 + v_0 (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + \frac{a_0 \tau_1}{2} (\tau_1 + 2\tau_2 + 2\tau_3) + \frac{a_{ex}}{2} (\tau_2 + \tau_3)^2 + \frac{J_1}{6} \tau_1^2 (\tau_1 + 3\tau_2 + 3\tau_3) - \frac{J_3}{6} \tau_3^3 \quad (1.53)$$

Ainsi, la distance totale parcourue par le véhicule pendant la manœuvre, $\Delta X_{veh}(\tau_{mnv}) = X_{veh}(\tau_{mnv}) - x_0$, peut être calculée, en retravaillant l'équation (1.53), comme suit :

$$\Delta X_{veh}(\tau_{mnv}) = \left[v_0 + \frac{a_0 \tau_1}{2} + \frac{J_1 \tau_1^2}{6} \right] (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + \left[\frac{a_0 \tau_1}{2} + \frac{J_1 \tau_1^2}{6} \right] (\tau_2 + \tau_3) + \frac{a_{ex}}{2} (\tau_2 + \tau_3)^2 - \frac{J_3}{6} \tau_3^3 \quad (1.54)$$

A titre d'illustration, la Figure 1.16 présente une manœuvre d'accélération en conduite extra-urbaine (a, c, e) et une manœuvre de décélération en conduite urbaine. Les paramètres des manœuvres ont été choisis pour être en accord avec les observations des roulages réels de la section II.3.4 ; plus exactement, nous avons retenu : $v_0 = 90 [km/h]$, $a_0 = 0 [m/s^2]$, $a_{ex} = 0.8 [m/s^2]$, $J_1 = 0.8 [m/s^2]$, $J_3 = 0.8 [m/s^3]$ et $\tau_2 = 5.9444 [s]$, pour la manœuvre d'accélération, et $v_0 = 50 [km/h]$, $a_0 = 0 [m/s^2]$, $a_{ex} = -0.8 [m/s^2]$, $J_1 = -0.8 [m/s^2]$, $J_3 = -0.8 [m/s^3]$ et $\tau_2 = 5.9444 [s]$, pour la décélération. Sur les figures, les courbes notées *analytiques* sont issues de l'application de (1.49) et (1.52), alors que celles notées *numériques* sont le résultats d'intégrer numériquement à deux reprises (en appliquant la méthode trapézoïdale), le profil d'accélération, avec un pas de calcul convenable. Cette opération nous a permis de vérifier la validité de nos calculs.

1.2.2 Modélisation physique des manœuvres

Une approche permettant de déterminer la consommation associée à une manœuvre, consiste à construire un modèle numérique basé sur les modèles *physiques* de la section III.1.1.1. Pour les assembler, nous avons utilisé l'architecture présentée sur la Figure 1.8, qui a été traduite sous la forme d'un modèle Simulink [132].

Nous définissons la consommation associée à une manœuvre comme la variation totale d'énergie chimique dans la batterie, E_{mnv} , entre le début et la fin de la manœuvre.

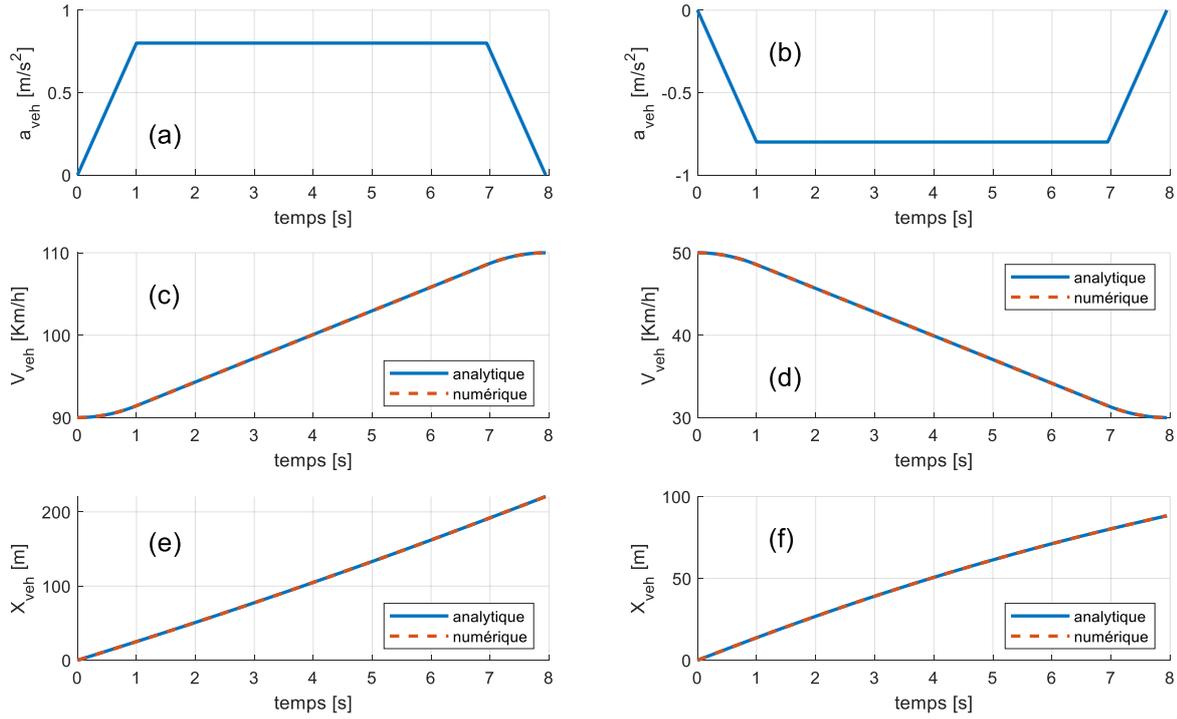


FIG. 1.16 – Profils cinématiques des manœuvres de conduite : a_{veh} , V_{veh} et X_{veh} . (a), (c) et (e) correspondent à une accélération en conduite extra-urbaine ; (b), (d) et (f) correspondent à une décélération en conduite urbaine.

Pour calculer E_{mnv} , il suffit d'intégrer la variation instantanée de son énergie, P_{bat} , comme montré sur (1.55), où $\underline{y}^0 = [v_0, a_0, \bar{\alpha}_r, SoC, \Theta_{bat}, P_{aux}]^T$ représente les états du véhicule à l'instant $t = 0$. La pente moyenne, $\bar{\alpha}_r$, est considérée comme un état dans la mesure où elle dépend de la position du véhicule sur la route, qui est un état à proprement parler. La puissance demandée par les auxiliaires, P_{aux} , sera également traitée comme un « état » afin de simplifier la notation. Les paramètres du profil trapézoïdal d'accélération sont donnés par $\underline{\theta} = [a_{ex}, J_1, J_3, \tau_2]^T$.

$$E_{mnv} = f_0(\underline{y}^0, \underline{\theta}) = \int_0^{\tau_{mnv}} P_{bat}(\underline{y}^0, \underline{\theta}, t) dt \quad (1.55)$$

Les résultats associés aux modèles physiques seront présentés ultérieurement, en parallèle de ceux issus du modèle analytique des manœuvres.

1.2.3 Modélisation analytique des manœuvres

Afin de déterminer le modèle analytique de consommation associée à une manœuvre de conduite, en fonction de ses paramètres, nous allons calculer la variation totale de l'énergie chimique dans la batterie, \tilde{E}_{mnv} , en intégrant la variation instantanée de son énergie \tilde{P}_{bat} , de manière analogue à la modélisation physique. Pour ce faire, nous partirons des profils cinématiques présentés sur la section III.1.2.1, que nous appliquerons aux modèles analytiques du VEB de la section III.1.1.2. Nous obtiendrons ainsi une fonction en t , polynômiale par parties, exprimant la variation instantanée d'énergie dans la batterie ; son intégrale correspondra à la *consommation globale* associée à la manœuvre.

1.2.3.1 Véhicule

Dans un premier temps, nous calculerons la force F_{veh} devant être appliquée sur le véhicule pour suivre le profil d'accélération défini par les paramètres $\underline{\theta}$, en partant d'une vitesse v_0 avec une pente moyenne $\bar{\alpha}_r$. F_{veh} est définie par (1.1), et nous trouverons une estimation de sa valeur en appliquant (1.56). En outre, nous nous limiterons ici au cas où la capacité du GMP permet de répondre au besoin du conducteur ; les freins mécaniques ne seront donc pas actionnés ($F_{frein} = 0$).

$$\tilde{F}_{veh}(t) = \tilde{F}_{gmp} = \tilde{F}_{accl}(a_{veh}(t)) + \tilde{F}_{pente}(\bar{\alpha}_r) + \tilde{F}_{res}(V_{veh}(t)) \quad (1.56)$$

La composante d'effort due à l'accélération est donnée, selon (1.2), par $\tilde{F}_{accl}(a_{veh}(t)) = M_{veh}^{eq} a_{veh}(t)$. L'effort nécessaire pour vaincre la pente, est donné par $\tilde{F}_{pente} = M_{veh} g \sin \bar{\alpha}_r$, en accord avec (1.3). La résistance à l'avancement, \tilde{F}_{res} , peut être calculée en appliquant le profil de vitesse (1.49) à l'équation (1.23). Cela, ainsi que d'autres calculs intermédiaires sont présentés sur l'Annexe III.

En combinant les valeurs instantanées de \tilde{F}_{accl} , \tilde{F}_{pente} et \tilde{F}_{res} , nous pouvons trouver \tilde{F}_{veh} , selon il est présenté sur (1.57).

$$\tilde{F}_{veh}(t) = \begin{cases} \varphi_{1,0} + \varphi_{1,1}t + \varphi_{1,2}t^2 + \varphi_{1,3}t^3 + \varphi_{1,4}t^4 & , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ \varphi_{2,0} + \varphi_{2,1}t + \varphi_{2,2}t^2 & , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \varphi_{3,0} + \varphi_{3,1}t + \varphi_{3,2}t^2 + \varphi_{3,3}t^3 + \varphi_{3,4}t^4 & , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.57)$$

Dans (1.57), les coefficients correspondant à la première phase de la manœuvre sont donnés par :

$$\varphi_{1,0} = M_{veh}^{eq} a_0 + M_{veh} g \sin \bar{\alpha}_r + b_2 v_0^2 + b_1 v_0 + b_0 \quad (1.58)$$

$$\varphi_{1,1} = M_{veh}^{eq} J_1 + a_0 (2 b_2 v_0 + b_1) \quad (1.59)$$

$$\varphi_{1,2} = b_2 a_0^2 + \frac{J_1}{2} (2 b_2 v_0 + b_1) \quad (1.60)$$

$$\varphi_{1,3} = b_2 J_1 a_0 \quad (1.61)$$

$$\varphi_{1,4} = \frac{b_2 J_1^2}{4} \quad (1.62)$$

Les coefficients de la deuxième phase de la manœuvre peuvent être calculés comme :

$$\varphi_{2,0} = M_{veh}^{eq} a_{ex} + M_{veh} g \sin \bar{\alpha}_r + b_2 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right]^2 \quad (1.63)$$

$$+ b_1 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] + b_0$$

$$\varphi_{2,1} = a_{ex} \left[2 b_2 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] + b_1 \right] \quad (1.64)$$

$$\varphi_{2,2} = b_2 a_{ex}^2 \quad (1.65)$$

Finalement, les équations (1.66) - (1.71) permettent de calculer les coefficients associés à la troisième phase de la manœuvre.

$$\varphi_{3,0} = M_{veh}^{eq} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] + M_{veh} g \sin \bar{\alpha}_r \quad (1.66)$$

$$+ b_2 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right]^2$$

$$+ b_1 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] + b_0$$

$$\varphi_{3,1} = [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \left[2 b_2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right) + b_1 \right] \quad (1.67)$$

$$+ M_{veh}^{eq} J_3 \quad (1.68)$$

$$\varphi_{3,2} = b_2 [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)]^2 \quad (1.69)$$

$$- \frac{J_3}{2} \left[2 b_2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right) + b_1 \right]$$

$$\varphi_{3,3} = - b_2 J_3 [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \quad (1.70)$$

$$\varphi_{3,4} = \frac{b_2 J_3^2}{4} \quad (1.71)$$

1.2.3.2 Motorisation

Nous allons désormais nous intéresser à comment une manœuvre de conduite se traduit par une demande (ou un envoi) de puissance de la part de la motorisation. Pour ce faire, il est d'abord nécessaire de connaître à chaque instant son point de fonctionnement, donné par un régime ω_{me} et un couple T_{me} , en fonction des paramètres du profil d'accélération.

D'après (1.6), le régime de la machine électrique est donné par $\omega_{me} = \frac{r_{trsm}}{R_{roue}} V_{veh}$. Afin d'alléger la notation, nous introduirons le paramètre $k_t = \frac{r_{trsm}}{R_{roue}}$, correspondant au rapport de transformation intégrant le réducteur, le pont différentiel et la roue. Le régime instantané $\omega_{me}(t)$ est donné par (1.72).

$$\omega_{me}(t) = \begin{cases} [k_t v_0] + [k_t a_0] t + \left[\frac{k_t J_1}{2} \right] t^2 & , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ k_t \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] + [k_t a_{ex}] t & , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[k_t \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \right] & , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \\ \left[+ k_t [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] t - \left[\frac{k_t J_3}{2} \right] t^2 \right] & \end{cases} \quad (1.72)$$

Concernant le couple, (1.5) montre que $T_{me} = (1/k_t) F_{veh}$. Ainsi, le couple instantané de la ME, $\tilde{T}_{me}(t) = (1/k_t) \tilde{F}_{veh}$, peut être estimé en utilisant (1.73).

$$\tilde{T}_{me}(t) = \begin{cases} \frac{\varphi_{1,0}}{k_t} + \frac{\varphi_{1,1}}{k_t} t + \frac{\varphi_{1,2}}{k_t} t^2 + \frac{\varphi_{1,3}}{k_t} t^3 + \frac{\varphi_{1,4}}{k_t} t^4 & , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ \frac{\varphi_{2,0}}{k_t} + \frac{\varphi_{2,1}}{k_t} t + \frac{\varphi_{2,2}}{k_t} t^2 & , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \frac{\varphi_{3,0}}{k_t} + \frac{\varphi_{3,1}}{k_t} t + \frac{\varphi_{3,2}}{k_t} t^2 + \frac{\varphi_{3,3}}{k_t} t^3 + \frac{\varphi_{3,4}}{k_t} t^4 & , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.73)$$

Le modèle (1.30) permet de estimer la puissance en entrée de la motorisation (du côté de l'onduleur), \tilde{P}_{mot} . Cette formule ne dépend pas uniquement des valeurs de ω_{me} et \tilde{T}_{me} , mais aussi de ω_{me}^2 , \tilde{T}_{me}^2 et $\omega_{me} \tilde{T}_{me}$. Le calcul des valeurs instantanées de ces variables est présenté sur l'Annexe III. En partant de (1.30), on retrouve le profil temporel, $\tilde{P}_{mot}(t)$, tel que montré par (1.74). Par rapport à (1.30), nous avons choisit d'avoir $p_{1,2} = p_{2,1}$, comme discuté en la section III.1.1.2.2.

$$\tilde{P}_{mot}(t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} p_{1,1} \omega_{me}^2(t) + 2 p_{1,2} \omega_{me} \tilde{T}_{me}(t) + p_{2,2} \tilde{T}_{me}^2(t) \\ + q_1 \omega_{me}(t) + q_2 \tilde{T}_{me}(t) + r \end{bmatrix}, & 0 \leq t < \tau_1 \\ \begin{bmatrix} p_{1,1} \omega_{me}^2(t) + 2 p_{1,2} \omega_{me} \tilde{T}_{me}(t) + p_{2,2} \tilde{T}_{me}^2(t) \\ + q_1 \omega_{me}(t) + q_2 \tilde{T}_{me}(t) + r \end{bmatrix}, & \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \begin{bmatrix} p_{1,1} \omega_{me}^2(t) + 2 p_{1,2} \omega_{me} \tilde{T}_{me}(t) + p_{2,2} \tilde{T}_{me}^2(t) \\ + q_1 \omega_{me}(t) + q_2 \tilde{T}_{me}(t) + r \end{bmatrix}, & \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.74)$$

L'équation (1.74) peut-être reformulée comme suit :

$$\tilde{P}_{mot}(t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} \zeta_{1,0} + \zeta_{1,1} t + \zeta_{1,2} t^2 + \zeta_{1,3} t^3 + \zeta_{1,4} t^4 \\ + \zeta_{1,5} t^5 + \zeta_{1,6} t^6 + \zeta_{1,7} t^7 + \zeta_{1,8} t^8 \end{bmatrix}, & 0 \leq t < \tau_1 \\ \begin{bmatrix} \zeta_{2,0} + \zeta_{2,1} t + \zeta_{2,2} t^2 + \zeta_{2,3} t^3 + \zeta_{2,4} t^4 \end{bmatrix}, & \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \begin{bmatrix} \zeta_{3,0} + \zeta_{3,1} t + \zeta_{3,2} t^2 + \zeta_{3,3} t^3 + \zeta_{3,4} t^4 \\ + \zeta_{3,5} t^5 + \zeta_{3,6} t^6 + \zeta_{3,7} t^7 + \zeta_{3,8} t^8 \end{bmatrix}, & \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.75)$$

Les coefficients de la première phase de la manœuvre, notés $\zeta_{1,j}$, sont données par les équations (1.76)-(1.84).

$$\zeta_{1,0} = v_0 \left[p_{1,1} k_t^2 v_0 + 2 p_{1,2} \varphi_{1,0} + q_1 k_t \right] + \frac{\varphi_{1,0}}{k_t} \left[\frac{p_{2,2} \varphi_{1,0}}{k_t} + q_2 \right] + r \quad (1.76)$$

$$\zeta_{1,1} = v_0 \left[2 p_{1,1} k_t^2 a_0 + 2 p_{1,2} \varphi_{1,1} \right] + a_0 \left[2 p_{1,2} \varphi_{1,0} + q_1 k_t \right] + \frac{\varphi_{1,1}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{1,0}}{k_t} + q_2 \right] \quad (1.77)$$

$$\zeta_{1,2} = v_0 \left[p_{1,1} k_t^2 J_1 + 2 p_{1,2} \varphi_{1,2} \right] + a_0 \left[p_{1,1} k_t^2 a_0 + 2 p_{1,2} \varphi_{1,1} \right] \quad (1.78)$$

$$+ \frac{J_1}{2} \left[2 p_{1,2} \varphi_{1,0} + q_1 k_t \right] + \frac{p_{2,2} \varphi_{1,1}^2}{k_t^2} + \frac{\varphi_{1,2}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{1,0}}{k_t} + q_2 \right]$$

$$\zeta_{1,3} = v_0 \left[2 p_{1,2} \varphi_{1,3} \right] + a_0 \left[p_{1,1} k_t^2 J_1 + 2 p_{1,2} \varphi_{1,2} \right] + \frac{J_1}{2} \left[2 p_{1,2} \varphi_{1,1} \right] \quad (1.79)$$

$$+ \frac{2 p_{2,2} \varphi_{1,1} \varphi_{1,2}}{k_t^2} + \frac{\varphi_{1,3}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{1,0}}{k_t} + q_2 \right]$$

$$\begin{aligned} \tilde{\zeta}_{1,4} = & v_0 [2 p_{1,2} \varphi_{1,4}] + a_0 [2 p_{1,2} \varphi_{1,3}] + \frac{J_1}{2} \left[p_{1,1} k_t^2 \left(\frac{J_1}{2} \right) + 2 p_{1,2} \varphi_{1,2} \right] \\ & + \frac{p_{2,2} (\varphi_{1,2}^2 + 2 \varphi_{1,1} \varphi_{1,3})}{k_t^2} + \frac{\varphi_{1,4}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{1,0}}{k_t} + q_2 \right] \end{aligned} \quad (1.80)$$

$$\tilde{\zeta}_{1,5} = a_0 [2 p_{1,2} \varphi_{1,4}] + \frac{J_1}{2} [2 p_{1,2} \varphi_{1,3}] + \frac{2 p_{2,2} (\varphi_{1,1} \varphi_{1,4} + \varphi_{1,2} \varphi_{1,3})}{k_t^2} \quad (1.81)$$

$$\tilde{\zeta}_{1,6} = \frac{J_1}{2} [2 p_{1,2} \varphi_{1,4}] + \frac{p_{2,2} (\varphi_{1,3}^2 + 2 \varphi_{1,2} \varphi_{1,4})}{k_t^2} \quad (1.82)$$

$$\tilde{\zeta}_{1,7} = \frac{2 p_{2,2} \varphi_{1,3} \varphi_{1,4}}{k_t^2} \quad (1.83)$$

$$\tilde{\zeta}_{1,8} = \frac{p_{2,2} \varphi_{1,4}^2}{k_t^2} \quad (1.84)$$

Les coefficients associés à la deuxième phase de la manœuvre, $\tilde{\zeta}_{2,j}$, sont donnés par (1.85)-(1.89).

$$\begin{aligned} \tilde{\zeta}_{2,0} = & \left(\begin{aligned} & \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] \\ & \times \left[p_{1,1} k_t^2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right) + 2 p_{1,2} \varphi_{2,0} + q_1 k_t \right] \end{aligned} \right) \\ & + \frac{\varphi_{2,0}}{k_t} \left[\frac{p_{2,2} \varphi_{2,0}}{k_t} + q_2 \right] + r \end{aligned} \quad (1.85)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\zeta}_{2,1} = & \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] \left[2 p_{1,1} k_t^2 a_{ex} + 2 p_{1,2} \varphi_{2,1} \right] \\ & + a_{ex} [2 p_{1,2} \varphi_{2,0} + q_1 k_t] + \frac{\varphi_{2,1}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{2,0}}{k_t} + q_2 \right] \end{aligned} \quad (1.86)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\zeta}_{2,2} = & \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] \left[2 p_{1,2} \varphi_{2,2} \right] + a_{ex} \left[p_{1,1} k_t^2 a_{ex} + 2 p_{1,2} \varphi_{2,1} \right] \\ & + \frac{p_{2,2} \varphi_{2,1}^2}{k_t^2} + \frac{\varphi_{2,2}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{2,0}}{k_t} + q_2 \right] \end{aligned} \quad (1.87)$$

$$\tilde{\zeta}_{2,3} = a_{ex} [2 p_{1,2} \varphi_{2,2}] + \frac{\varphi_{2,2}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{2,1}}{k_t} \right] \quad (1.88)$$

$$\tilde{\zeta}_{2,4} = \frac{p_{2,2} \varphi_{2,2}^2}{k_t^2} \quad (1.89)$$

Enfin, les coefficients associés à la troisième phase du profil trapézoïdal, $\tilde{\zeta}_{3,j}$, sont présentés sur (1.90)-(1.98).

$$\begin{aligned} \xi_{3,0} = & \left(\begin{aligned} & \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \\ & \times \left[p_{1,1} k_t^2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right) + 2 p_{1,2} \varphi_{3,0} + q_1 k_t \right] \end{aligned} \right) \\ & + \frac{\varphi_{3,0}}{k_t} \left[\frac{p_{2,2} \varphi_{3,0}}{k_t} + q_2 \right] + r \end{aligned} \quad (1.90)$$

$$\begin{aligned} \xi_{3,1} = & \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \left[2 p_{1,1} k_t^2 [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] + 2 p_{1,2} \varphi_{3,1} \right] \\ & + [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] [2 p_{1,2} \varphi_{3,0} + q_1 k_t] + \frac{\varphi_{3,1}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{3,0}}{k_t} + q_2 \right] \end{aligned} \quad (1.91)$$

$$\begin{aligned} \xi_{3,2} = & \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \left[-p_{1,1} k_t^2 J_3 + 2 p_{1,2} \varphi_{3,2} \right] \\ & + [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \left[p_{1,1} k_t^2 [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] + 2 p_{1,2} \varphi_{3,1} \right] \\ & - \frac{J_3}{2} [2 p_{1,2} \varphi_{3,0} + q_1 k_t] + \frac{p_{2,2} \varphi_{3,1}^2}{k_t^2} + \frac{\varphi_{3,2}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{3,0}}{k_t} + q_2 \right] \end{aligned} \quad (1.92)$$

$$\begin{aligned} \xi_{3,3} = & \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right] [2 p_{1,2} \varphi_{3,3}] \\ & + [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \left[-p_{1,1} k_t^2 J_3 + 2 p_{1,2} \varphi_{3,2} \right] - \frac{J_3}{2} [2 p_{1,2} \varphi_{3,1}] \\ & + \frac{2 p_{2,2} \varphi_{3,1} \varphi_{3,2}}{k_t^2} + \frac{\varphi_{3,3}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{3,0}}{k_t} + q_2 \right] \end{aligned} \quad (1.93)$$

$$\begin{aligned} \xi_{3,4} = & \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right] [2 p_{1,2} \varphi_{3,4}] \\ & + [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] [2 p_{1,2} \varphi_{3,3}] + \frac{J_3}{2} \left[p_{1,1} k_t^2 \left(\frac{J_3}{2} \right) - 2 p_{1,2} \varphi_{3,2} \right] \\ & + \frac{p_{2,2} (\varphi_{3,2}^2 + 2 \varphi_{3,1} \varphi_{3,3})}{k_t^2} + \frac{\varphi_{3,4}}{k_t} \left[\frac{2 p_{2,2} \varphi_{3,0}}{k_t} + q_2 \right] \end{aligned} \quad (1.94)$$

$$\xi_{3,5} = [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] [2 p_{1,2} \varphi_{3,4}] - \frac{J_3}{2} [2 p_{1,2} \varphi_{3,3}] + \frac{2 p_{2,2} (\varphi_{3,1} \varphi_{3,4} + \varphi_{3,2} \varphi_{3,3})}{k_t^2} \quad (1.95)$$

$$\xi_{3,6} = -\frac{J_3}{2} [2 p_{1,2} \varphi_{3,4}] + \frac{p_{2,2} (\varphi_{3,3}^2 + 2 \varphi_{3,2} \varphi_{3,4})}{k_t^2} \quad (1.96)$$

$$\xi_{3,7} = \frac{2 p_{2,2} \varphi_{3,3} \varphi_{3,4}}{k_t^2} \quad (1.97)$$

$$\xi_{3,8} = \frac{p_{2,2} \varphi_{3,4}^2}{k_t^2} \quad (1.98)$$

1.2.3.3 Batterie

Dans cette section, nous estimerons la variation instantanée de l'énergie chimique emmagasinée dans la batterie, $\tilde{P}_{bat}(t)$, en fonction des paramètres de manœuvre. Pour ce faire, nous devons d'abord calculer la sollicitation totale en puissance à la batterie, \tilde{P}_{elec} , qui intègre la puissance en entrée de la motorisation \tilde{P}_{mot} , et la puissance demandée par les auxiliaires P_{aux} . L'équation (1.18), de la section III.1.1.1.3, nous a montré que $\tilde{P}_{elec}(t) = \tilde{P}_{mot}(t) + P_{aux}$. Ainsi, \tilde{P}_{elec} peut être calculé comme :

$$\tilde{P}_{elec}(t) = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} (P_{aux} + \zeta_{1,0}) + \zeta_{1,1}t + \zeta_{1,2}t^2 + \zeta_{1,3}t^3 + \zeta_{1,4}t^4 \\ + \zeta_{1,5}t^5 + \zeta_{1,6}t^6 + \zeta_{1,7}t^7 + \zeta_{1,8}t^8 \end{array} \right] , & 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[\begin{array}{l} (P_{aux} + \zeta_{2,0}) + \zeta_{2,1}t + \zeta_{2,2}t^2 + \zeta_{2,3}t^3 + \zeta_{2,4}t^4 \\ + \zeta_{2,5}t^5 + \zeta_{2,6}t^6 + \zeta_{2,7}t^7 + \zeta_{2,8}t^8 \end{array} \right] , & \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\begin{array}{l} (P_{aux} + \zeta_{3,0}) + \zeta_{3,1}t + \zeta_{3,2}t^2 + \zeta_{3,3}t^3 + \zeta_{3,4}t^4 \\ + \zeta_{3,5}t^5 + \zeta_{3,6}t^6 + \zeta_{3,7}t^7 + \zeta_{3,8}t^8 \end{array} \right] , & \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.99)$$

Pour le calcul de \tilde{P}_{bat} , nous allons utiliser le modèle présenté sur (1.45), qui donnerait $\tilde{P}_{bat} = \tilde{P}_{elec} + \rho_{bat} \tilde{P}_{elec}^2$ ¹², avec la notation des estimations. Cette équation demande le calcul du carré de P_{elec} , ce qui est présenté sur l'Annexe III.

La valeur instantanée de la puissance stockée dans la batterie, $\tilde{P}_{bat}(t)$, est donnée donc par (1.100).

$$\tilde{P}_{bat}(t) = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} \sigma_{1,0} + \sigma_{1,1}t + \sigma_{1,2}t^2 + \sigma_{1,3}t^3 + \sigma_{1,4}t^4 \\ + \sigma_{1,5}t^5 + \sigma_{1,6}t^6 + \sigma_{1,7}t^7 + \sigma_{1,8}t^8 \\ + \sigma_{1,9}t^9 + \sigma_{1,10}t^{10} + \sigma_{1,11}t^{11} + \sigma_{1,12}t^{12} \\ + \sigma_{1,13}t^{13} + \sigma_{1,14}t^{14} + \sigma_{1,15}t^{15} + \sigma_{1,16}t^{16} \end{array} \right] , & 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[\begin{array}{l} \sigma_{2,0} + \sigma_{2,1}t + \sigma_{2,2}t^2 + \sigma_{2,3}t^3 + \sigma_{2,4}t^4 \\ + \sigma_{2,5}t^5 + \sigma_{2,6}t^6 + \sigma_{2,7}t^7 + \sigma_{2,8}t^8 \end{array} \right] , & \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\begin{array}{l} \sigma_{3,0} + \sigma_{3,1}t + \sigma_{3,2}t^2 + \sigma_{3,3}t^3 + \sigma_{3,4}t^4 \\ + \sigma_{3,5}t^5 + \sigma_{3,6}t^6 + \sigma_{3,7}t^7 + \sigma_{3,8}t^8 \\ + \sigma_{3,9}t^9 + \sigma_{3,10}t^{10} + \sigma_{3,11}t^{11} + \sigma_{3,12}t^{12} \\ + \sigma_{3,13}t^{13} + \sigma_{3,14}t^{14} + \sigma_{3,15}t^{15} + \sigma_{3,16}t^{16} \end{array} \right] , & \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.100)$$

Les coefficients associés à la phase initiale de la manœuvre, $\sigma_{1,i}$, sont donnés par (1.101)-(1.117).

12. Tel qu'il a été dit précédemment, on pourrait calculer la variation instantanée d'énergie dans la batterie P_{bat} , comme le produit $OCV I_{bat}$, où I_{bat} est donné par (1.21). En revanche, en faisant ainsi on obtient une équation contenant la racine carrée d'un polynôme d'ordre 8.

Afin d'obtenir la variation total de l'énergie dans la batterie due à la manœuvre, nous devons calculer l'intégrale temporelle de P_{bat} , ce qui implique donc le calcul de l'intégrale de la racine d'un polynôme de huitième ordre. Cette tâche est loin d'être triviale et il est même possible qu'il n'y ait pas de solution analytique; de plus, même si on en trouvait une, rien ne garantit que celle-ci offrira une réduction du coût de calcul par rapport au modèle dit physique. Nous utiliserons donc plutôt le modèle (1.45), selon il a été discuté sur la section III.1.1.2.3.

Pour avoir une idée de la difficulté associée au calcul de l'intégrale, le lecteur est invité à calculer l'intégrale temporelle $\int_{t_0}^{t_f} \sqrt{c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3} dt$, en utilisant un outil de calcul formel comme Wolfram Alpha, ou la Toolbox de calcul symbolique de Matlab. Une page entière n'est pas suffisante pour contenir la solution proposée par Wolfram Alpha!

$$\sigma_{1,0} = (P_{aux} + \zeta_{1,0}) [1 + \rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.101)$$

$$\sigma_{1,1} = \zeta_{1,1} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.102)$$

$$\sigma_{1,2} = \rho_{bat} \zeta_{1,1}^2 + \zeta_{1,2} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.103)$$

$$\sigma_{1,3} = 2\rho_{bat} \zeta_{1,1} \zeta_{1,2} + \zeta_{1,3} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.104)$$

$$\sigma_{1,4} = \rho_{bat} [\zeta_{1,2}^2 + 2\zeta_{1,1} \zeta_{1,3}] + \zeta_{1,4} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.105)$$

$$\sigma_{1,5} = 2\rho_{bat} [\zeta_{1,2} \zeta_{1,3} + \zeta_{1,1} \zeta_{1,4}] + \zeta_{1,5} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.106)$$

$$\sigma_{1,6} = \rho_{bat} [\zeta_{1,3}^2 + 2\zeta_{1,2} \zeta_{1,4} + 2\zeta_{1,1} \zeta_{1,5}] + \zeta_{1,6} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.107)$$

$$\sigma_{1,7} = 2\rho_{bat} [\zeta_{1,3} \zeta_{1,4} + \zeta_{1,2} \zeta_{1,5} + \zeta_{1,1} \zeta_{1,6}] + \zeta_{1,7} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.108)$$

$$\sigma_{1,8} = \rho_{bat} [\zeta_{1,4}^2 + 2\zeta_{1,3} \zeta_{1,5} + 2\zeta_{1,2} \zeta_{1,6} + 2\zeta_{1,1} \zeta_{1,7}] + \zeta_{1,8} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{1,0})] \quad (1.109)$$

$$\sigma_{1,9} = 2\rho_{bat} [\zeta_{1,4} \zeta_{1,5} + \zeta_{1,3} \zeta_{1,6} + \zeta_{1,2} \zeta_{1,7} + \zeta_{1,1} \zeta_{1,8}] \quad (1.110)$$

$$\sigma_{1,10} = \rho_{bat} [\zeta_{1,5}^2 + 2\zeta_{1,4} \zeta_{1,6} + 2\zeta_{1,3} \zeta_{1,7} + \zeta_{1,2} \zeta_{1,8}] \quad (1.111)$$

$$\sigma_{1,11} = 2\rho_{bat} [\zeta_{1,5} \zeta_{1,6} + \zeta_{1,4} \zeta_{1,7} + \zeta_{1,3} \zeta_{1,8}] \quad (1.112)$$

$$\sigma_{1,12} = \rho_{bat} [\zeta_{1,6}^2 + 2\zeta_{1,5} \zeta_{1,7} + 2\zeta_{1,4} \zeta_{1,8}] \quad (1.113)$$

$$\sigma_{1,13} = 2\rho_{bat} [\zeta_{1,6} \zeta_{1,7} + \zeta_{1,5} \zeta_{1,8}] \quad (1.114)$$

$$\sigma_{1,14} = \rho_{bat} [\zeta_{1,7}^2 + 2\zeta_{1,6} \zeta_{1,8}] \quad (1.115)$$

$$\sigma_{1,15} = 2\rho_{bat} \zeta_{1,7} \zeta_{1,8} \quad (1.116)$$

$$\sigma_{1,16} = \rho_{bat} \zeta_{1,8}^2 \quad (1.117)$$

Les coefficients associés à la phase stabilisée de la manœuvre, $\sigma_{2,i}$, sont définis sur (1.118)-(1.126).

$$\sigma_{2,0} = (P_{aux} + \zeta_{2,0}) [1 + \rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{2,0})] \quad (1.118)$$

$$\sigma_{2,1} = \zeta_{2,1} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{2,0})] \quad (1.119)$$

$$\sigma_{2,2} = \rho_{bat} \zeta_{2,1}^2 + \zeta_{2,2} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{2,0})] \quad (1.120)$$

$$\sigma_{2,3} = 2\rho_{bat} \zeta_{2,1} \zeta_{2,2} + \zeta_{2,3} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{2,0})] \quad (1.121)$$

$$\sigma_{2,4} = \rho_{bat} [\zeta_{2,2}^2 + 2\zeta_{2,1} \zeta_{2,3}] + \zeta_{2,4} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{2,0})] \quad (1.122)$$

$$\sigma_{2,5} = 2\rho_{bat} [\zeta_{2,2} \zeta_{2,3} + \zeta_{2,1} \zeta_{2,4}] \quad (1.123)$$

$$\sigma_{2,6} = \rho_{bat} [\zeta_{2,3}^2 + 2\zeta_{2,2} \zeta_{2,4}] \quad (1.124)$$

$$\sigma_{2,7} = 2\rho_{bat} \zeta_{2,3} \zeta_{2,4} \quad (1.125)$$

$$\sigma_{2,8} = \rho_{bat} \zeta_{2,4}^2 \quad (1.126)$$

Finalement, les coefficients associés à la dernière phase, $\sigma_{3,i}$, sont donnés par (1.127)-(1.143).

$$\sigma_{3,0} = (P_{aux} + \zeta_{3,0}) [1 + \rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.127)$$

$$\sigma_{3,1} = \zeta_{3,1} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.128)$$

$$\sigma_{3,2} = \rho_{bat} \zeta_{3,1}^2 + \zeta_{3,2} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.129)$$

$$\sigma_{3,3} = 2\rho_{bat} \zeta_{3,1} \zeta_{3,2} + \zeta_{3,3} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.130)$$

$$\sigma_{3,4} = \rho_{bat} [\zeta_{3,2}^2 + 2\zeta_{3,1} \zeta_{3,3}] + \zeta_{3,4} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.131)$$

$$\sigma_{3,5} = 2\rho_{bat} [\zeta_{3,2} \zeta_{3,3} + \zeta_{3,1} \zeta_{3,4}] + \zeta_{3,5} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.132)$$

$$\sigma_{3,6} = \rho_{bat} [\zeta_{3,3}^2 + 2\zeta_{3,2} \zeta_{3,4} + 2\zeta_{3,1} \zeta_{3,5}] + \zeta_{3,6} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.133)$$

$$\sigma_{3,7} = 2\rho_{bat} [\zeta_{3,3} \zeta_{3,4} + \zeta_{3,2} \zeta_{3,5} + \zeta_{3,1} \zeta_{3,6}] + \zeta_{3,7} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.134)$$

$$\sigma_{3,8} = \rho_{bat} [\zeta_{3,4}^2 + 2\zeta_{3,3} \zeta_{3,5} + 2\zeta_{3,2} \zeta_{3,6} + 2\zeta_{3,1} \zeta_{3,7}] + \zeta_{3,8} [1 + 2\rho_{bat} (P_{aux} + \zeta_{3,0})] \quad (1.135)$$

$$\sigma_{3,9} = 2\rho_{bat} [\zeta_{3,4} \zeta_{3,5} + \zeta_{3,3} \zeta_{3,6} + \zeta_{3,2} \zeta_{3,7} + \zeta_{3,1} \zeta_{3,8}] \quad (1.136)$$

$$\sigma_{3,10} = \rho_{bat} [\zeta_{3,5}^2 + 2\zeta_{3,4} \zeta_{3,6} + 2\zeta_{3,3} \zeta_{3,7} + \zeta_{3,2} \zeta_{3,8}] \quad (1.137)$$

$$\sigma_{3,11} = 2\rho_{bat} [\zeta_{3,5} \zeta_{3,6} + \zeta_{3,4} \zeta_{3,7} + \zeta_{3,3} \zeta_{3,8}] \quad (1.138)$$

$$\sigma_{3,12} = \rho_{bat} [\zeta_{3,6}^2 + 2\zeta_{3,5} \zeta_{3,7} + 2\zeta_{3,4} \zeta_{3,8}] \quad (1.139)$$

$$\sigma_{3,13} = 2\rho_{bat} [\zeta_{3,6} \zeta_{3,7} + \zeta_{3,5} \zeta_{3,8}] \quad (1.140)$$

$$\sigma_{3,14} = \rho_{bat} [\zeta_{3,7}^2 + 2\zeta_{3,6} \zeta_{3,8}] \quad (1.141)$$

$$\sigma_{3,15} = 2\rho_{bat} \zeta_{3,7} \zeta_{3,8} \quad (1.142)$$

$$\sigma_{3,16} = \rho_{bat} \zeta_{3,8}^2 \quad (1.143)$$

1.2.3.4 Consommation globale de la manœuvre

Nous pouvons désormais calculer la variation d'énergie dans la batterie due à la manœuvre, \tilde{E}_{mnv} , en intégrant la puissance en entrée de la batterie, \tilde{P}_{bat} , sur la durée de la manœuvre, selon qu'il est montré sur (1.144). \tilde{E}_{mnv} équivaut à la somme des variations d'énergie associées à chaque phase de la manœuvre, \tilde{E}_1 , \tilde{E}_2 et \tilde{E}_3 .

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{mnv}(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}) &= \int_0^{\tau_{mnv}} \tilde{P}_{bat}(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}, t) dt \\ &= \int_0^{\tau_1} \tilde{P}_{bat}(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}, t) dt + \int_{\tau_1}^{\tau_1+\tau_2} \tilde{P}_{bat}(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}, t) dt + \int_{\tau_1+\tau_2}^{\tau_{mnv}} \tilde{P}_{bat}(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}, t) dt \\ &= \tilde{E}_1(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}) + \tilde{E}_2(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}) + \tilde{E}_3(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}) \end{aligned} \quad (1.144)$$

Ainsi, la variation d'énergie dans la phase initiale, \tilde{E}_1 , allant de $t = 0$ à $t = \tau_1$, est donnée par (1.145).

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}) &= \int_0^{\tau_1} \tilde{P}_{bat}(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}, t) dt & (1.145) \\ &= \left[\begin{array}{l} \sigma_{1,0} t + \frac{\sigma_{1,1}}{2} t^2 + \frac{\sigma_{1,2}}{3} t^3 + \frac{\sigma_{1,3}}{4} t^4 + \frac{\sigma_{1,4}}{5} t^5 \\ + \frac{\sigma_{1,5}}{6} t^6 + \frac{\sigma_{1,6}}{7} t^7 + \frac{\sigma_{1,7}}{8} t^8 + \frac{\sigma_{1,8}}{9} t^9 \\ + \frac{\sigma_{1,9}}{10} t^{10} + \frac{\sigma_{1,10}}{11} t^{11} + \frac{\sigma_{1,11}}{12} t^{12} + \frac{\sigma_{1,12}}{13} t^{13} \\ + \frac{\sigma_{1,13}}{14} t^{14} + \frac{\sigma_{1,14}}{15} t^{15} + \frac{\sigma_{1,15}}{16} t^{16} + \frac{\sigma_{1,16}}{17} t^{17} \end{array} \right]_{t=0}^{t=\tau_1} \end{aligned}$$

La variation d'énergie de la phase stabilisée, \tilde{E}_2 , est donnée par (1.146).

$$\begin{aligned} \tilde{E}_2(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}) &= \int_{\tau_1}^{\tau_1+\tau_2} \tilde{P}_{bat}(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}, t) dt & (1.146) \\ &= \left[\begin{array}{l} \sigma_{2,0} t + \frac{\sigma_{2,1}}{2} t^2 + \frac{\sigma_{2,2}}{3} t^3 + \frac{\sigma_{2,3}}{4} t^4 + \frac{\sigma_{2,4}}{5} t^5 \\ + \frac{\sigma_{2,5}}{6} t^6 + \frac{\sigma_{2,6}}{7} t^7 + \frac{\sigma_{2,7}}{8} t^8 + \frac{\sigma_{2,8}}{9} t^9 \end{array} \right]_{t=\tau_1}^{t=\tau_1+\tau_2} \end{aligned}$$

Enfin, (1.147) permet de calculer la variation d'énergie dans la dernière phase de la manœuvre, \tilde{E}_3 .

$$\begin{aligned} \tilde{E}_3(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}) &= \int_{\tau_1+\tau_2}^{\tau_1+\tau_2+\tau_3} \tilde{P}_{bat}(\underline{\mathbf{y}}^0, \underline{\theta}, t) dt & (1.147) \\ &= \left[\begin{array}{l} \sigma_{3,0} t + \frac{\sigma_{3,1}}{2} t^2 + \frac{\sigma_{3,2}}{3} t^3 + \frac{\sigma_{3,3}}{4} t^4 + \frac{\sigma_{3,4}}{5} t^5 \\ + \frac{\sigma_{3,5}}{6} t^6 + \frac{\sigma_{3,6}}{7} t^7 + \frac{\sigma_{3,7}}{8} t^8 + \frac{\sigma_{3,8}}{9} t^9 \\ + \frac{\sigma_{3,9}}{10} t^{10} + \frac{\sigma_{3,10}}{11} t^{11} + \frac{\sigma_{3,11}}{12} t^{12} + \frac{\sigma_{3,12}}{13} t^{13} \\ + \frac{\sigma_{3,13}}{14} t^{14} + \frac{\sigma_{3,14}}{15} t^{15} + \frac{\sigma_{3,15}}{16} t^{16} + \frac{\sigma_{3,16}}{17} t^{17} \end{array} \right]_{t=\tau_1+\tau_2}^{t=\tau_1+\tau_2+\tau_3} \end{aligned}$$

Le calcul de \tilde{E}_{mnv} est relativement complexe car il demande de déterminer un nombre important de coefficients et parce que les polynômes considérés sont d'ordre important. De ce fait, la modélisation que nous venons de présenter n'est pas envisageable en l'état pour une application embarquée. En revanche, ce modèle devrait permettre de réduire de manière importante le coût de calcul de la consommation associée à une manœuvre de conduite, réduisant donc le temps nécessaire pour optimiser la dynamique du véhicule *hors ligne*. En outre, la formulation proposée a aussi l'avantage d'être dérivable par rapport aux paramètres du profil trapézoïdal, ce qui permet de calculer un gradient de consommation. Cela pourrait être exploité par des algorithmes d'optimisation, ainsi que pour analyser l'effet de chaque paramètre sur la consommation associée à la manœuvre. Il s'agit d'une perspective à explorer, non traitée à cause de la complexité des calculs impliqués.

1.2.4 Simulation de la consommation des manœuvres

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de la simulation des différentes variables associées à la consommation d'énergie au cours d'une manœuvre de conduite. Cela nous permettra aussi d'évaluer la pertinence de la modélisation analytique proposée dans la section précédente. Nous allons suivre le même format des autres sections, en décomposant la modélisation par sous-systèmes, notamment : *Véhicule*, *Motorisation* et *Batterie*. Ensuite nous comparerons la qualité globale de l'approximation analytique et le coût de calcul associé à chaque approche de modélisation.

Le calcul numérique de polynômes d'ordre important peut poser des problèmes. Toutefois, nous avons testé les résultats des calculs à *double précision* en utilisant Matlab [132], en les comparant avec des calculs d'*arithmétique à précision variable*, en utilisant la fonction *vpa* de sa Toolbox de Calcul Symbolique. L'analyse a montré que les résultats des calculs en double précision sont pertinents¹³, observation confirmée par les résultats que nous verrons par la suite.

1.2.4.1 Véhicule

La Figure 1.17 présente les résultats de simulation de la force à appliquer sur le véhicule pour pouvoir réaliser la manœuvre, $F_{veh}(t)$. Nous présentons une accélération et une décélération (les mêmes que celles considérées dans la section III.1.2.1.2). Sur les différentes courbes, nous comparons les résultats issus du *modèle physique*, conçu avec Simulink, avec ceux obtenus en appliquant le *modèle analytique*. De plus, afin de vérifier la pertinence de ces derniers, nous avons également simulé la valeur de F_{veh} en utilisant le modèle analytique de l'organe (cf. section III.1.1.2.1), mais en réalisant l'intégration de manière numérique, en utilisant une méthode trapézoïdale.

La comparaison entre les résultats issus des équations et ceux issus de l'intégration numérique nous permet de valider le modèle (1.57). De plus, la proximité entre les courbes associées aux modèles analytique et physique nous permet de valider la représentativité de la modélisation analytique.

En outre, nous constatons que le profil de $F_{veh}(t)$ garde une forme assez proche du trapèze d'accélération ; cela étant particulièrement vrai dans le scénario urbain. Cela montre que, lors des manœuvres de conduite, la force devant être appliquée au véhicule est majoritairement dédiée à la réalisation du profil d'accélération. De ce fait, la sollicitation en couple de la motorisation est majoritairement associée à l'accélération du véhicule. Pour nuancer ce propos, il est nécessaire de dire que cela peut varier en fonction de différents facteurs, comme le style de conduite et la pente.

Le fait que l'amplitude de la force nécessaire à l'exécution de la manœuvre d'accélération soit supérieure à celle associée à la décélération est dû à que les efforts résistifs, F_{res} ,

¹³. Pour l'exemple que nous avons étudié, représentatif des données réelles, nous avons obtenu une erreur de l'ordre de 4×10^{-14} % entre le résultat obtenu à partir de l'*arithmétique à précision variable* (avec une précision de 256 chiffres) et les résultats en double précision.

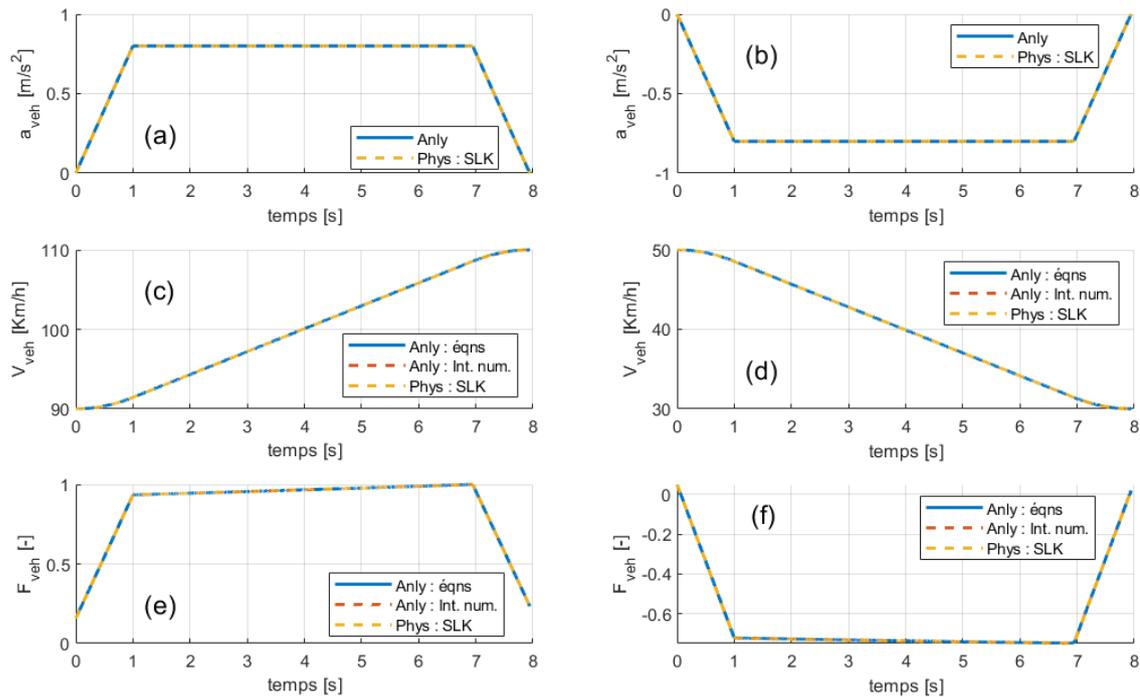


FIG. 1.17 – Résistance à l’avancement longitudinal au cours d’une manœuvre, F_{veh} , en fonction du temps ; la dynamique du véhicule est représentée par a_{veh} et V_{veh} . (a), (c) et (e) correspondent à une accélération en conduite extra-urbaine ; (b), (d) et (f) correspondent à une décélération en conduite urbaine. Anly : éqns : calculs analytiques issus des modèles de la section 1.2.3.1 ; Anly : int. num. : résultats, par intégration numérique, basés sur les modèles analytiques des organes ; Phys : SLK : résultats du modèle physique, en utilisant Simulink. Les valeurs de F_{veh} ont été normalisées à 1, avec une référence commune.

doivent être vaincus pendant l’accélération, alors qu’ils contribuent à décélérer le véhicule dans le deuxième cas.

1.2.4.2 Motorisation

La Figure 1.18 présente les points de fonctionnement de la ME, en régime et en couple, sous la forme des profils temporels, $\omega_{me}(t)$ et $T_{me}(t)$, respectivement, pour les deux manœuvres considérées. De même, elle présente la puissance en entrée de la motorisation $P_{mot}(t)$. Elle permet de valider les modèles de la section III.1.2.3.2 (comparaison des courbes Anly : éqns et Anly : int. num.), ainsi que de montrer la pertinence des approximations analytiques proposées sur la section III.1.1.2.2 (comparaison des courbes Anly et Phys : SLK).

Nous constatons que l’amplitude du couple demandé à la motorisation est plus importante dans le cas de la manœuvre d’accélération. De même, lors de la manœuvre de décélération il y a un changement de signe dans le couple fourni par la motorisation. C’est deux phénomènes sont dus au fait que, pendant les phases de roulage à vitesse stabilisée (et pente non-négative) la motorisation doit fournir de l’énergie afin de compenser les efforts s’opposant à l’avancement du véhicule ($F_{pente}(\alpha_r)$ et $F_{res}(V_{veh})$) ; cela est aussi le cas en début et à la fin des manœuvres, où la valeur de décélération souhaitée est inférieure à

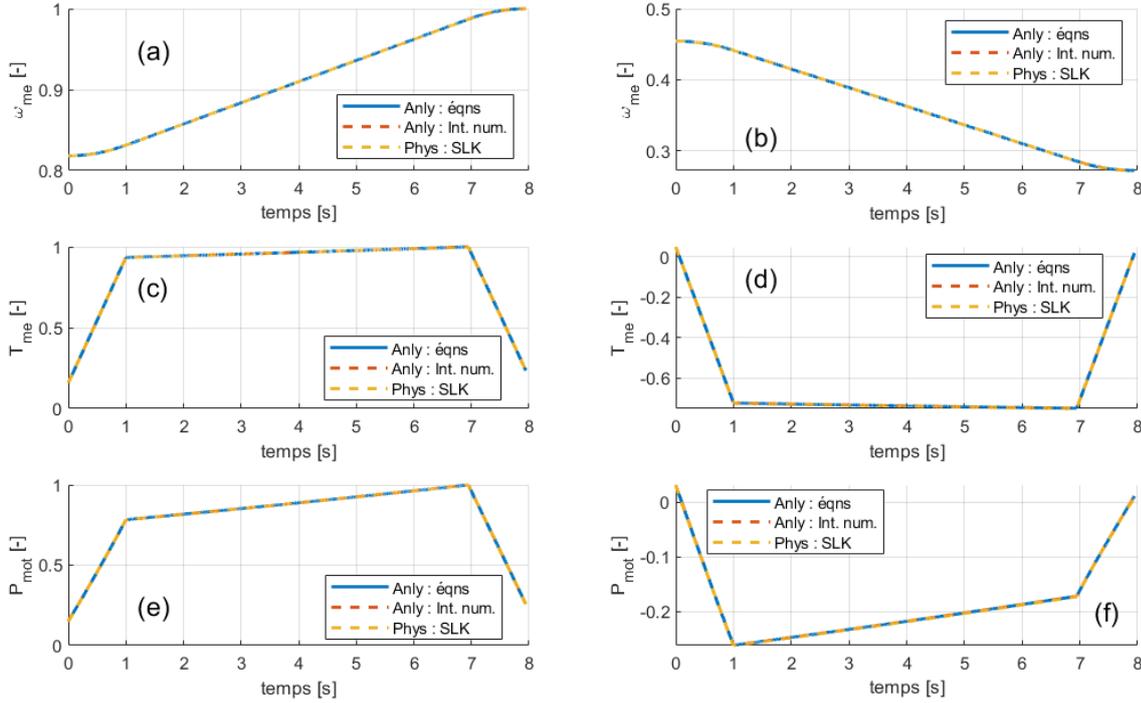


FIG. 1.18 – Points de fonctionnement, $\omega_{me} - T_{me}$, et puissance en entrée de la motorisation, P_{mot} , en fonction du temps. (a), (c) et (e) correspondent à une accélération en conduite extra-urbaine ; (b), (d) et (f) correspondent à une décélération en conduite urbaine. Anly : éqns : calculs analytiques issus des modèles de la section III.1.2.3.2 ; Anly : int. num. : résultats, par intégration numérique, basés sur les modèles analytiques des organes ; Phys : SLK : résultats du modèle physique, en utilisant Simulink. Les différentes unités ont été normalisées à 1, avec une référence commune entre les deux manœuvres.

la *décélération naturelle* du véhicule, sous l'action de ses propres pertes. De ce fait, pendant une partie de la manœuvre de décélération, la motorisation doit fournir de l'énergie au véhicule.

En outre, les puissances en jeu lors la manœuvre en scénario extra-urbain sont bien plus importantes que celles du scénario urbain. Cela est dû aux ordres de grandeur des vitesses, qui se traduisent par des régimes de la ME plus importants.

La Figure 1.19 présente les valeurs instantanées des pertes dans la motorisation $P_{mot}^{prt}(t)$, et de son rendement $\eta_{mot}(t)$. Le rendement de la motorisation doit tenir compte du *sens* des transformations de l'énergie et est défini par (1.148), où $P_{gmp} = \omega_{me} T_{me}$. Les unités de P_{mot}^{prt} et η_{mot} ont été normalisées, voulant dire, notamment, qu'une valeur $\eta_{mot} = 1$ n'indique pas que la machine n'a pas de pertes, mais qu'elle est sur son meilleur point de fonctionnement au cours des manœuvres considérées. De plus, nous n'avons pas calculé de manière analytique le rendement de la motorisation donc, pour η_{mot} , seules les courbes associées à la modélisation *physique* et à l'intégration numérique à partir des modèles analytiques sont présentées.

$$\eta_{mot}(t) = \begin{cases} \frac{P_{gmp}}{P_{mot}} = \frac{P_{mot} - P_{mot}^{prt}}{P_{mot}} & , (P_{gmp} \geq 0) = (P_{mot} \geq P_{mot}^{prt}) \\ \frac{P_{mot}}{P_{gmp}} = \frac{P_{mot}}{P_{mot} - P_{mot}^{prt}} & , (P_{gmp} < 0) = (P_{mot} < P_{mot}^{prt}) \end{cases} \quad (1.148)$$

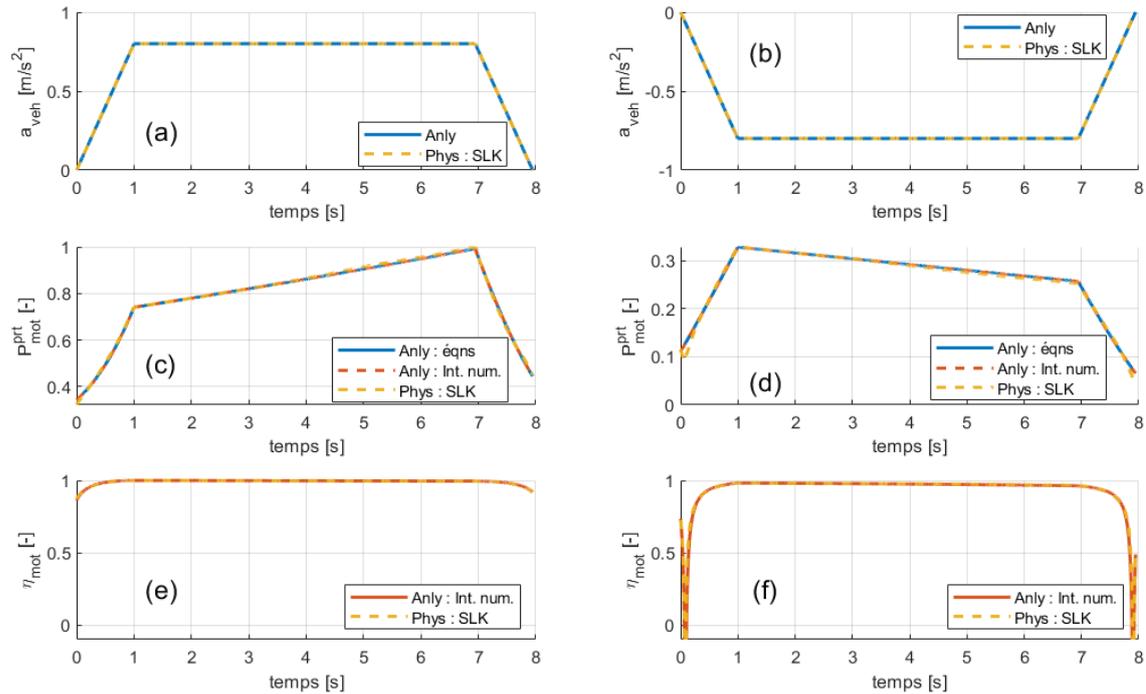


FIG. 1.19 – Pertes, P_{mot}^{prt} et rendement, η_{mot} , de la motorisation, au cours d'une manœuvre, en fonction du temps. (a), (c) et (e) correspondent à une accélération en conduite extra-urbaine ; (b), (d) et (f) correspondent à une décélération en conduite urbaine. Anly : éqns : calculs analytiques issus des modèles de la section III.1.2.3.2 ; Anly : int. num. : résultats, par intégration numérique, basés sur les modèles analytiques des organes ; Phys : SLK : résultats du modèle physique, en utilisant Simulink. Les différentes unités ont été normalisées à 1, avec une référence commune entre les deux manœuvres.

Le lecteur aura noté la présence des valeurs négatives de rendement sur la Figure 1.19f. Cela correspond à des instants où, pour pouvoir prélever de l'énergie cinétique (ou potentielle) emmagasinée dans le véhicule, en accord avec le profil trapézoïdal d'accélération, il est nécessaire de décharger la batterie, pour compenser les pertes dans la motorisation. On peut dire qu'il faut payer pour pouvoir dissiper de l'énergie. Toutefois, la durée des épisodes à rendement négatif étant extrêmement faibles et les ordres de grandeur des énergies en jeu étant modérés, l'impact de ces phases sur la consommation totale de la manœuvre devrait être relativement faible.

Un autre phénomène à considérer est l'erreur dans le calcul analytique des pertes dans la motorisation au début et à la fin des manœuvres de décélération. Elle est due à la difficulté à approximer, en utilisant le modèle analytique, le comportement de la cartographie des pertes dans la motorisation (cf. Éq. (1.9)) au voisinage des zones à couple réduit ; cela a été discuté dans la section III.1.1.2.2. Toutefois, du fait que, au cours de la manœuvre, la motorisation passe peu de temps dans des zones à faible couple, et que les valeurs de puissance en jeu à ce moment sont relativement faibles, on peut espérer que ces imprécisions aient un impact modéré sur la consommation totale de la manœuvre.

1.2.4.3 Batterie

La Figure 1.20 présente l'évolution des signaux associés à la batterie, au cours des deux manœuvres : une accélération en conduite extra-urbaine, et une décélération en conduite urbaine. Les signaux considérés sont les pertes dans la batterie, P_{bat}^{prt} , la variation instantanée d'énergie stockée, P_{bat} , et son état de charge, SoC . Pour le calcul analytique des pertes dans la batterie, nous nous sommes contentés de soustraire les résultats des équations (1.100) et (1.99)¹⁴, de la forme $\tilde{P}_{bat}^{loss} = \tilde{P}_{bat} - \tilde{P}_{elec}$. L'état de charge de la batterie est donné uniquement pour la simulation du modèle *physique*, la modélisation analytique ne tenant pas compte de l'évolution de ce paramètre. Lors de nos simulations nous avons considéré $P_{aux} = 300 [W]$, ce qui correspond à une consommation due aux auxiliaires assez modérée. Aussi, les états de la batterie considérés sont : $SoC = 70 [\%]$ et $\Theta = 30 [^{\circ}C]$.

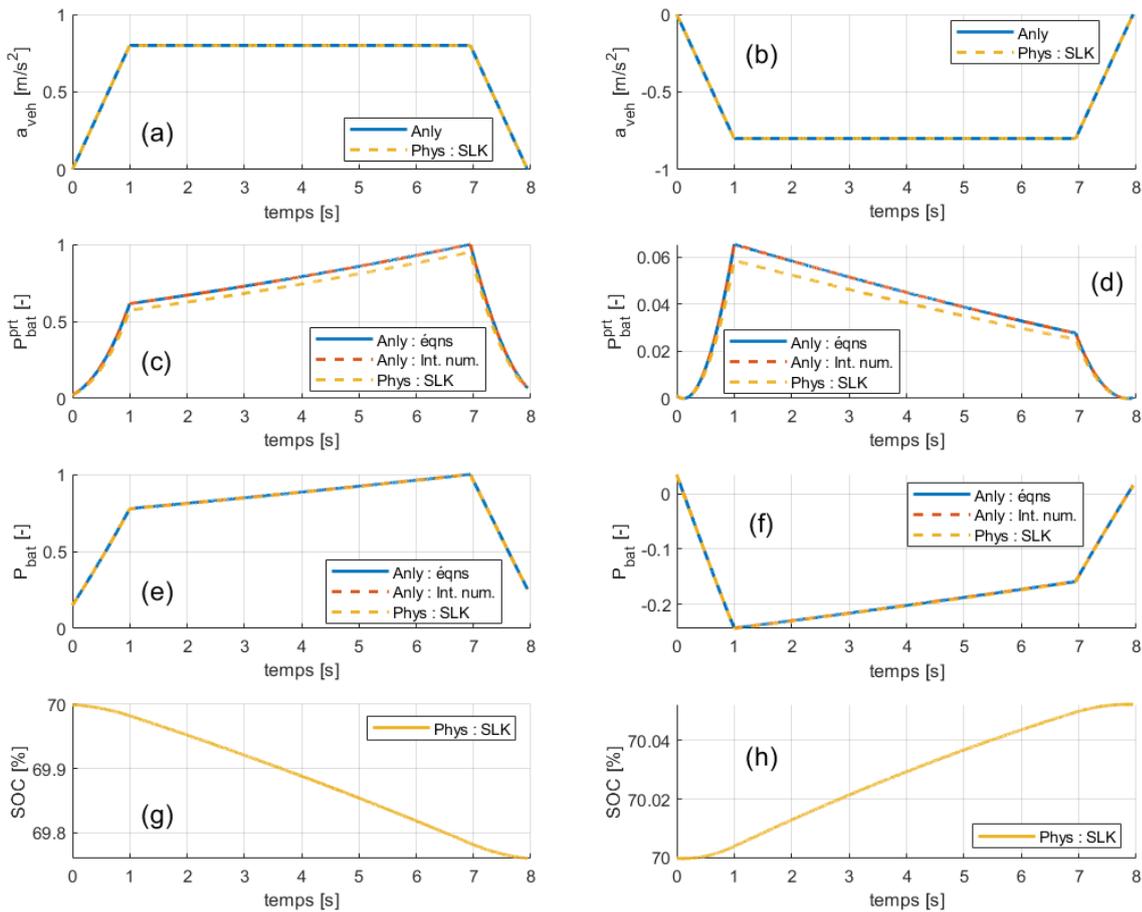


FIG. 1.20 – Pertes, P_{bat}^{prt} , puissance, P_{bat} , et état de charge de la batterie, SoC , au cours d'une manœuvre, en fonction du temps. (a), (c) et (e) correspondent à une accélération en conduite extra-urbaine ; (b), (d) et (f) correspondent à une décélération en conduite urbaine. Anly : éqns : calculs analytiques issus des modèles de la section 1.2.3.2 ; Anly : int. num. : résultats, par intégration numérique, basés sur les modèles analytiques des organes ; Phys : SLK : résultats du modèle physique, en utilisant Simulink. Les unités de P_{bat}^{prt} et P_{bat} ont été normalisées à 1, avec une référence commune entre les deux manœuvres.

14. On aurait pu également calculer analytiquement $\tilde{P}_{bat}^{loss} = \rho_{bat} \tilde{P}_{elec}^2$, en utilisant l'expression de \tilde{P}_{elec}^2 donnée sur l'Annexe III.

Nous constatons que le modèle analytique surestime légèrement les pertes dans la batterie, \tilde{P}_{bat}^{loss} ; en revanche, la forme globale du profil des pertes est respectée. De même, concernant la puissance batterie, \tilde{P}_{bat} , les modèles physique et analytique donnent des résultats assez similaires, montrant la validité de la modélisation analytique proposée.

En comparant les ordres de grandeur entre les deux manœuvres, on trouve des valeurs de puissance \tilde{P}_{bat} plus importantes pour la manœuvre d'accélération. Cela est probablement dû à la conjonction d'au moins deux phénomènes : d'une part, le premier scénario correspond à un roulage extra-urbain, ce qui implique une vitesse du véhicule plus importante et donc des variations d'énergie plus conséquentes. Aussi, tel que mentionné précédemment, la résistance du véhicule à l'avancement doit être vaincue lors de la manœuvre d'accélération, alors qu'elle contribue à décélérer le véhicule lors des décélérations.

Nous observons aussi que les pertes dans la batterie sont beaucoup moins importantes pour la manœuvre urbaine ; cela en raison des niveaux plus faibles de P_{elec} associés à cette manœuvre (nous rappelons que, à l'ordre 1, les pertes dans la batterie sont proportionnelles au carré de P_{elec}). Cela met en évidence la sensibilité de \tilde{P}_{bat}^{loss} aux variations dans la puissance sollicitée à la batterie.

En outre, la variation de *SoC* semble cohérente pour chaque manœuvre. Nous notons aussi que, dans le cas de la conduite extra-urbaine, l'exécution d'une seule manœuvre semble suffire pour produire un effet observable sur l'état de charge de la batterie.

1.2.4.4 Consommation globale et performances des modèles

Finalement, nous allons porter notre intérêt sur la précision du modèle *analytique*, par rapport au modèle *physique*, dans le calcul de la variation totale d'énergie dans la batterie au cours de la manœuvre, E_{mnv} . Nous utiliserons comme référence la valeur issue du modèle *physique* implémenté en Simulink (notée « Phys: SLK. »), avec un pas de calcul $\Delta t = 0.001[s]$. La même valeur a été utilisée pour l'intégration numérique, à partir des modèles analytiques (notée « Anly: Int. num. »). Les calculs purement analytiques seront notés « Anly: éqns. » Le Tableau 1.1 présente les valeurs de E_{mnv} pour chaque modèle, ainsi que l'erreur relative par rapport à la valeur du modèle *physique*.

Manœuvre	Valeur	Phys: SLK	Anly: éqns	Anly: Int. num.
Accélération	E_{mnv} [J]	3.9548×10^5	3.963×10^5	3.9616×10^5
	Erreur relative	0 %	0.20567 %	0.17065 %
Décélération	E_{mnv} [J]	-8.6296×10^4	-8.5935×10^4	-8.5905×10^4
	Erreur relative	0 %	-0.41879 %	-0.45289 %

TAB. 1.1 – Comparaison de la précision des modèles de variation totale d'énergie dans la batterie, lors d'une manœuvre

Nous pouvons voir que les modèles *Anly: éqns* et *Anly: Int. num.* permettent d'obtenir des valeurs de E_{mnv} assez similaires. De plus, dans les deux cas, les résultats sont assez proches de ceux obtenus grâce aux modèles physiques, avec Simulink. Tel qu'on pouvait

l'espérer, les estimations sont moins précises lors qu'il s'agisse de la manœuvre de décélération, mais les valeurs restent tout de même représentatives. Cela montre que la fonction analytique $\tilde{E}_{mnv}(\mathbf{y}^0, \theta)$, donnée par (1.144), permet d'estimer de manière acceptable la variation totale d'énergie dans la batterie associée à une manœuvre, en fonction des états initiaux du véhicule et de la batterie, \mathbf{y}^0 , et des paramètres de la manœuvre, θ .

Désormais, il reste à savoir si la modélisation analytique permet de réduire le coût de calcul, par rapport à la modélisation physique. Pour ce faire, nous avons conçu des modèles *physique* et *analytique* minimalistes, c'est-à-dire, se limitant aux calculs strictement nécessaires à déterminer E_{mnv} . De plus, nous avons décidé d'optimiser la performance du modèle Simulink, en utilisant le mode de simulation *Accelerator* de Simulink¹⁵ qui, entre autres, épargne l'utilisation du compilateur C à chaque simulation, en réduisant donc le temps de calcul. Pour le modèle *physique*, développé sur Simulink, nous avons gardé $\Delta t = 0.001[s]$. Nous nous sommes limités à analyser les performances du calcul de la manœuvre d'accélération. Chaque modèle a été exécuté 100 fois, dans un ordinateur portable récemment allumé et branché sur secteur¹⁶; le processeur utilisé est un Intel Core i7-9750, de neuvième génération, avec une horloge à 2,60 GHz, et avec 16 Go de mémoire RAM DDR4. De plus, afin de garantir la répétabilité des tests (en augmentant le déterminisme du système opératif), pendant leur exécution nous avons limité le nombre de programmes ouverts dans l'ordinateur, laissant seulement, en dehors de Matlab, ceux qui tournaient en arrière-plan. Les temps de calcul associés aux simulations sont présentés sur la Figure 1.21.

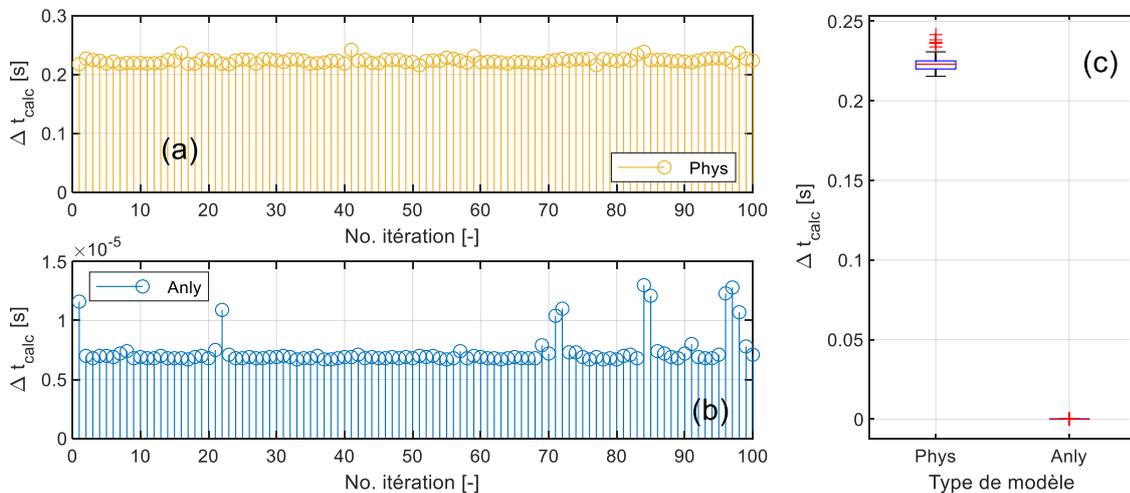


FIG. 1.21 – Comparaison des temps de calculs, Δt_{calc} , des modélisations énergétiques des manœuvres. Le Modèle Simulink a été exécuté en Mode Accelerator. Pour chaque modèle, 100 itérations ont été exécutées. (a) Δt_{calc} du modèle physique, (b) Δt_{calc} du modèle analytique, (c) comparaison des durées des deux modèles

Le Tableau 1.2 présente des statistiques associées aux temps d'exécution des calculs. Il existe une énorme différence entre le coût de calcul, Δt_{calc} , des deux modèles. La DAM a été calculé en utilisant $b = 1.4826$, ce qui correspond à une distribution gaussienne de

16. Le processeur devait donc être à une température relativement faible. Cela, en plus du fait que l'ordinateur soit relié à une source d'alimentation, ciblait à garantir les performances du processeur.

la dispersion (cf. section II.3.2.4). Nous constatons que, en médiane, le modèle analytique peut être exécuté plus de 30 000 fois plus vite que le modèle physique !

$\Delta t_{\text{calc}}[\text{s}]$ (Médiane \pm DAM)		$\frac{\Delta t_{\text{calc}}^{\text{phys}}}{\Delta t_{\text{calc}}^{\text{anly}}} [\%]$
Phys : SLK	Anly : éqns	
0.2230 ± 0.0038	$6.9000 \times 10^{-6} \pm 1.4826 \times 10^{-7}$	$3.2324 \times 10^6 [\%]$

TAB. 1.2 – Comparaison des temps de calculs des modélisations énergétiques des manœuvres - Modèle Simulink en Mode Accelerator

En outre, il faut mentionner que, les équations associées à la modélisation physique, présentées sur la section III.1.2.3, sont fortement redondantes dans la mesure où beaucoup des coefficients impliquent de réaliser les mêmes calculs. Il y a donc des fortes possibilités pour améliorer davantage le coût de calcul de ce modèle, en temps et en mémoire.

Dans cette section, nous avons donc montré que la modélisation proposée permet de réduire de manière conséquente le coût de calcul associé à la détermination de la consommation d'un VE pendant une manœuvre. Cela devrait permettre de rendre envisageable l'optimisation *hors ligne* du comportement dynamique du véhicule lors des manœuvres, sur un nombre important de scénarios de conduite. Nous allons ensuite nous intéresser à comment représenter, de manière visuelle, les manœuvres de conduite, afin de faciliter la compréhension de la performance énergétique du véhicule.

1.3 REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE DES MANŒUVRES DE CONDUITE

Objectif de la section

Proposer une représentation des manœuvres de conduite, facilitant l'analyse de leur performance énergétique

Dans cette section, nous proposerons une méthode de représentation du comportement du véhicule, pendant une manœuvre de conduite, permettant d'avoir un regard critique et intuitif sur la performance énergétique du GMP. Celle-ci est basée sur l'affichage des points de fonctionnement de la motorisation sur une cartographie de rendement énergétique. En revanche, on ne peut pas se contenter d'afficher la cartographie des pertes dans la motorisation, dans la mesure où il existe des pertes associées à la batterie (cf. section III.1.1.1). De plus, il existe une interaction entre ces deux organes du fait que la tension de la batterie U_{bat} est affectée par la puissance demandée par la motorisation, P_{mot} , mais elle affecte aussi cette puissance, dans la mesure où les pertes dans la motorisation P_{mot}^{prt} dépendent de la tension batterie.

16. En principe, nous aurions pu utiliser le mode *Fast Accelerator*, mais cela demande une re-conception de tout le modèle Simulink, et en particulier de l'ensemble des cartographies.

Nous proposerons donc une méthodologie pour déterminer les pertes et le rendement de la motorisation et de la batterie, à partir des données cartographiées associées à la modélisation *physique* de ces organes (sections III.1.1.1.2 et III.1.1.1.3, respectivement). Pour ce faire, nous allons définir un *point de fonctionnement du GMP* comme un ensemble de cinq variables : la température Θ_{bat} , et l'état de charge *SoC*, de la batterie, la demande de puissance des consommateurs (climatisation incluse) P_{aux} , et le régime et couple de la ME, ω_{me} et T_{me} . En connaissant ces cinq variables, il est possible de déterminer la puissance demandée à chaque organe, ainsi que les pertes et le rendement associés.

1.3.1 Cartographie de tension de la batterie

Comme vu en section III.1.1.1.2, les pertes dans la motorisation P_{mot}^{prt} , et donc le rendement de cet organe, dépendent de trois variables, notamment ω_{me} , T_{me} et U_{bat} , tel que présenté sur (1.9). Du fait de la dépendance avec la tension de la batterie, la connaissance de la sollicitation mécanique, associée au comportement cinématique du véhicule, ne suffit pas pour déterminer la consommation d'énergie associée à la motorisation ; on doit aussi connaître ce qui se passe du côté de l'onduleur.

Pour commencer, nous présentons sur (1.149) la puissance demandée à la batterie, P_{elec} , en faisant apparaître la dépendance avec ω_{me} , T_{me} , U_{bat} et P_{aux} .

$$P_{elec}(\omega_{me}, T_{me}, U_{bat}, P_{aux}) = \omega_{me} T_{me} + P_{mot}^{prt}(\omega_{me}, T_{me}, U_{bat}) + P_{aux} \quad (1.149)$$

Il est possible de déterminer la tension de la batterie si, en plus de connaître ω_{me} et T_{me} , on connaît ses états, *SoC* et Θ_{bat} , et si on connaît aussi la demande de puissance auxiliaires, P_{aux} . Pour ce faire, nous allons combiner les équations (1.14), (1.21) et (1.149), en faisant ressortir la dépendance avec le point de fonctionnement du GMP :

$$\begin{aligned} U_{bat} &= OCV(SoC) - R_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, I_{bat}) \cdot I_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}, U_{bat}) \\ &= h_1(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}, U_{bat}) \end{aligned} \quad (1.150)$$

Nous constatons que (1.150) est une fonction implicite (il existe une boucle algébrique), dans la mesure où il est nécessaire de connaître U_{bat} pour pouvoir calculer sa valeur. Il n'est donc pas possible de déterminer *directement* la valeur de U_{bat} correspondant à un point de fonctionnement du GMP. En revanche, il existe une astuce numérique permettant de déterminer une valeur *vraisemblable* de U_{bat} qui, sous certaines hypothèses, correspond à la valeur physique que la batterie devrait avoir sur ce point de fonctionnement. Pour cela, nous définissons la fonction h_1^U suivante :

$$h_1^U(\check{U}_{bat}) = \check{U}_{bat} - h_1(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}, \check{U}_{bat}). \quad (1.151)$$

Nous ferons l'hypothèse que la fonction $h_1^U(\check{U}_{bat})$ change de signe une seule fois (dans une plage de valeurs *acceptables* de \check{U}_{bat} , définie par \hat{U}_b et \check{U}_b), ce qui correspond à dire que la tension batterie présente *un seul point d'équilibre* associé au point de fonctionnement du GMP. Sous ces conditions, la tension aux bornes de la batterie est donnée par (1.152).

$$U_{bat} = \check{U}_{bat}^* = \arg \check{U}_{bat} \in [\check{U}_b, \check{U}_b] \left\{ h_1^U(\check{U}_{bat}) = 0 \right\} \quad (1.152)$$

Sous l'hypothèse d'un seul point d'équilibre, cette équation peut être reformulée pour correspondre à un problème d'optimisation, selon qu'il est montré sur (1.153).

$$U_{bat} = \check{U}_{bat}^* = \underset{\check{U}_{bat} \in [\check{U}_b, \check{U}_b]}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left[h_1^U(\check{U}_{bat}) \right]^2 \right\} \quad (1.153)$$

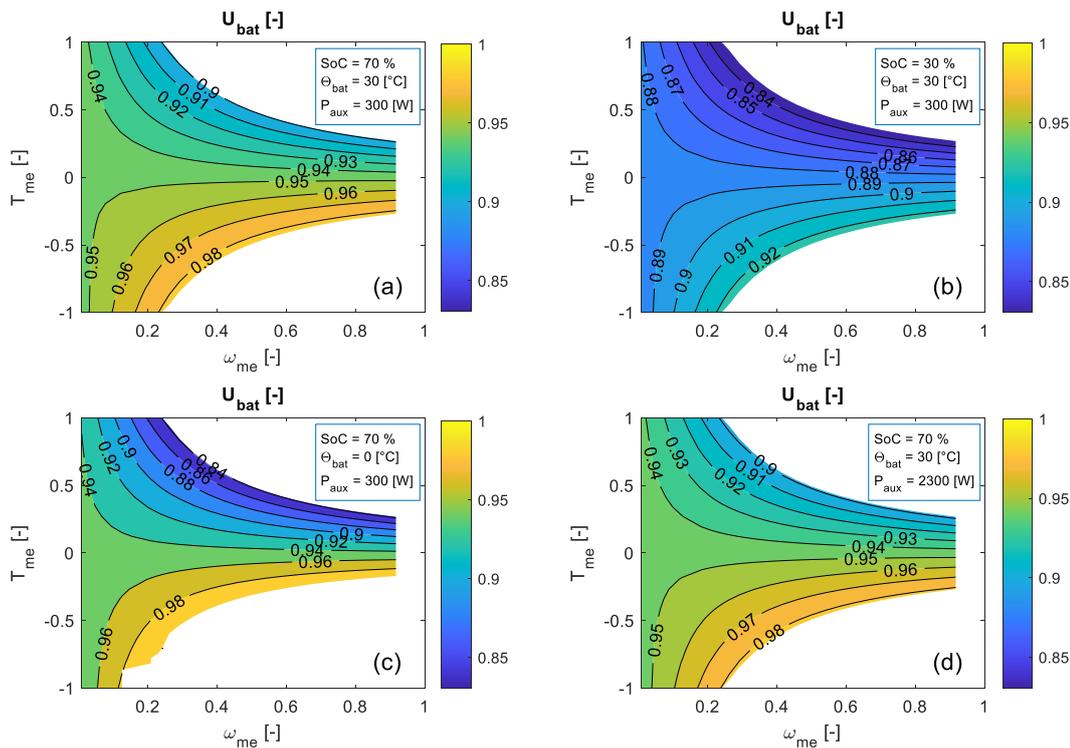


FIG. 1.22 – Tension de la batterie, U_{bat} , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC, Θ_{bat} et P_{aux} . (a) SoC = 70%, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (b) SoC = 30%, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (c) SoC = 70%, $\Theta_{bat} = 0[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (d) SoC = 70%, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 2300[\text{W}]$. Toutes les unités ont été normalisées à 1, sur une base commune.

En revanche, pour notre étude, nous avons pris une approche différente, qui nous permet en même temps de vérifier le respect de l'hypothèse du point d'équilibre unique. Pour chaque point de fonctionnement du GMP, nous avons calculé la valeur de la fonction h_1 pour un bon nombre de valeurs de U_{bat} dans la plage entre \hat{U}_b et \check{U}_b . Ensuite, nous avons réalisé une interpolation de la fonction $\check{U}_{bat}(h_1^U)$ pour calculer la valeur de U_{bat} correspondant à $h_1^U = 0$. Les fonctions d'interpolation vérifient que le vecteur des abscisses soit monotone (croissant ou décroissant), ce qui est une condition suffisante (donc plus forte) que l'hypothèse d'un seul point d'équilibre. L'adéquate exécution de l'interpolation garanti donc pertinence des résultats obtenus, au prix d'un temps de calcul plus important. Ainsi, en balayant des valeurs de SoC, Θ_{bat} , ω_{me} et T_{me} et P_{aux} , il est possible de générer une nouvelle cartographie sous la forme (1.154) correspondant, cette fois-ci, à une fonction explicite.

$$U_{bat} = h_2(\text{SoC}, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) \quad (1.154)$$

La Figure 1.22 présente les valeurs normalisées de U_{bat} , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} . La Figure 1.22a sert de référence d'un point de fonctionnement *nominal*, alors que les Figures 1.22b-d étudient chacune l'effet de la variation d'un paramètre sur U_{bat} . Cela met en évidence que la tension aux bornes de la batterie est assez sensible à l'état de charge et à la température de la batterie, alors qu'elle l'est moins à la demande de puissance venant des auxiliaires. Cela suggère que la valeur de P_{aux} a peu d'influence sur le rendement de la motorisation.

1.3.2 Motorisation

Grâce à l'équation (1.154) nous pouvons désormais tenir compte de l'effet de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} sur la consommation de la motorisation. Elle permet de considérer que, lors d'une sollicitation en couple à la motorisation, positive ou négative, il y aura soit une chute soit une montée de tension de la batterie, avec des implications sur le rendement de la première.

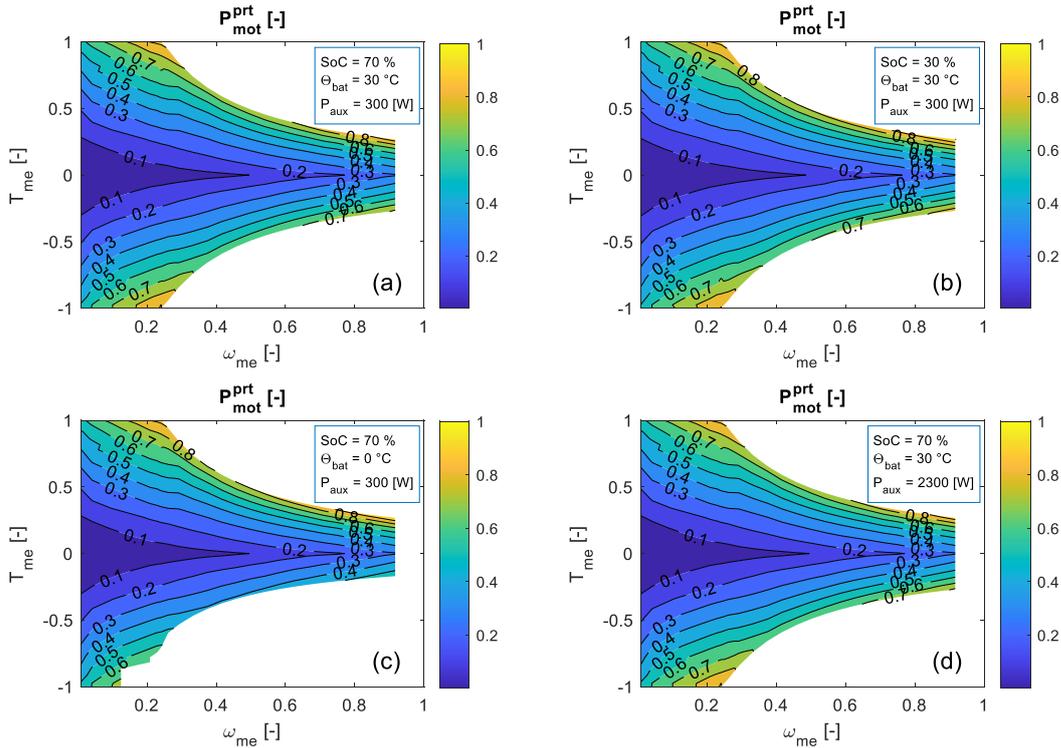


FIG. 1.23 – Pertes dans la motorisation, P_{mot}^{prt} , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} . (a) $\text{SoC} = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (b) $\text{SoC} = 30\%$, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (c) $\text{SoC} = 70\%$, $\Theta_{bat} = 0[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (d) $\text{SoC} = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 2300[\text{W}]$. Toutes les unités ont été normalisées à 1, sur une base commune.

Comme l'équation (1.149) nous le rappelle, les pertes dans la motorisation, P_{mot}^{prt} , dépendent de ω_{me} , T_{me} et U_{bat} . Ainsi, en intégrant (1.9) et (1.154), il est possible d'obtenir

une nouvelle cartographie sous la forme donnée par (1.155), reliant les pertes dans la motorisation au point de fonctionnement du GMP.

$$P_{mot}^{prt} = h_3 (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) \quad (1.155)$$

La puissance à l'entrée de la motorisation peut donc être calculée comme suit :

$$P_{mot} (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) = P_{mot}^{prt} (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + \omega_{me} T_{me} \quad (1.156)$$

Ainsi, si l'on souhaite calculer le rendement de la motorisation pour un point de fonctionnement donné, où $\omega_{me} \geq 0$, il suffit d'appliquer (1.157).

$$\eta_{mot} (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) = \begin{cases} \frac{\omega_{me} T_{me}}{P_{mot}^{prt} (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + \omega_{me} T_{me}} & , T_{me} \geq 0 \\ \frac{P_{mot}^{prt} (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + \omega_{me} T_{me}}{\omega_{me} T_{me}} & , T_{me} < 0 \end{cases} \quad (1.157)$$

La Figure 1.23 présente les pertes dans la motorisation P_{mot}^{prt} , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour quatre combinaisons de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} . Le résultat correspond bien à nos attentes : une très légère augmentation des pertes lorsque P_{aux} augmente et un incrément plus important quand l'état de charge ou la température de la batterie diminue. La variation maximale dans les pertes, par rapport à la référence de la Figure 1.23a, correspond au 5.57% des pertes maximales dans le cas de référence.

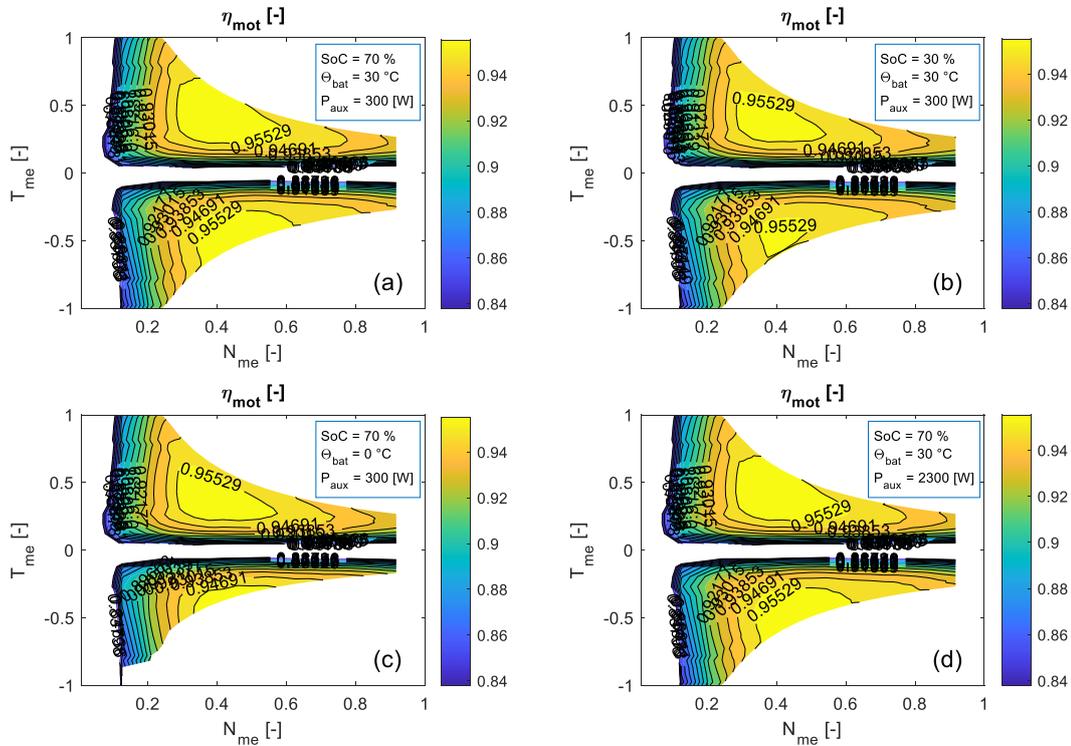


FIG. 1.24 – Rendement de la motorisation, η_{mot} , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} . (a) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (b) $SoC = 30\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (c) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 0 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (d) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 2300 [W]$. Toutes les unités ont été normalisées à 1, sur une base commune. Pour simplifier la lecture, on n'affiche que les points de fonctionnement dont le rendement normalisé est supérieur à 0.84.

La Figure 1.24 présente le rendement *normalisé* de la motorisation, η_{mot} , en fonction de ses points de fonctionnement, ω_{me} et T_{me} , pour les valeurs habituelles de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} . Encore une fois, nous avons eu les résultats attendus. En outre, les différentes cartographies montrent que le rendement de la motorisation est maximal lors des régimes et couples intermédiaires, où la puissance utile est significativement supérieure aux pertes fixes, et les pertes variables restent modérées.

1.3.3 Batterie

Tel que nous l'avons signalé précédemment (cf. section III.1.1.1.3), à l'ordre un les pertes dans la batterie sont assimilables à de l'effet Joule et donc proportionnelles au carré du courant batterie, I_{bat} . D'après la loi d'Ohm, I_{bat} est donné par (1.158), où la tension batterie $U_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux})$ est donnée par (1.154). Le « signe » de P_{elec} , qui dans ce contexte joue le rôle du signe de I_{bat} dans (1.17), peut être exprimé en termes du point de fonctionnement du GMP comme présenté sur (1.159).

$$I_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) = \frac{OCV(SoC) - U_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux})}{R_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, \text{sign}(P_{elec}))} \quad (1.158)$$

$$\text{sign}[P_{elec}](SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) = \begin{cases} 1 & , P_{mot}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + P_{aux} \geq 0 \\ -1 & , P_{mot}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + P_{aux} < 0 \end{cases} \quad (1.159)$$

Ainsi, en combinant les équations (1.20) et (1.158), nous pouvons exprimer les pertes dans la batterie comme suit :

$$\begin{aligned} P_{bat}^{prt} &= \frac{[OCV(SoC) - U_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux})]^2}{R_{bat}(SoC, \Theta_{bat}, \text{sign}(P_{elec}))} \\ &= h_4(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) \end{aligned} \quad (1.160)$$

La Figure 1.25 présente les pertes batterie, P_{bat}^{prt} , pour différents points de fonctionnement du GMP. Nous constatons que les pertes sont relativement basses pour des faibles valeurs de puissance *efficace* de la motorisation (produit $\omega_{me} \cdot T_{me}$) mais elles augmentent rapidement lors de demandes de puissance plus importantes. La Figure 1.25c met en évidence aussi une forte augmentation dans les pertes batterie lorsque celle-ci est froide.

La Figure 1.26 présente le rendement de la batterie pour différents points de fonctionnement du GMP. On voit des valeurs de rendement assez importantes lors des faibles demandes de puissance, qui décroissent quand la sollicitation en puissance augmente ; cette réduction du rendement est *grossièrement* proportionnelle à l'amplitude de la puissance (cf. section III.1.1.2.3). Aussi, nous constatons une perte considérable de rendement lorsque la batterie est froide.

1.3.4 Groupe moto-propulseur

Finalement, nous allons considérer les pertes d'énergie et le rendement du GMP, c'est-à-dire, de la motorisation et la batterie comme un ensemble. Pour cela, il est nécessaire de

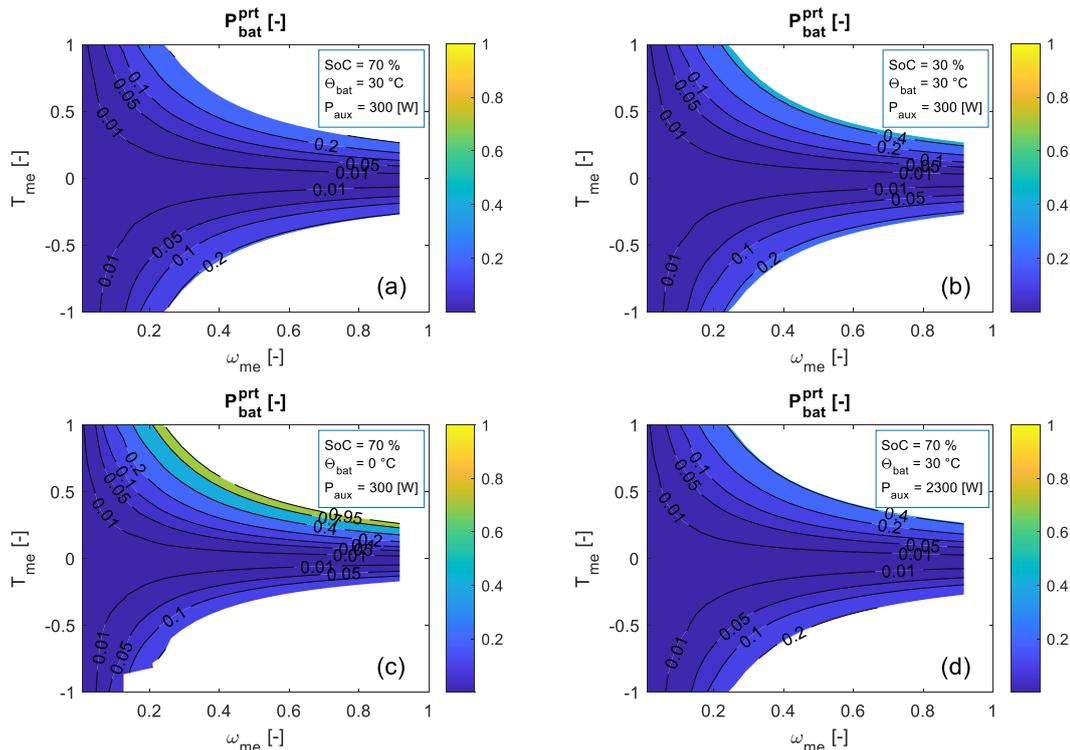


FIG. 1.25 – Pertes dans la motorisation, P_{bat}^{prt} , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC, Θ_{bat} et P_{aux} . (a) SoC = 70%, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (b) SoC = 30%, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (c) SoC = 70%, $\Theta_{bat} = 0[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 300[\text{W}]$; (d) SoC = 70%, $\Theta_{bat} = 30[^\circ\text{C}]$ et $P_{aux} = 2300[\text{W}]$. Toutes les unités ont été normalisées à 1, sur une base commune.

définir de quoi on parle en utilisant le mot « rendement. » Dans le sens le plus strict, *rendement* (qui viendrait du latin *reddere*¹⁷, « rendre, » « donner en retour ») est le ratio entre l'énergie *utile* et l'énergie totale en jeu. Il y a néanmoins une ambiguïté dans le terme « énergie utile »; en particulier, une question se pose: *la puissance demandée par les auxiliaires fait-elle partie de la puissance utile?* Dans un sens elle l'est car elle permet de répondre à une demande de prestations faite par le conducteur (p.ex.: *garantir une température de l'habitacle, ou permettre d'écouter de la musique durant le trajet*). En revanche, ces besoins ne correspondent pas à l'objectif primaire de la conduite: *se rendre à une certaine destination*; ainsi, les autres besoins ne seraient pas présents que dans la mesure où l'objectif principal n'a pas été atteint. De plus, le fait de garantir ces prestations, se traduit par une baisse d'autonomie du véhicule et, donc, par une dégradation de la capacité du véhicule à répondre à l'objectif primaire. De ce point de vue, il semble pertinent de considérer comme une perte la puissance allant vers les auxiliaires.

17. D'après les sites <https://latinlexicon.org> et Perseus Digital Library, <http://www.perseus.tufts.edu>.

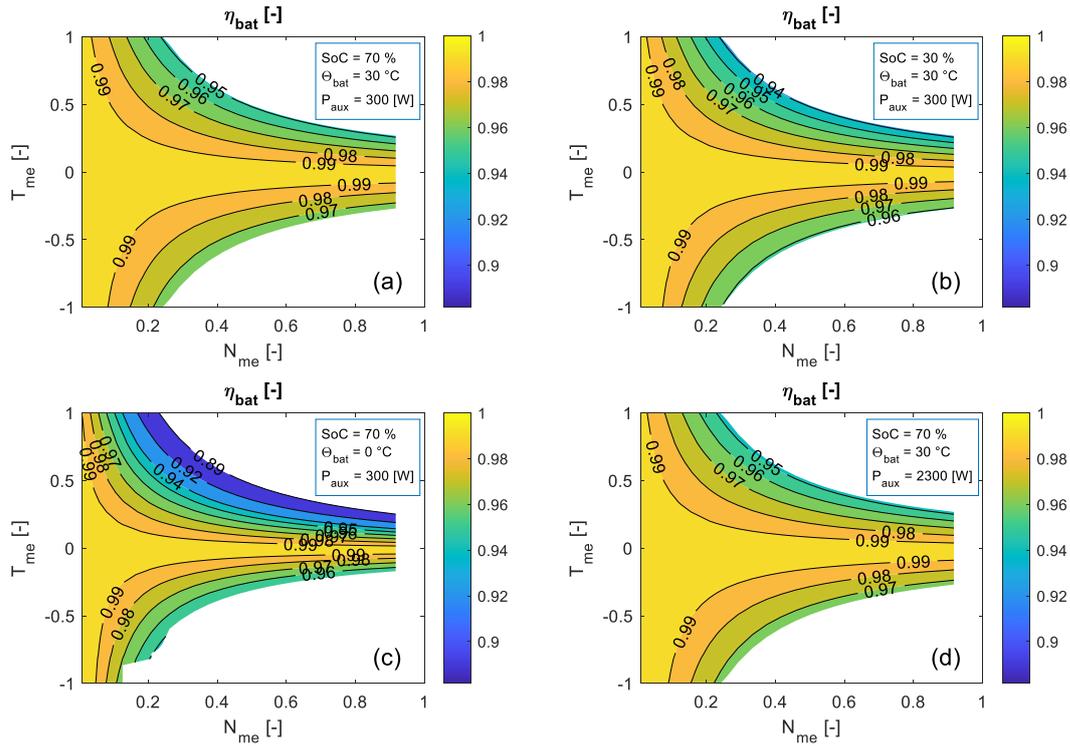


FIG. 1.26 – Rendement de la batterie, η_{bat} , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC, Θ_{bat} et P_{aux} . (a) SoC = 70 %, $\Theta_{bat} = 30$ [°C] et $P_{aux} = 300$ [W]; (b) SoC = 30 %, $\Theta_{bat} = 30$ [°C] et $P_{aux} = 300$ [W]; (c) SoC = 70 %, $\Theta_{bat} = 0$ [°C] et $P_{aux} = 300$ [W]; (d) SoC = 70 %, $\Theta_{bat} = 30$ [°C] et $P_{aux} = 2300$ [W]. Toutes les unités ont été normalisées à 1, sur une base commune.

Plutôt que d'essayer de trancher sur cette question, à tinte fortement philosophique, nous nous contenterons de définir deux types de rendement¹⁸:

- **rendement associé au déplacement** ne considérant comme de l'énergie utile que celle destinée à garantir l'avancement du véhicule et respecter la manœuvre de conduite. Il sera noté η_{gmp}^d (d comme « déplacement ») et considère donc comme une perte la puissance consommée par les auxiliaires.
- **rendement associé aux prestations** considère que l'énergie utile est celle destinée à garantir toutes les prestations du véhicule pendant la conduite. Il sera noté η_{gmp}^p (p comme « prestations ») et il considère que la puissance demandée par les auxiliaires est utile.

Les pertes *stricto sensu* du GMP sont données par (1.161). La Figure 1.27 montre les valeurs de P_{gmp}^{prt} pour différents points de fonctionnement. Nous constatons que les pertes dans le GMP sont maximales au voisinage de la zone de couple maximal, lorsque ω_{me} est proche de son régime de base [193]; c'est à ce point où le couple et la puissance de la ME atteignent tous les deux leur valeur maximale.

18. Nous considérerons ici un rendement dans le sens *du réservoir à la roue*; ainsi, nous excluons de notre analyse le fait que les pertes à l'avancement varient en fonction du profil cinématique du véhicule.

$$P_{gmp}^{prt} = P_{mot}^{prt}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + P_{bat}^{prt}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) \quad (1.161)$$

$$= h_5(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux})$$

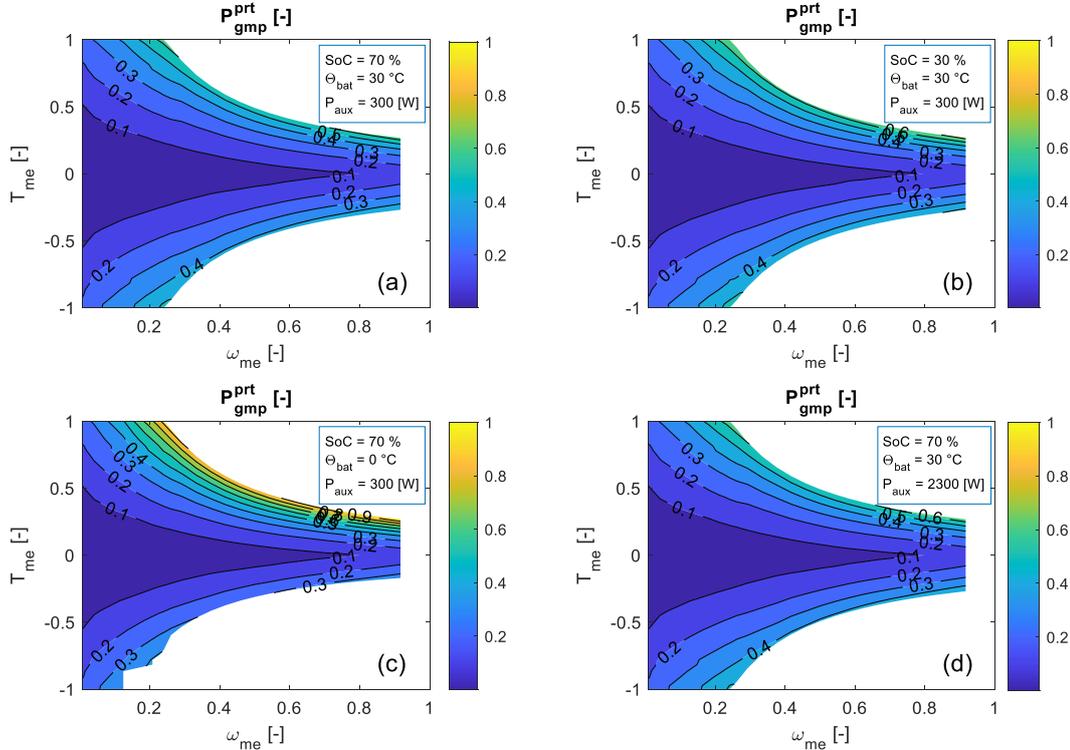


FIG. 1.27 – Pertes dans la motorisation, P_{gmp}^{prt} , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} . (a) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30[^\circ C]$ et $P_{aux} = 300[W]$; (b) $SoC = 30\%$, $\Theta_{bat} = 30[^\circ C]$ et $P_{aux} = 300[W]$; (c) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 0[^\circ C]$ et $P_{aux} = 300[W]$; (d) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30[^\circ C]$ et $P_{aux} = 2300[W]$. Toutes les unités ont été normalisées à 1, sur une base commune.

En outre, nous constatons que les pertes augmentent de manière conséquente lorsque le SoC est faible. Les pertes dans le GMP semblent être davantage sensibles à la température de la batterie; en effet, il y a une augmentation dans la valeur maximale des pertes de plus de 60%, lorsque la batterie passe de $\Theta_{bat} = 30^\circ C$ à $\Theta_{bat} = 0^\circ C$. Les pertes sont particulièrement importantes lors des fortes demandes de couple, ce qui indiquerait que celles-ci sont de *nature résistive*.

Le rendement associé au déplacement, η_{gmp}^d , est défini par (1.162), quand la vitesse du véhicule est non-négative (et donc $\omega_{me} \geq 0$). Cette variable n'est pas un rendement au sens physique du terme et elle doit donc être interprétée avec prudence. Pour une manœuvre d'accélération, η_{gmp}^d , représente tout simplement la proportion de la variation instantanée de l'énergie dans la batterie qui est *effectivement* utilisée pour faire avancer le véhicule; lors des décélérations, η_{gmp}^d correspond à la proportion d'énergie prélevée au véhicule qui est stockée dans la batterie.

$$\eta_{gmp}^d(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) = \begin{cases} \frac{\omega_{me} T_{me}}{P_{gmp}^{prt}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + \omega_{me} T_{me} + P_{aux}} & , T_{me} \geq 0 \\ \frac{P_{gmp}^{prt}(SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + \omega_{me} T_{me} + P_{aux}}{\omega_{me} T_{me}} & , T_{me} < 0 \end{cases} \quad (1.162)$$

La Figure 1.28 présente le rendement du GMP associé au déplacement, η_{gmp}^d , en unités normalisées. Pour toutes les combinaisons de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} étudiées, le rendement maximal se trouve lors des régimes et couples intermédiaires. Ces zones font le meilleur compromis entre les pertes de la ME, ayant un faible rendement dans les zones à faible couple (à cause de ses pertes fixes), et les pertes dans la batterie, qui sont très importantes lors des fortes demande de couple (et donc de courant).

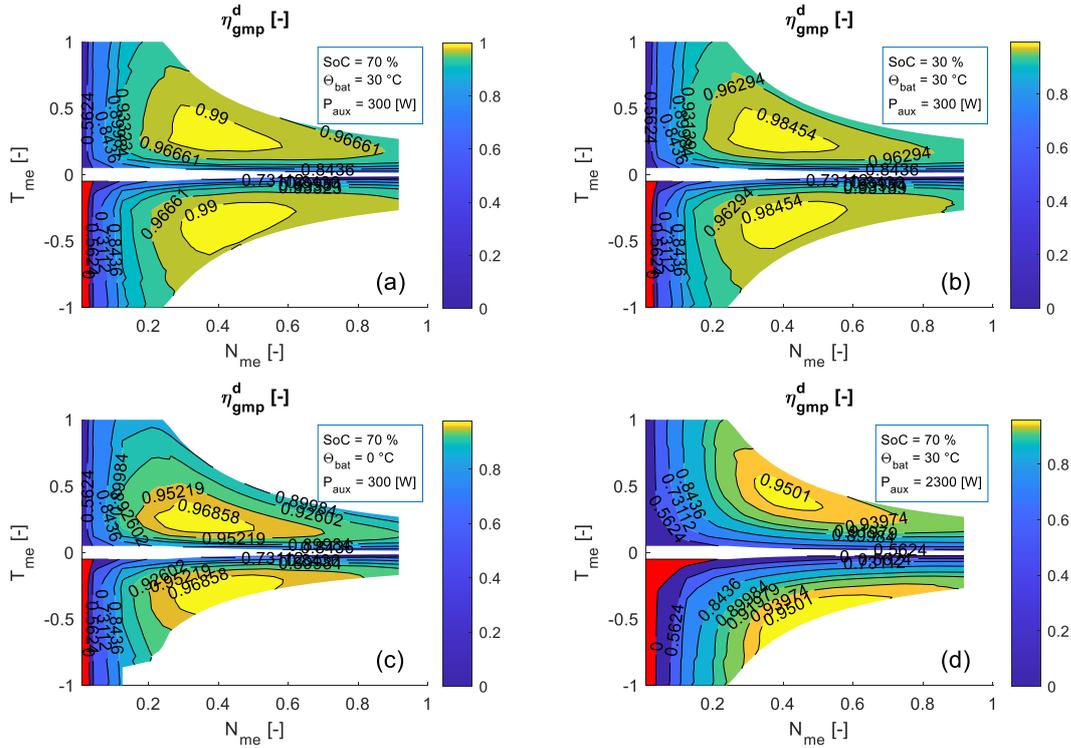


FIG. 1.28 – Rendement associé au déplacement du GMP, η_{gmp}^d , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} . (a) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (b) $SoC = 30\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (c) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 0 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (d) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 2300 [W]$. Toutes les unités ont été normalisées à 1, sur une base commune. Les zones où le rendement est négatif sont colorées en rouge.

Curieusement, la Figure 1.28d montre que, quand la demande auxiliaires est importante, le meilleur rendement a lieu pour des valeurs de couple relativement importants. En effet, la demande fixe (incluant P_{aux}) étant assez conséquente, il est plus intéressant de dépenser plus d'énergie pour faire avancer le véhicule lors des accélérations, afin de rentabiliser les pertes. De même, lors des décélérations, il vaut mieux récupérer beaucoup d'énergie, en utilisant une partie pour alimenter les auxiliaires, ce qui permet, au passage, de réduire les pertes au niveau de la batterie.

Le lecteur aura noté les zones rouges sur les différentes courbes; elles correspondent aux valeurs négatives de η_{gmp}^d . Cela correspond au cas où l'énergie récupérée ne permet pas de compenser la somme des pertes et la demande de puissance des auxiliaires; dans ce cas, la batterie doit être déchargée pour compenser le déficit.

Finalement, le rendement associé aux prestations, η_{gmp}^p , est défini par (1.163). Il corres-

pond à un rendement dans le sens *physique* du terme : lors des accélérations, η_{gmp}^p indique la proportion de la variation d'énergie dans la batterie utilisée pour alimenter d'autres systèmes (soit le châssis, soit les auxiliaires) ; lors des décélérations, η_{gmp}^p indique la proportion de l'énergie récupérable, $\omega_{me} T_{me} + P_{aux}$, qui est effectivement emmagasinée dans la batterie.

$$\eta_{gmp}^p (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) = \begin{cases} \frac{\omega_{me} T_{me} + P_{aux}}{P_{gmp}^{prt} (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + \omega_{me} T_{me} + P_{aux}} & , \omega_{me} T_{me} + P_{aux} \geq 0 \\ \frac{P_{gmp}^{prt} (SoC, \Theta_{bat}, \omega_{me}, T_{me}, P_{aux}) + \omega_{me} T_{me} + P_{aux}}{\omega_{me} T_{me} + P_{aux}} & , \omega_{me} T_{me} + P_{aux} < 0 \end{cases} \quad (1.163)$$

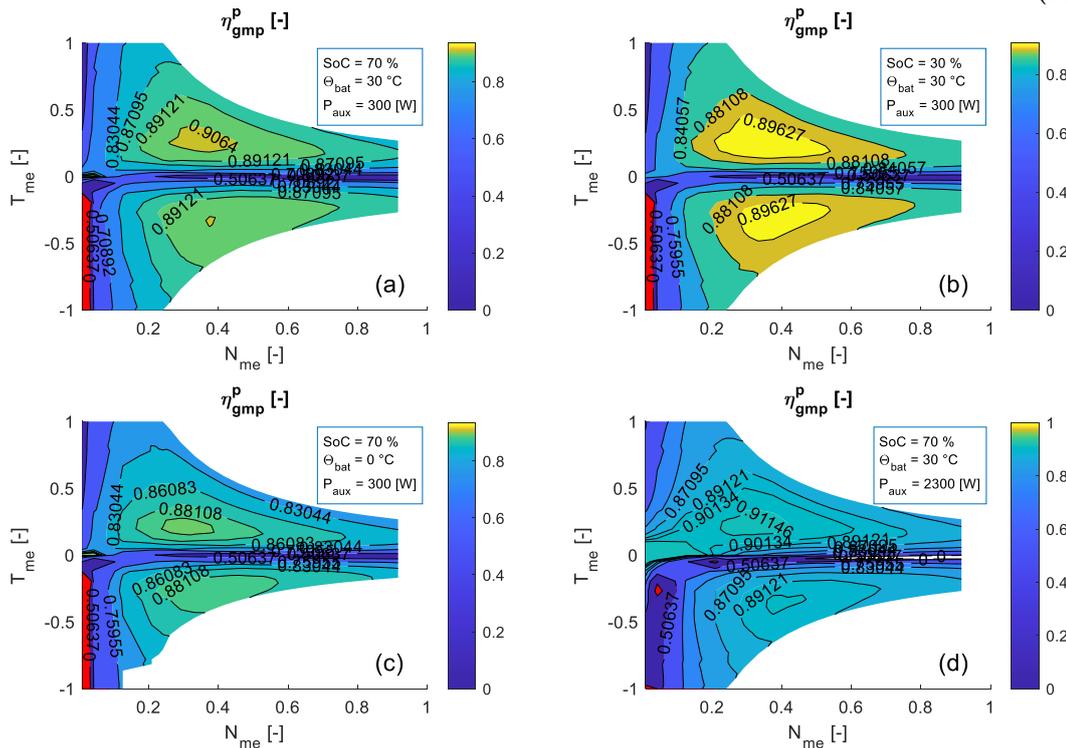


FIG. 1.29 – Rendement associé aux prestations du GMP, η_{gmp}^p , en fonction de ω_{me} et T_{me} , pour différentes valeurs de SoC , Θ_{bat} et P_{aux} . (a) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (b) $SoC = 30\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (c) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 0 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 300 [W]$; (d) $SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30 [^{\circ}C]$ et $P_{aux} = 2300 [W]$. Toutes les unités ont été normalisées à 1, sur une base commune. Les zones où le rendement est négatif sont colorées en rouge.

La Figure 1.29 présente le rendement du GMP associé aux prestations, η_{gmp}^p , pour des points de fonctionnement différents, en unités *normalisées*. Les zones de rendement optimale sont à chaque fois situées à des régimes intermédiaires et des faibles valeurs de couple.

En outre, on constate une petite zone à haut rendement à des très faibles régimes et des couples presque nuls (au voisinage de l'*origine*). Cela est dû au fait que, lors du calcul, le très mauvais rendement de la ME est *caché* par le bon rendement de la batterie ; en revanche, la plupart de l'énergie sortant de la batterie est utilisée pour alimenter les auxiliaires et non pas pour faire avancer le véhicule. Cela reste une observation anecdotique sans un vrai impact sur nos études dans la mesure où nous ne considérerons pas

des manœuvres jusqu'à l'arrêt. Toutefois, si on voulait analyser l'efficacité énergétique de telles manœuvres, il faudrait en tenir compte lors du choix du critère d'évaluation.

1.3.5 Affichage d'une manœuvre de conduite

Pour conclure ce chapitre, nous allons afficher une manœuvre de conduite issue d'un roulage réel, sur les cartographies de rendement et des pertes. Cela nous permettra de mieux comprendre le comportement énergétique du GMP lors d'une variation de vitesse en situation réelle.

La manœuvre considérée a eu lieu le 29 janvier 2018 sur la route départementale D91, en direction de Versailles. Celle-ci est représentée sur la Figure 1.30. Il s'agit d'une décélération derrière un camion, sur une route à trois voies, comme indiqué par la Figure 1.30e.

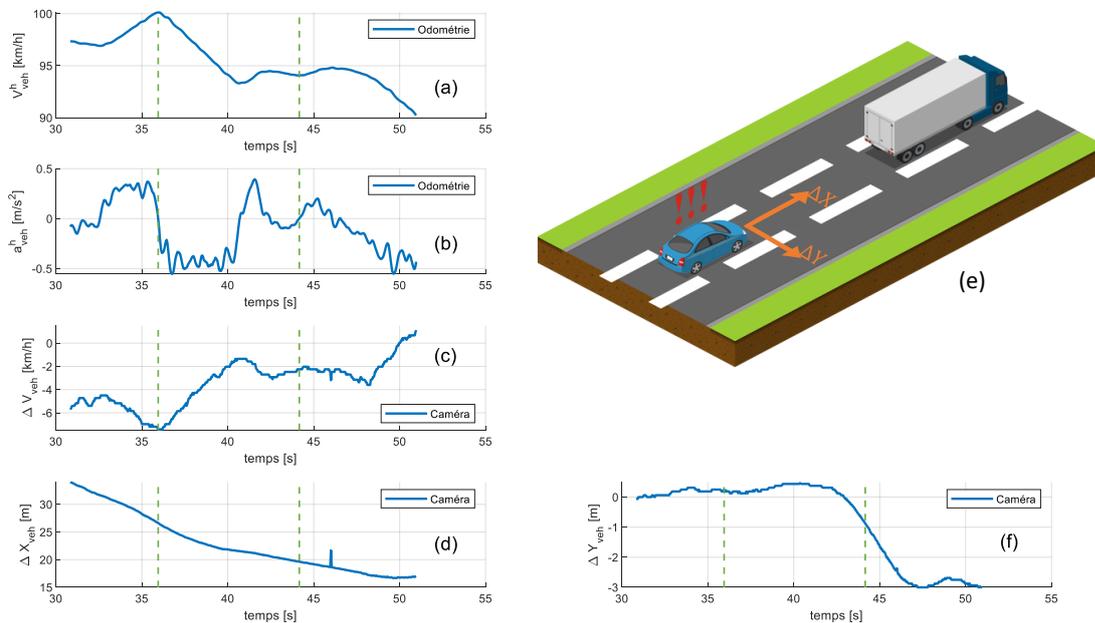


FIG. 1.30 – Signaux cinématiques de la manœuvre réelle étudiée. (a) vitesse du véhicule hôte ; (b) accélération du véhicule hôte ; (c) vitesse longitudinale relative ; (d) inter-distance longitudinale ; (e) représentation graphique simplifiée du scénario ; (f) distance latérale. Les traits pointillés délimitent l'intervalle considéré. La figure (e) a été créée en utilisant <https://icograms.com/>

Les signaux de vitesse et d'accélération du *véhicule hôte* (Fig. 1.30a et 1.30b) montrent que, avant de décélérer, le véhicule a réalisé une accélération, lui permettant de se rapprocher du camion. Ensuite, aux environs de $t = 35.95s$, le conducteur a agit sur l'accélération de son automobile afin de réduire la différence de vitesse avec le véhicule précédent. Il a exécuté une manœuvre de décélération *composée* (de type *décélération-accélération-décélération*) jusqu'à l'instant $t = 44.6s$, approximativement. D'après le signal de la caméra (Fig. 1.30c), à la fin de cette action l'écart de vitesse entre les deux véhicules n'était pas nul. Toutefois, cette valeur est relativement faible ; ayant observé nous-mêmes la vidéo, à plusieurs reprises, il est très difficile détecter une si petite différence dans un intervalle aussi rapide. Ainsi, il est vraisemblable que le conducteur ait considéré à ce moment que

sa vitesse était *suffisamment proche* de celle du véhicule cible. Une autre possibilité, que nous ne pouvons pas exclure, est qu'il y ait une erreur dans la mesure de la caméra¹⁹ et que l'écart réel ait été encore plus petit.

Après cette action, au voisinage de $t = 46s$, une nouvelle décélération a eu lieu. En revanche, nous pouvons exclure que cette décélération ait eu pour but de réduire d'avantage l'écart de vitesse entre les véhicules car, tel que montré par Fig. 1.30f, à cette instant le véhicule avait changé de voie. Ainsi, la manœuvre de décélération que nous considérerons est celle contenue dans l'intervalle $t \in [35.95, 44.6] s$, comme signalé par des traits pointillés. En outre, le changement de voie en fin de manœuvre ne devrait pas remettre en cause la représentativité du scénario étudié, dans la mesure où il a eu lieu tout à la fin de celle-ci, lorsque l'écart de vitesse entre les deux véhicules était déjà assez faible ; de ce fait, nous pouvons considérer que le profil de décélération est représentatif de la volonté du conducteur de réduire sa vitesse afin d'éviter une collision avec le véhicule précédent.

La Figure 1.31 montre les points de fonctionnement que le GMP de notre VE aurait subi pendant cette manœuvre. Ils sont superposés aux cartographies de pertes dans le GMP, P_{gmp}^{prt} , et des rendements associés au déplacement, η_{gmp}^d , et aux prestations, η_{gmp}^p . Des étoiles oranges indiquent les points de fonctionnement en début et à la fin de la manœuvre, lorsque la vitesse est « stabilisée. » Des traits pointillés indiquent la zone de fonctionnement *stationnaire* associée au scénario de conduite, comme défini en section III.1.1.2.2. Les limites d'accélération *acceptable* considérées pour définir ces zones sont : $\hat{T}_{me}^{accl} = -0.446[m/s^2]$ et $\check{T}_{me}^{accl} = -1.808[m/s^2]$; ces valeurs se basent sur notre analyse des enregistrements de conduite et correspondent à la médiane de a_{ex} plus ou moins 1 fois sa DAM²⁰ (cf. section II.3.4.3).

En observant les points de fonctionnement du GMP, nous constatons que le conducteur a répondu *en douceur* à la situation de conduite, en ayant une décélération assez faible. En revanche, lors de la première action de décélération (allant du point « 1 » au point « 2, » en blanc), sa vitesse est descendue en-dessous de son objectif, l'obligeant à accélérer jusqu'à dépasser légèrement la vitesse cible (2-3) ; finalement, une petite décélération (3-4) lui a permis d'atteindre la vitesse finale. Lors de tous ces ré-bouclages, le GMP s'est baladé dans des points de fonctionnement ayant plus des pertes ; on peut donc imaginer qu'il y a un potentiel de gain à réaliser ce type de manœuvre *en une seule manœuvre élémentaire*, ce qui réduirait cette dépense d'énergie. Ainsi, un SAC permettant de calculer le bon *dosage* de décélération pourrait avoir un impact positif sur la consommation du VE.

Grâce à la faible valeur du premier *plateau* d'accélération (1-2), le GMP était dans une zone à faibles pertes (Fig. 1.31a et 1.31b). En revanche, les rendements η_{gmp}^d et η_{gmp}^p dans

19. En fin de manœuvre le véhicule avait déclenché un changement de voie, ce qui aurait pu affecter l'estimation de vitesse issue de la caméra.

20. Dans le cas des décélération en milieu urbain, nous avons pris une approche plus conservatrice, en considérant une plage de $\pm 1 DAM$ autour de la médiane de l'accélération stabilisée. Ce choix tient compte du fait que nous disposons d'un nombre limité d'observations de ce type de scénario ; aussi, il tient compte de la plus haute sensibilité du conducteur à l'accélération à des hautes vitesses, associée à l'effet des retours visuels et auditifs (cf. section II.1.4).

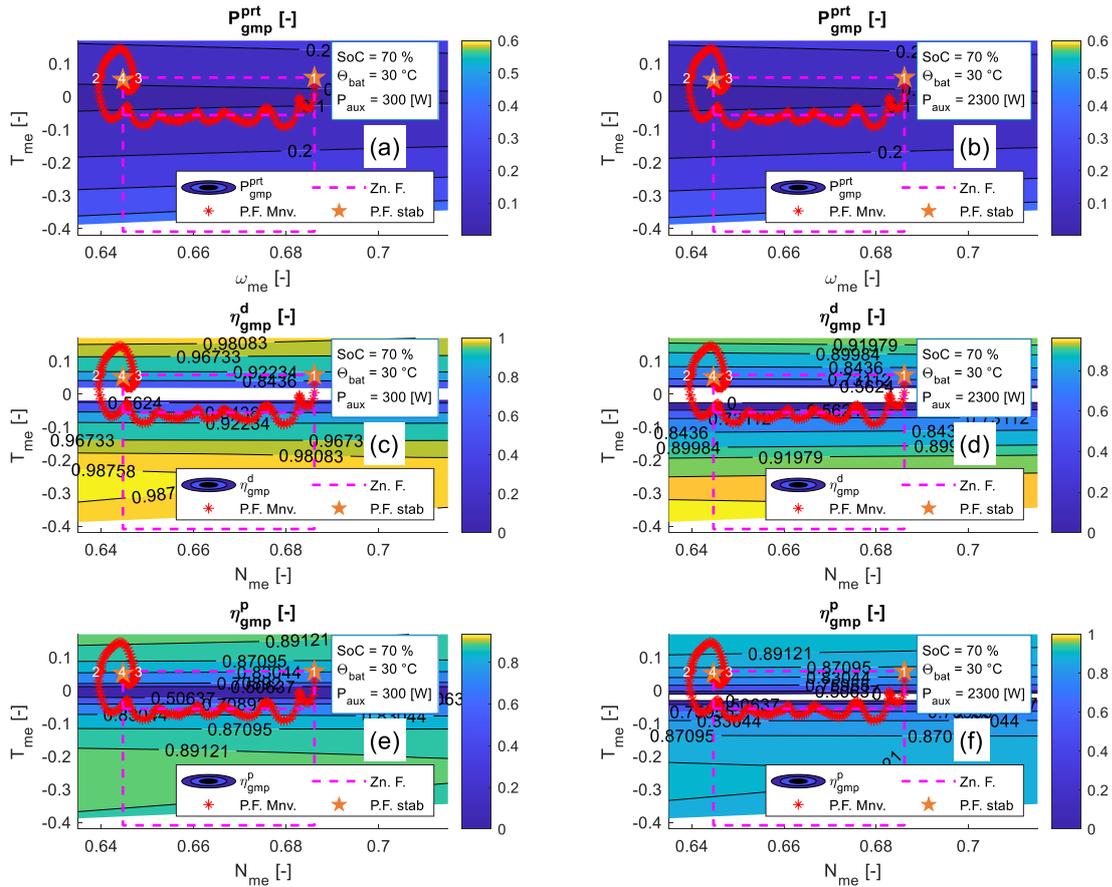


FIG. 1.31 – Représentation énergétique d'une manœuvre de conduite. Une même manœuvre est représentée pour deux états du véhicule : (a, c, e) SoC = 70 %, $\Theta_{bat} = 30$ [°C] et $P_{aux} = 300$ [W] et (c, d, f) SoC = 70 %, $\Theta_{bat} = 30$ [°C] et $P_{aux} = 2300$ [W]. Représentations énergétique : (a) et (b) Pertes dans le GMP, P_{gmp}^{prt} ; (c) et (d) rendement associé au déplacement, η_{gmp}^d ; (e) et (f) rendement associé aux prestations, η_{gmp}^p . Légendes : Zn. F. : Zone de Fonctionnement ; P.F. Mnv. : points de fonctionnement pendant la manœuvre ; P.F. Stab. : point de fonctionnement en début et fin de manœuvre.

cette zone de fonctionnement étaient faibles aussi, ce qui veut dire qu'un pourcentage plus bas de l'énergie prélevée au véhicule est allée dans la batterie. Une question se pose naturellement : est-il plus intéressant de décélérer en douceur en limitant les pertes ou d'avoir une décélération plus importante avec un meilleur rendement du GMP ?

La réponse à cette question n'est pas triviale car, même si on a moins de pertes instantanées en décélérant moins fort, on passera aussi plus de temps dans des zones de fonctionnement du GMP qui seront moins intéressantes. Le chapitre suivant donnera des éléments de réponse pour certaines situations de conduite, lorsque nous essayerons de répondre à une question plus large : que faut-il faire pour écoconduire ?

POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE ET SOURCES DE GAIN DE L'ÉCOCONDUITE

2

Objectif du chapitre

Déterminer quelles stratégies utiliser pour écoconduire, et estimer leur potentiel de gain d'énergie

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Analyse du potentiel de gain des différentes stratégies d'écoconduite, en situation urbaine et extra-urbaine*
- *Comparaison des performances énergétiques des différentes stratégies*
- *Analyse de l'influence de l'utilisation des auxiliaires sur le potentiel de gain associé à l'écoconduite*

Lorsque le conducteur est à bord de son véhicule, il doit répondre aux différents enjeux et contraintes imposés par l'environnement routier, afin d'atteindre ses objectifs associés à la conduite. Tel que nous l'avons vu sur la section I.1.6, cela se traduit par des actions différentes, associées à des horizons spatiaux et temporels différents : il doit choisir son itinéraire, adapter sa vitesse moyenne à chaque tronçon de la route, et gérer les transitions de vitesse en fonction des autres véhicules et l'infrastructure. Selon ses choix sur chacun de ses niveaux, la consommation associée à son déplacement, et donc son impact environnemental, varieront. Ainsi, nous pouvons qualifier quelqu'un d'*écoconducteur* quand ses choix, sur un où l'ensemble de ses niveaux, ont pour objectif *explicite* de limiter son empreinte écologique.

En revanche il peut être difficile pour un conducteur de connaître les bonnes stratégies à adopter pour réduire la consommation de son véhicule, d'autant plus que cela peut varier selon la technologie de son GMP [135]. De plus, Mensing et al. [136] montrent que, sur un véhicule équipé d'un moteur à combustion interne, réduire la consommation au

minimum n'est pas synonyme de *écoconduite*, dans la mesure où cela peut se traduire par une augmentation des émissions de polluants. Dans le cas d'un VE, cette question ne se pose pas car il existe une seule source d'énergie qui ne dégage pas *directement* des polluants locaux ; *écoconduire* veut donc dire réduire sa consommation autant que possible. En revanche, la question de *comment conduire à bord d'un véhicule électrique ?* se pose toujours.

Pour illustrer la diversité d'avis autour de l'écoconduite en général, nous pouvons citer l'étude présentée sur Matsumoto et al. [133], mettant en lumière des fortes différences entre les consignes données lors de la formation à l'écoconduite en Allemagne et au Japon. En particulier, les consignes de conduite nipponnes proposent d'accélérer en douceur, et de conduire en évitant autant que possible d'accélérer et de décélérer ; *a contrario*, les consignes germaniques préconisent d'accélérer fort jusqu'à atteindre une vitesse stabilisée dans une plage *économique* (40 à 80 km/h), pour après relâcher l'accélérateur et utiliser le *coasting* (véhicule en mode *filant*) de manière active. L'étude peine à départager laquelle des deux approches est la plus pertinente ; en revanche, elle met en évidence l'influence du contexte de roulage sur l'efficacité des techniques d'écoconduite. Bien que ces informations correspondent à la conduite de véhicules conventionnels, elles montrent la difficulté à uniformiser les résultats, et les avis, au moment de décider comment écoconduire dans la vie de tous les jours.

Lorsqu'en début 2018¹ nous étudions l'état de l'art, il n'y avait pas un clair consensus sur la réponse à cette question. Comme il a été présenté sur les chapitres I.1.3 et I.1.4, il existe une diversité de manières d'approcher l'étude de l'éco-conduite, et à cela s'ajoute l'interprétation des résultats des études, qui est loin d'être triviale. Par exemple, les études basées sur la Programmation Dynamique (PD), à *durée de trajet fixe*, montrent généralement que la *conduite optimale d'un VEB* correspond à des profils de vitesse, enchaînant un ou plusieurs séquences *grossièrement trapézoïdales* [55, 112, 126, 135]. Ces résultats présentent souvent des vitesses pics réduites et des accélérations fortes et des décélérations pouvant l'être aussi (en dehors des éventuelles phases où le véhicule « file »), en comparaison avec les profils de référence. L'application de la PD permet en principe d'obtenir la réponse optimale ; en revanche, ces résultats sont optimaux par rapport à la formulation du problème, qui peut difficilement tenir compte de toute la complexité de la conduite en situation réelle. Ainsi, il est légitime de se demander : *est-ce que ces résultats veulent dire que, pour écoconduire sur un VE, il faut accélérer et décélérer fort, tout en ayant des vitesses pic faibles ?* La plupart de chercheurs ne s'aventurent pas à lancer explicitement cette conclusion.

En se focalisant sur des études de terrain sur l'écoconduite, souvent associées à la recherche en Psychologie, les résultats sont paradoxaux par rapport à ceux issus des simulations. Par exemple, Neumann et al. [153] ont étudié les stratégies d'écoconduite utilisées par des *conducteurs de VE expérimentés*, ainsi que leur efficacité. Parmi les pratiques mentionnées, on trouve « *éviter des vitesses importantes* », « *avoir une accélération modérée* »,

1. C'est à cette date que notre étude a été réalisé (voir même avant). Heureusement, l'état de l'art a beaucoup évolué depuis.

« *utiliser le freinage régénératif (éviter de freiner²)* », et « *éviter l'utilisation des auxiliaires* ». Afin d'évaluer l'efficacité de ces stratégies, aux participants ont reçu la consigne de parcourir un trajet défini, dans la ville de Berlin (Allemagne), en utilisant leur style de conduite habituel ; après, ils ont dû refaire le trajet en conduisant pour faire en sorte de minimiser la consommation d'énergie, sans gêner la circulation. Ensuite, les chercheurs ont établi des corrélations entre la *consommation d'énergie* et les paramètres suivants : *vitesse moyenne, accélération moyenne, écart type de l'accélération, puissance moyenne du freinage régénératif* et sur *l'utilisation ou pas des auxiliaires*.

L'étude montre que, même si les conducteurs ont réduit *significativement* leur *vitesse moyenne*, il n'y a eu que des corrélations faibles et non-significatives entre la vitesse moyenne et la consommation d'énergie. En revanche, les conducteurs ont accéléré *significativement* moins lors de l'écoconduite, et il y a eu de fortes corrélations positives entre la consommation d'énergie et *l'accélération positive moyenne*, ainsi qu'avec *l'écart type de l'accélération positive moyenne*. De même, il y a eu *significativement* moins de *régénération d'énergie* lorsque les gens ont écoconduit ! En outre, le test a montré des corrélations positives et significatives entre l'utilisation des auxiliaires et la consommation d'énergie.

Ainsi, nous pouvons avoir l'impression que les études basées sur la PD et les celles de terrain se contredisent. Il n'est pas clair ce qu'un conducteur doit faire pour écoconduire, surtout s'il est à bord d'un VE. Cette discussion met en évidence le besoin de mieux comprendre le fonctionnement des différentes stratégies d'écoconduite, et d'analyser comment elles permettent de réduire la consommation d'énergie. Cela est nécessaire pour savoir quelles pratiques sont les mieux adaptées à chaque situation de conduite.

Dans ce chapitre nous proposerons un cadre pour étudier l'effet de trois stratégies d'écoconduite sur la consommation d'énergie, ainsi que de déterminer d'où viennent les gains. Nous comparerons la pertinence de ces stratégies dans les contextes de conduite urbain et extra-urbain. L'effet de la consommation due aux auxiliaires sur l'efficacité des pratiques d'écoconduite sera aussi analysée. Enfin, dans la discussion nous proposerons des éléments de réponse permettant de faire sens de cette apparente contradiction entre les simulations et les expériences de terrain. Une grande partie de ces résultats ont été publiés sur [206].

2.1 MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE DES STRATÉGIES DE CONDUITE

Objectif de la section

Proposer un cadre pour comparer l'efficacité énergétique des stratégies d'écoconduite

2. Ce n'est pas clair si l'association entre *l'utilisation du freinage régénératif* et le fait de *ne pas appuyer sur la pédale de frein* est due à la définition technique du véhicule, ou à la compréhension des conducteurs sur le fonctionnement de celui-ci.

Parmi les stratégies d'écoconduite sur un VE mentionnées par les conducteurs, il y a trois qui reviennent souvent, notamment :

- **Réduire la vitesse du véhicule pendant les phases stabilisées.** Cela est assez intuitif dans la mesure où, moins on roule vite, moins il y aura des pertes à l'avancement. Nous dénoterons cette technique « Réduction de Vitesse Stabilisée (RVS) ».
- **Réduire l'intensité des accélérations.** Les conducteurs expérimentés de VE pensent qu'en réduisant le niveau de leurs accélérations positives, ils amélioreront leur consommation. Nous préférons garder un terme plus neutre, notamment, « Modulation de l'Accélération (MA) ».
- **Utiliser le freinage régénératif / éviter d'appuyer sur la pédale de frein.** Les conducteurs ont la notion qu'il y a un potentiel de gain associé à l'utilisation du freinage régénératif. Encore une fois, nous garderons le terme neutre « Modulation de la Décélération (MD) »

Il existe bien d'autres techniques et nuances associées à la réduction de la consommation issue de la conduite. En revanche, nous nous limiterons à l'étude de ces trois, directement liées à l'action de conduire un véhicule. C'est aussi les tâches qui pourraient être, en principe, les plus rapidement assurées par des SAC ; par exemple, on peut imaginer un Régulateur de Vitesse Adaptatif (RVA) capable d'écoconduire. De plus, un traitement à part sera consacré à l'étude de l'effet de l'utilisation des auxiliaires sur l'écoconduite.

Malgré le fait que ces techniques soient assez simples *a priori*, l'évaluation de leur potentiel n'est pas triviale. En effet, chacune d'entre elles a un impact sur la cinématique du véhicule, ce qui veut dire que celui-ci ne se comportera pas pareil selon que la stratégie soit appliquée ou pas. Il est donc nécessaire de définir une approche permettant de faire des comparaisons justes. Ci-dessous, nous proposerons un cadre de comparaison pour chacune des stratégies à étudier.

2.1.1 Réduction de la vitesse stabilisée (RVS)

Afin d'évaluer le potentiel de réduction de la consommation de la RVS, il est nécessaire de définir un cadre où des choix de vitesse stabilisée différents soient équivalents des points de vue fonctionnel et énergétique. Lorsque le véhicule se déplace à différentes vitesses stabilisées, son énergie cinétique ne sera pas la même. Nous négligerons ce fait lors de notre analyse car, d'une part, la variation d'énergie cinétique a lieu pendant les phases transitoires, pouvant être négligées lors des longues phases à vitesse stabilisée (comme sur une autoroute, par exemple). Aussi, les phases transitoires sont associées aux deux autres stratégies d'écoconduite, donc la variation de l'énergie cinétique sera considérée dans les sections suivantes.

D'un point de vue fonctionnel, il est nécessaire de considérer que, pour un itinéraire défini, la même distance doit être parcourue indépendamment de la vitesse choisie. Ainsi, nous devons considérer une consommation d'énergie *normalisée*, E_{ref}^i , nécessaire pour

parcourir une distance de référence, d_{ref} , en se déplaçant à la vitesse stabilisée, V_{stb}^i . Le calcul de $E_{d_{ref}}^i$ est donné par (2.1), où P_{bat}^i est la consommation d'énergie instantanée que la batterie doit appliquer (ou recevoir) pour maintenir la vitesse du véhicule. Aussi, le fait d'imposer la même distance parcourue pour chaque valeur de vitesse permet d'avoir une variation équivalente de l'énergie potentielle du véhicule, lors des scénarios à pente non-nulle.

$$E_{d_{ref}}^i = \frac{d_{ref} P_{bat}^i}{V_{stb}^i} \quad (2.1)$$

Cette formulation néglige donc la variation du SoC de la batterie, et elle est donc valable uniquement pour des distances de référence modérées. En principe, il est possible de calculer de manière numérique la consommation en considérant la décharge de la batterie associée au déplacement. En revanche, en faisant ainsi, la valeur de $E_{d_{ref}}^i$ sera fortement dépendante de la distance de référence, et il faudrait donc trouver une valeur de d_{ref} représentative de la diversité des segments de route dans lesquels le véhicule peut rouler à vitesse constante. En outre, cela rajouterait une difficulté supplémentaire lors de la compréhension des phénomènes physiques en jeu. Nous avons donc décidé de retenir la représentation simplifiée, plus facile à interpréter.

2.1.2 Modulation de l'accélération (MA)

Définir un cadre de comparaison des manœuvres d'accélération *positive*, sur une base équivalente énergétique et fonctionnellement, n'est pas une tâche facile. Pour que toutes les manœuvres soient comparables, il y a deux contraintes énergétiques devant être respectées, dont chacune est associée à une contrainte fonctionnelle. D'abord, il est nécessaire de garantir que la variation de l'énergie cinétique soit la même à la fin de chaque accélération ; cela impose d'avoir la même vitesse finale pour toutes les manœuvres, ce qui correspond au fait que, en excluant la RVS, les conducteurs tendent à rouler au voisinage de la limitation de vitesse réglementaire, ou à celle imposée par le trafic. Deuxièmement, il est nécessaire d'avoir la même variation finale d'énergie potentielle, ce qui est associé à l'objectif fonctionnel de couvrir la même distance lors de chaque manœuvre³.

Afin de simplifier les phénomènes en jeu, ainsi que les calculs (voire les rendre faisables de manière analytique), nous allons considérer uniquement des accélérations constantes (par morceaux). Les courbes qui apparaîtront sur ce document sont cohérentes avec cette hypothèse ; cependant, il faut garder à l'esprit que les principes présentés restent valables pour des profils d'accélération plus élaborés.

Une première approche possible consiste à comparer les différentes accélérations de sorte à avoir à chaque fois la même vitesse au début et à la fin (Figure 2.1a) ; cela garanti que la variation de l'énergie cinétique emmagasinée dans le véhicule sera la même pour

3. Cela est vrai dans la mesure où à chaque position de la route est associé une certaine altitude ; de ce fait, se déplacer d'une certaine distance implique aussi une certaine variation d'altitude, et donc une variation de l'énergie potentielle emmagasinée dans le véhicule.

toutes les valeurs d'accélération. Aussi, cela est cohérent avec le fait que les manœuvres doivent répondre à un même scénario. Cependant, en faisant de la sorte, les distances parcourues en utilisant chaque stratégie seraient différentes et donc la comparaison ne serait pas juste.

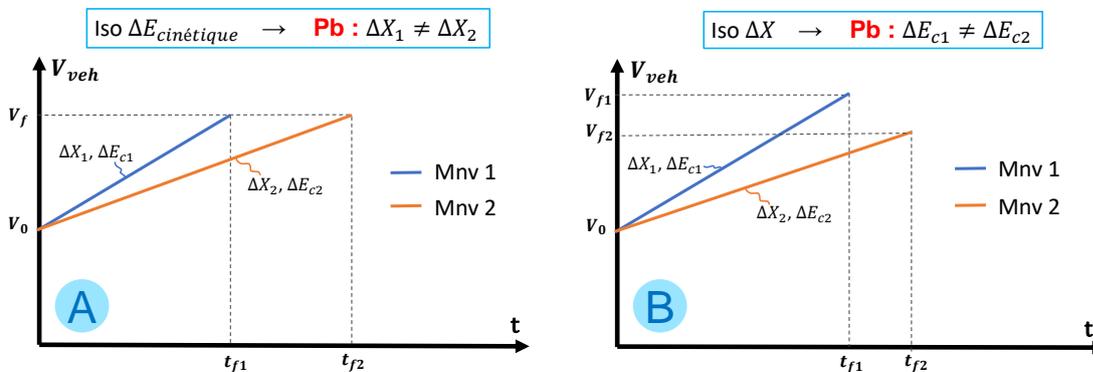


FIG. 2.1 – Deux approches basiques pour comparer des phases d'accélération, dans le cas de deux manœuvres. (a) Iso-énergie cinétique; (b) Iso-distance parcourue

Une autre stratégie est de nous assurer que la distance parcourue soit la même pour toutes les valeurs d'accélération (Figure 2.1b); de plus, cette méthode garantit d'avoir la même variation d'énergie potentielle dans les cas à pente non-nulle (car on part du même endroit et on finit au même endroit, donc à la même hauteur). Le problème de cette approche est la non-uniformité dans les vitesses finales. Cela implique une variation d'énergie cinétique différente pour chaque valeur d'accélération, sans compter le fait que les différentes manœuvres ne répondraient pas forcément à des scénarios équivalents. Cette méthode n'est donc pas appropriée non plus.

Afin de contourner ces difficultés, nous proposons la stratégie présentée ci-dessous et illustrée par la Figure 2.2. Elle a été utilisée par d'autres chercheurs comme Saerens [184] et Mruzek et al. [145].

1. Pour chaque valeur d'accélération (manœuvre), nous partons de la comparaison à iso-vitesse au début et à la fin, et donc à iso-variation de l'énergie cinétique (Figure 2.2a).
2. Nous calculons ensuite laquelle des manœuvres à étudier permet de parcourir la distance la plus longue. Le mode associé sera considéré comme la manœuvre de référence.
3. A la fin de chaque phase d'accélération, hormis celle de référence, nous allons rajouter un tronçon de roulage sur lequel on va rouler à la vitesse finale (constante) pendant une durée permettant de parcourir la même distance que celle de la manœuvre de référence (Figure 2.2b). Cela est compatible avec le fait que, si nous voulions parcourir une certaine distance dans un scénario donné (limité à quelques dizaines, voire centaines, de mètres), une fois que nous aurons atteint la valeur finale de vitesse imposée par le contexte, la distance manquante doit être parcourue à cette vitesse. Nous pouvons appeler ces profils des « manœuvres corrigées ».

4. Nous calculons la dépense énergétique associée à chaque manœuvre corrigée (la consommation due au roulage à l'accélération et celle associée au tronçon supplémentaire à vitesse constante).

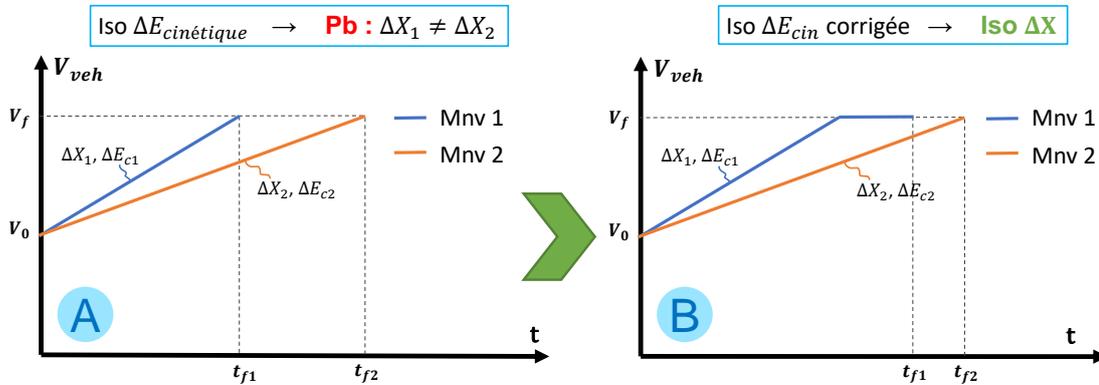


FIG. 2.2 – Approche corrigée pour la comparaison énergétique des manœuvres d'accélération. (a) Iso-énergie cinétique; (b) Iso-énergie cinétique corrigée

L'avantage de cette méthode est la possibilité de comparer des roulements dans lesquels nous avons la même distance parcourue et la même variation de l'énergie cinétique. La consommation associée à chaque mode de fonctionnement sera représentative de la dépense d'énergie pour parcourir la même distance avec les différents niveaux d'accélération. Cette modélisation est compatible avec le comportement *plausible* d'un conducteur dans un scénario de roulement réel : il accélérera jusqu'à atteindre la vitesse *imposée* par le scénario, puis il continuera à rouler en gardant cette vitesse [184]. En revanche, un désavantage de la méthodologie proposée réside dans le fait que la consommation de l'ensemble des accélérations dépendra de la manœuvre de référence ; ainsi, pour avoir des résultats pertinents il est nécessaire de choisir correctement les plages d'accélération à étudier

Pour la mise en équation de l'approche présentée, nous allons exploiter notre hypothèse d'accélération constante, en introduisant le paramètre γ , correspondant au ratio entre l'accélération associée à une manœuvre et l'accélération maximale *acceptable* pour le scénario considéré, \hat{a}_{veh} ; ainsi, $\gamma = \frac{a_{veh}}{\hat{a}_{veh}}$. La variable γ nous permettra de simplifier la notation et les calculs.

La Figure 2.3 représente la notation utilisée : V_0 et V_f correspondent respectivement aux vitesses du véhicule au début et à la fin de la manœuvre et $\Delta V = V_f - V_0$ est la variation totale de vitesse ; t_0 est l'instant de début de la manœuvre, t_1 celui auquel on fini la phase d'accélération et démarre la phase à vitesse stabilisée, et t_2 est l'instant de fin de la manœuvre ; T_1 est la durée de la phase d'accélération et T_2 celle du roulage stabilisé. L'accélération associée à la i -ème manœuvre est notée a_{veh}^i et peut être exprimée, en fonction du paramètre γ_i , par $a_{veh}^i = \gamma_i \hat{a}_{veh}$. La manœuvre de référence correspond à la valeur minimale du paramètre γ , $\tilde{\gamma} = \min \gamma_i = \frac{\tilde{a}_{veh}}{\hat{a}_{veh}}$; il s'agit de la manœuvre permettant de parcourir la plus longue distance, avant d'appliquer la correction (sous l'hypothèse d'accélération constante).

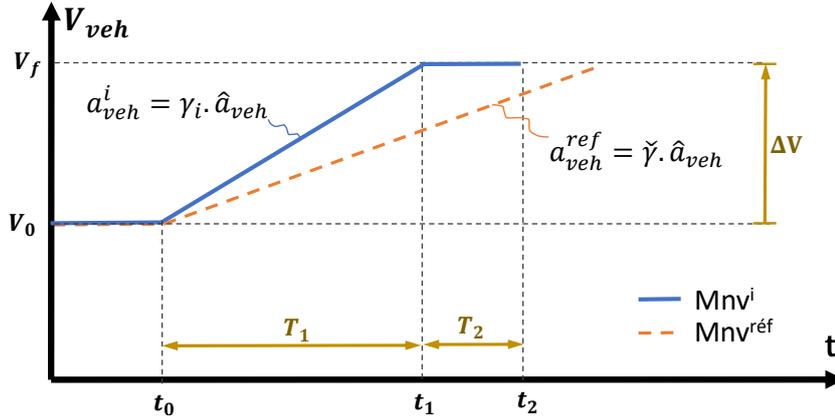


FIG. 2.3 – Paramétrage des manœuvres d'accélération

Dans l'approche proposée, la consommation d'énergie obtenue dépend de l'ensemble des manœuvres considérées pendant l'étude. De ce fait, ce n'est pas possible *a priori* d'annoncer un gain absolu sur la consommation de manière indépendante du scénario de roulage étudié. La méthode permet, néanmoins, de déterminer le gain que l'on obtiendrait en réalisant des manœuvres différentes pour répondre à une même situation de conduite.

Pour pouvoir exécuter les simulations, nous avons besoin de connaître les valeurs de T_1^i et de T_2^i , associées à une certaine valeur de γ_i . Cependant, ces valeurs dépendent du plan d'expérience que nous souhaiterions réaliser (ensemble de valeurs γ_i à considérer). Ainsi, pour le calcul de ces paramètres, il est d'abord nécessaire de trouver la durée de la manœuvre de référence, T_1^{ref} . Dans nos équations, nous supposons que toutes les variables sont données dans un système d'unités cohérent.

2.1.2.1 Durée et distance parcourue de la manœuvre de référence

La manœuvre de référence est celle dont l'accélération est minimale et qui est donc constituée uniquement d'une phase d'accélération. Cela implique, $T_2^{ref} = 0$. L'accélération de référence est donnée par (2.2).

$$a_{veh}^{ref} = \check{\gamma} \hat{a}_{veh} \quad (2.2)$$

La durée de la phase d'accélération de la manœuvre de référence, T_1^{ref} , est donnée par :

$$T_1^{ref} = \frac{\Delta V}{a_{veh}^{ref}} = \frac{\Delta V}{\check{\gamma} \hat{a}_{veh}} \quad (2.3)$$

La distance parcourue pendant la manœuvre de référence, ΔX^{ref} est :

$$\Delta X^{ref} = \frac{1}{\check{\gamma}} \cdot \left(\frac{\Delta V}{\hat{a}_{veh}} \right) \cdot \left(V_0 + \frac{\Delta V}{2} \right) \quad (2.4)$$

2.1.2.2 Durée et distance parcourue d'une manœuvre quelconque

Ensuite, nous allons calculer la durée T_1^i , associée à la phase d'accélération de l'*i*-ème manœuvre de l'étude. Dans ce cas, l'accélération peut être calculée grâce à (2.5).

$$a_{veh}^i = \gamma_i \hat{a}_{veh} \quad (2.5)$$

La durée de la phase d'accélération, T_1^i , serait donc :

$$T_1^i = \frac{\Delta V}{a_{veh}^i} = \frac{\Delta V}{\gamma_i \hat{a}_{veh}} \quad (2.6)$$

Et la distance parcourue pendant l'i-ème manœuvre, ΔX^i , est :

$$\Delta X^i = \frac{1}{\gamma_i} \cdot \left(\frac{\Delta V}{\hat{a}_{veh}} \right) \cdot \left(V_0 + \frac{\Delta V}{2} \right) + V_f T_2^i \quad (2.7)$$

2.1.2.3 Condition d'iso-distance entre toutes les manœuvres

Finalement, pour le calcul de T_2^i , c'est-à-dire, de la durée de la phase de roulage à vitesse stabilisée, nous allons utiliser le fait que la distance parcourue lors de chacune des manœuvres doit être équivalente, et égale aussi à la distance parcourue pendant la manœuvre de référence. Cette condition, dite d'« iso-distance », est traduite par (2.8).

$$\Delta X^i = \Delta X^{ref} \quad (2.8)$$

En utilisant (2.2)-(2.8), nous pouvons déterminer la durée de la phase à vitesse stabilisée de l'i-ème manœuvre, T_2^i , comme donné par (2.9).

$$T_2^i = \frac{\gamma_i - \check{\gamma}}{\gamma_i \check{\gamma}} \cdot \left(\frac{\Delta V}{V_f \hat{a}_{veh}} \right) \cdot \left(V_0 + \frac{\Delta V}{2} \right) \quad (2.9)$$

2.1.3 Modulation de la décélération (MD)

Le troisième levier d'écoconduite est la modulation de l'intensité des décélérations, notée MD. Nous considérerons, encore une fois, que la décélération reste constante tout au long de la phase transitoire.

De la même manière que pour les accélérations, nous allons utiliser la méthode de correction de profil pour avoir les mêmes distances parcourues. Cette fois-ci, nous considérons que la non-anticipation lors de la conduite se traduit par un roulage plus long à la vitesse initiale, pour ensuite faire une décélération (constante) plus brusque (Figure 2.4). L'avantage de cette méthode, une fois de plus, est la possibilité de comparer des roulages à iso-distance parcourue (et donc avec la même variation de l'énergie potentielle), ainsi qu'à iso-variation de l'énergie cinétique. Son désavantage réside dans le fait que la consommation associée à chaque manœuvre dépendra de la plage de valeurs de décélération considérées.

La notation associée aux formules pour les manœuvres de décélération est représentée sur la Figure 2.5. En excluant les variables dont la définition reste inchangée, nous avons : \check{a}_{veh} pour la valeur maximale de décélération (ou la décélération minimale) ; t_1 est l'instant de fin de la phase à vitesse stabilisée, et de début de la phase de décélération ; T_0 est la durée de la phase initiale et T_1 celle de la décélération. Le paramètre ξ_i représente l'agressivité du conducteur pendant la phase de décélération, de manière analogue à γ_i .

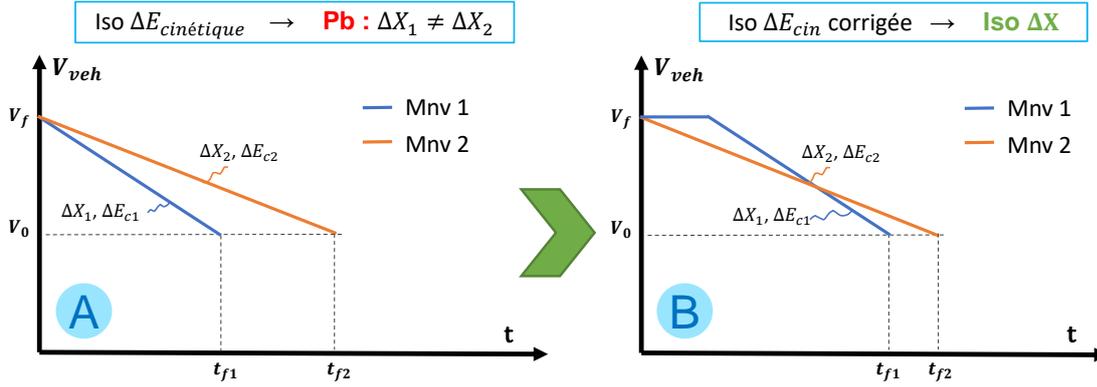


FIG. 2.4 – Approche corrigée pour la comparaison énergétique des manœuvres de décélération. (a) Iso-énergie cinétique ; (b) Iso-énergie cinétique corrigée

Une fois de plus, la manœuvre de référence est celle ayant la plus petite valeur de γ , notée $\check{\xi} = \min \xi_i = \frac{\hat{a}_{veh}}{\check{a}_{veh}}$, correspondant à la plus longue distance parcourue.

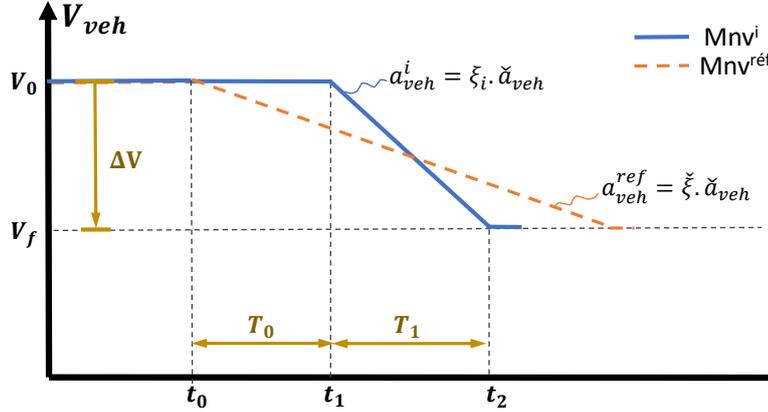


FIG. 2.5 – Paramétrage des manœuvres de décélération

Pour le calcul des durées des phases transitoire et stabilisée de chaque manœuvre, T_0^i et T_1^i respectivement, nous garderons l'hypothèse de décélération constante.

2.1.3.1 Durée et distance parcourue de la manœuvre de référence

La manœuvre de référence est celle dont la décélération est maximale (et donc l'accélération est minimale); elle est en conséquence constituée uniquement d'une phase de décélération ($T_2^{ref} = 0$). L'accélération (négative) de référence est donnée par (2.10).

$$a_{veh}^{ref} = \check{\xi} \check{a}_{veh} \quad (2.10)$$

L'équation (2.11) permet de calculer la durée de la phase de décélération de la manœuvre de référence, T_1^{ref} .

$$T_1^{ref} = \frac{\Delta V}{a_{veh}^{ref}} = \frac{\Delta V}{\check{\xi} \check{a}_{veh}} \quad (2.11)$$

La distance parcourue pendant la manœuvre de référence, ΔX^{ref} est :

$$\Delta X^{ref} = \frac{1}{\check{\xi}} \cdot \left(\frac{\Delta V}{\check{a}_{veh}} \right) \cdot \left(V_0 + \frac{\Delta V}{2} \right) \quad (2.12)$$

2.1.3.2 Durée et distance parcourue d'une manœuvre quelconque

Nous allons calculer la durée T_1^i , associée à la phase de décélération de l'i-ème manœuvre de l'étude. L'accélération peut être calculée en appliquant (2.13).

$$a_{veh}^i = \xi_i \check{a}_{veh} \quad (2.13)$$

La durée de la phase d'accélération, T_1^i , est donnée par (2.14).

$$T_1^i = \frac{\Delta V}{a_{veh}^i} = \frac{\Delta V}{\xi_i \check{a}_{veh}} \quad (2.14)$$

Et la distance parcourue pendant l'i-ème manœuvre, ΔX^i , est :

$$\Delta X^i = \frac{1}{\xi_i} \cdot \left(\frac{\Delta V}{\check{a}_{veh}} \right) \cdot \left(V_0 + \frac{\Delta V}{2} \right) + V_0 T_0^i \quad (2.15)$$

2.1.3.3 Condition d'iso-distance entre toutes les manœuvres

Pour calculer la durée de la phase de roulage à vitesse stabilisée, T_0^i , nous allons utiliser la même condition « d'iso-distance », donnée par (2.8).

Finalement, nous pouvons déterminer la durée de la phase à vitesse stabilisée de l'i-ème manœuvre, T_2^i , grâce à (2.16).

$$T_0^i = \frac{\xi_i - \check{\xi}}{\xi_i \check{\xi}} \cdot \left(\frac{\Delta V}{V_0 \check{a}_{veh}} \right) \cdot \left(V_0 + \frac{\Delta V}{2} \right) \quad (2.16)$$

2.2 POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE DES STRATÉGIES D'ÉCOCONDUITE : SCÉNARIOS URBAINS

Objectif de la section

Évaluer et comparer le potentiel de gains des stratégies d'écoconduite, lors de la conduite en ville

Nous allons d'abord nous intéresser au potentiel de gain d'énergie de chaque stratégie d'écoconduite, sur des scénarios de roulage urbains. Nous limiterons notre analyse à des situations où la pente est nulle, $\alpha_r = 0$.

Pour calculer la consommation, nous avons construit un modèle global du véhicule, basé sur la modélisation physique de la section III.1.1.1. Pour faciliter l'analyse, nous approcherons la variation instantanée de l'énergie dans la batterie en considérant où *va l'énergie*. L'équation (1.22) de la section III.1.1.1.4 nous montrait que la puissance P_{bat} peut être stockée dans la masse du véhicule, sous forme d'énergie cinétique (P_{accl}), ou potentielle (P_{pente}); elle peut aussi être perdue dans la batterie (P_{bat}^{prt}), la motorisation (P_{mot}^{prt}), ou pour compenser les efforts à l'avancement (P_{veh}^{prt}); une partie de la puissance sera également consommée par les auxiliaires (P_{aux}). Finalement, les freins peuvent être aussi utilisés pour dissiper, sous forme de chaleur, l'énergie emmagasinée dans la masse du véhicule (P_{frein}). Pour rappel, nous transcrivons l'équation (1.22) ci-dessous.

$$P_{bat} = P_{accl} + P_{pente} + P_{veh}^{prt} + P_{mot}^{prt} + P_{bat}^{prt} + P_{aux} + P_{frein}$$

Pour l'ensemble des simulations de cette section, nous considérerons les conditions suivantes pour la batterie : $SoC = 70\%$ et $\Theta_{bat} = 30^\circ C$. Ce sont des conditions probables d'opération pour la batterie. En outre, nous considérerons comme sollicitation de puissance des auxiliaires $P_{aux} = 300W$, correspondant à une demande modérée, donc à un minimum d'auxiliaires actifs.

Pour nos calculs, nous considérons les gains en comparant la variation totale de l'énergie chimique stockée dans la batterie, dans les différentes manœuvres considérées. Suivant cette logique, la puissance envoyée aux auxiliaires est considérée comme une perte d'énergie.

2.2.1 Réduction de la vitesse stabilisée (RVS)

Dans le cas de la conduite urbaine, les principales contraintes sur la vitesse du véhicule sont dues au trafic et à l'infrastructure. Ainsi, nous considérerons que la vitesse minimale acceptable correspond à une réduction de 20 % par rapport à la vitesse limite réglementaire en agglomération qui, d'après le Code de la Route français, est de 50 km/h ($\approx 13,88$ m/s). Nous allons considérer en plus trois valeurs intermédiaires de vitesse, afin de mieux visualiser la dépendance dans les pertes d'énergie par rapport à la vitesse stabilisée choisie. Chacune des énergies affichées est le résultat d'intégrer les différents termes de l'équation (1.22) sur la durée de la manœuvre correspondante.

La Figure 2.6a présente la consommation d'énergie $E_{d_{ref}}^i$ pour cinq valeurs de vitesse stabilisée. Les barres étroites représentent les différents endroits où l'énergie peut aller, soit pour être stockée (p.ex. sous forme d'énergie cinétique), soit car elle y est perdue ; la barre rose en arrière-plan représente le bilan des échanges d'énergie et correspond à la variation totale de l'énergie dans la batterie en fin de manœuvre. Une valeur positive de $E_{d_{ref}}^i$ veut dire que la batterie a été déchargée au cours de la manœuvre, et une valeur négative indique qu'elle a plus de charge qu'au début de la manœuvre.

Étant donné que nous considérons des vitesses stabilisées, il n'y a pas de variation de l'énergie cinétique ; de même, étant donné que $\alpha_r = 0$, l'énergie potentielle du véhicule reste constante sur tous les roulages, d'où l'absence des barres correspondantes sur la Figure 2.6a. La Figure 2.6b montre les gains d'énergie, $\Delta E_{d_{ref}}^i$, par rapport à la manœuvre la plus énergivore (dont la consommation est $\hat{E}_{d_{ref}} = \max E_{d_{ref}}^i$) ; celle-ci peut-être calculée à partir de (2.17). Les valeurs d'énergie de la Figure 2.6 ont été normalisées pour avoir $\hat{E}_{d_{ref}} = 100\%$. La valeur de d_{ref} n'a plus d'importance à cause de la normalisation.

$$\Delta E_{d_{ref}}^i = \hat{E}_{d_{ref}} - E_{d_{ref}}^i \quad (2.17)$$

Nous constatons que la majorité des pertes est associée aux efforts devant être vaincus pour faire avancer le véhicule. Aussi, des quantités conséquentes d'énergie sont perdues dans la motorisation, alors que les pertes dans la batterie sont négligeables. De manière

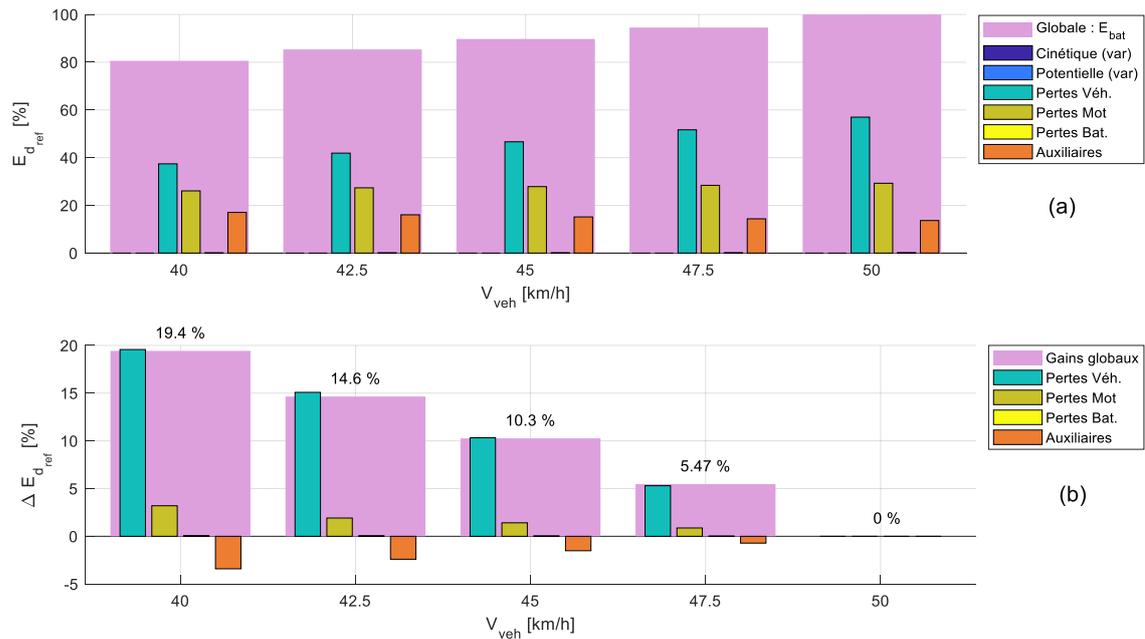


FIG. 2.6 – Effet de réduire la vitesse stabilisée sur la consommation : conduite urbaine. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la RVS

plutôt inattendue, nous constatons qu'une proportion assez importante de l'énergie est utilisée pour répondre à la demande de puissance des auxiliaires.

Lorsque nous nous intéressons aux économies d'énergie obtenues grâce à la RVS, nous constatons sans étonnement que, moins on roule vite, plus on réduit sa consommation. La plupart de ces gains sont associés à la réduction des pertes à l'avancement, et une faible proportion à la réduction de l'énergie perdue dans la motorisation. En revanche, la Figure 2.6b met en évidence que la quantité d'énergie envoyée vers les auxiliaires augmente lorsqu'on réduit la vitesse du véhicule; cela est dû à l'augmentation du temps nécessaire pour parcourir la distance d_{ref} à moindre vitesse, ce qui implique que les consommateurs vont solliciter de la puissance plus longtemps.

La Table 2.1 présente la proportion des économies d'énergie, associées aux différentes sources de pertes. Pour chaque valeur de vitesse stabilisée, les réductions d'énergie ont été normalisées afin d'avoir un bilan de 100%. Cela permet d'évaluer plus facilement la contribution de chaque source de pertes au gain total d'énergie associé à la RVS. Les valeurs affichées permettent de confirmer notre observation précédente. Pour les vitesses les plus faibles, nous constatons qu'une proportion importante de l'énergie « gagnée » dans les différents organes, a dû être dépensée pour répondre à la demande « supplémentaire » des auxiliaires.

Dans notre comparaison, nous considérons que, pour chaque choix de vitesse, le véhicule est parti d'un même point et arrivé à un même endroit; ainsi, lors du déplacement, la consommation due aux auxiliaires a augmentée, alors que la réponse à l'objectif primaire du conducteur, *se rendre à une certaine destination*, a été la même (voire elle a été dégradé car le trajet a pris plus de temps). Compte tenu de la faible consommation des

TAB. 2.1 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la vitesse stabilisée, sur des scénarios urbains

Source de pertes	Vitesse du véhicule [km/h]				
	40	42.5	45	47.5	50
Pertes Véhicule	100.74%	103.01%	100.64%	96.82%	-
Pertes Motorisation	16.47%	13.07%	13.76%	15.92%	-
Pertes Batterie	0.34%	0.36%	0.37%	0.38%	-
Auxiliaires	-17.55%	-16.43%	-14.77%	-13.12%	-

auxiliaires considérée dans notre étude, il est naturel de se demander si, pour des sollicitations plus importantes des consommateurs (p.ex. lorsque la climatisation est allumée), réduire la vitesse du véhicule est une stratégie pertinente. Cela sera considéré dans une section postérieure.

2.2.2 Modulation de l'accélération (MA)

Dans notre étude, les contraintes associées à l'agrément de conduite seront appliquées à travers le choix de la plage de valeurs d'accélération positive à considérer. Ainsi, \check{a}_{veh} correspondra à une faible valeur d'accélération qu'un conducteur *concerné par la consommation* pourrait trouver acceptable ; la limite supérieure d'accélération positive, \hat{a}_{veh} , peut être associée à un conducteur défini comme *sportif* ou *dynamique* [103]. Les valeurs de \check{a}_{veh} et \hat{a}_{veh} nous ont été fournies par Renault S.A.S., pour un certain nombre de contextes de roulages, et elles sont issues des tests empiriques dans des conditions contrôlées ; ces informations sont de nature confidentielle et nous nous limiterons donc à présenter les valeurs du paramètre $\gamma_i \in [\check{\gamma}, 1]^4$, permettant de trouver l'accélération correspondante grâce à (2.5). Ainsi, le paramètre γ_i est un indicateur de l'*agressivité du conducteur* pendant la manœuvre.

Nous avons considéré des manœuvres d'accélération pour passer de $V_0 = 40\text{km/h}$ à $V_f = 50\text{km/h}$, avec $\gamma_i \in \{0.375, 0.53125, 0.6875, 0.84375, 1\}$ comme le montre la Figure 2.7. Un premier constat est l'énorme disproportion entre la variation de l'énergie cinétique du véhicule, et toutes les autres transformations de l'énergie ; cela met en évidence les quantités très importantes d'énergie devant être mobilisées pour faire varier la vitesse du véhicule⁵.

La Figure 2.7b met en évidence que la bonne stratégie pour réduire la consommation est de baisser l'intensité des accélérations positives lors de l'exécution des manœuvres en scénario urbain. En outre, la majorité des gains associées à l'application de cette straté-

4. La limite basse du paramètre, $\check{\gamma}$, est quelque peu inférieure à celle que nous avons utilisée dans [206]. Lors de la publication en question, nous avons décidé de faire des hypothèses assez conservatrices sur l'agrément de conduite car nous considérons principalement ce qu'un conducteur *humain* serait prêt à accepter comme dégradation des performances lorsqu'il est *maître de son véhicule*. En revanche, en considérant un système *actif* d'aide à l'écoconduite, le conducteur pourrait accepter potentiellement un comportement *plus doux* de son véhicule, qu'il pourrait même trouver *rassurant*.

5. Les VE étant, en général, assez lourds.

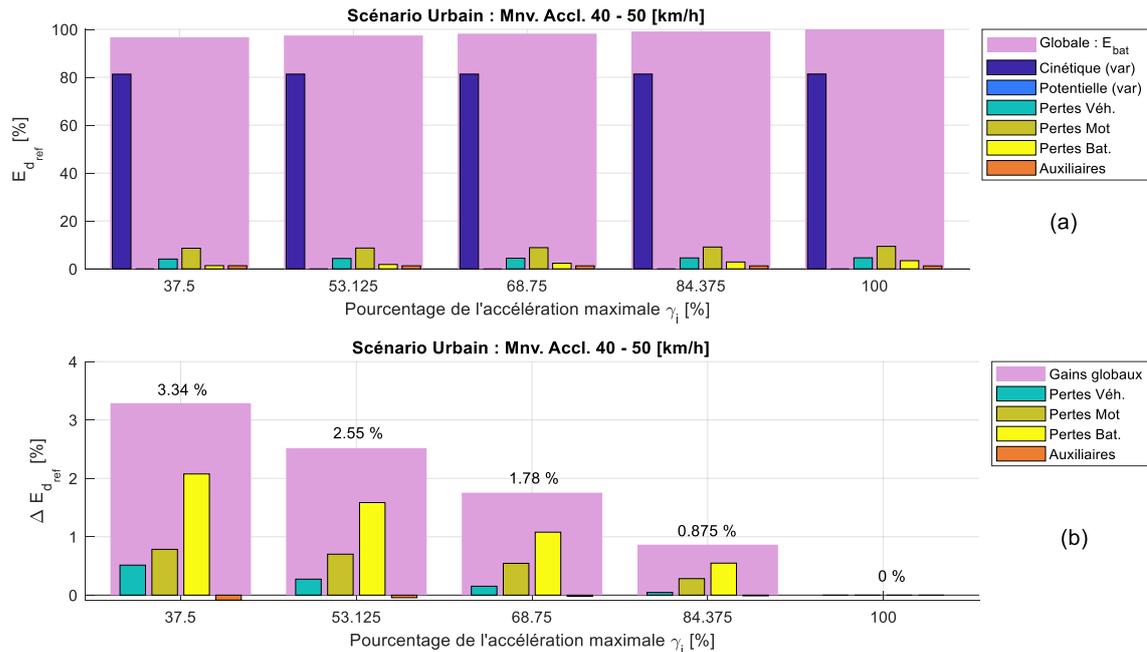


FIG. 2.7 – Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 40 - 50 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

gie, dans le cas étudié, sont dues à la réduction des pertes dans la batterie, tel qu'il est montré sur le Tableau 2.2; la batterie est à l'origine de plus de 60% des gains, sur chaque manœuvre dans le scénario étudié. Cela peut surprendre si nous considérons la faible part de l'énergie perdue dans la batterie sur l'ensemble de l'énergie en jeu pendant la manœuvre (Figure 2.7a). Comme nous l'avons vu, la dissipation d'énergie dans la batterie peut être assimilée à de l'effet joule, et elle croît donc avec le carré du courant, qui est proportionnel au couple, lui-même étant *affine* à l'accélération. Ainsi, moins fort on accélère, moins d'énergie sera perdue dans la batterie.

TAB. 2.2 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la modulation de l'accélération, sur des scénarios urbains

Source de pertes	Pourcentage accélération maximale [%]				
	37.5	53.125	68.75	84.375	100
Pertes Véhicule	15.61%	10.88%	8.68%	5.29%	-
Pertes Motorisation	23.85%	27.87%	31.02%	32.71%	-
Pertes Batterie	63.13%	63.02%	61.45%	63.41%	-
Auxiliaires	-2.59%	-1.78%	-1.16%	-1.41%	-

Il faut néanmoins signaler que l'origine des gains varie fortement selon la situation de conduite. Sur l'Annexe IV quelques exemples sont présentés, où nous voyons, par exemple, qu'à des très faibles vitesses c'est la réduction des pertes dans la motorisation est responsable de la plupart des gains. Cela s'explique en considérant qu'une part importante des pertes dans la motorisation sont de nature résistive, augmentant donc rapidement lors des demandes de couple élevées (cf. section III.1.1.1.2, Figure 1.4). En outre,

l'utilisation plus prolongée des auxiliaires n'a pas un fort impact sur le potentiel de gain associé à la MA ; en tout cas, pour des demandes de puissance modérées.

Indépendamment de l'origine des gains, l'étude paramétrique met en évidence un potentiel considérable de diminution de la consommation, en réduisant l'intensité des accélérations positives. Bien que le pourcentage de gain soit faible en comparaison à celui associé à la RVS, l'ampleur de l'énergie devant être transférée au véhicule pour faire varier sa vitesse rend cette stratégie intéressante.

2.2.3 Modulation de la décélération (MD)

Nous étudierons ensuite l'effet de faire varier l'intensité de la décélération, en milieu urbain. Nous considérerons qu'un conducteur agressif n'anticipe pas pendant les phases de décélération (cf. section III.2.1.3 ; il maintient une vitesse stabilisée jusqu'au moment où il décide de décélérer, et alors il le fait avec une décélération constante. En fonction des vitesses initiale et finale, cette hypothèse peut-être un peu grossière car les conducteurs peuvent faire varier l'intensité de l'accélération au cours d'une même manœuvre, surtout pour les décélérations jusqu'à l'arrêt ; en revanche, cette analyse nous permet d'obtenir une idée *approximative* sur l'influence de l'agressivité du conducteur la consommation d'énergie lors des manœuvres de décélération.

Il est important de signaler également que la capacité d'un conducteur à anticiper sera influencée par le choix du constructeur de la décélération en levée de pied, qui peut décider du niveau de « frein moteur » associé à un VE, en faisant varier la puissance régénérée lors du relâchement de la pédale d'accélération. Si la décélération en levée de pied est trop intense, le conducteur ne pourra que très peu anticiper car son véhicule réduira sa vitesse très rapidement ; en revanche, un « frein moteur » trop faible risque de le déranger, et même d'avoir l'effet contraire : le conducteur pourrait ne plus utiliser le frein moteur, et agir systématiquement sur la pédale de frein. Cela conduirait à des rendements de régénération moindres, et à une augmentation de la fréquence d'utilisation des freins mécaniques.

De même que pour l'étude de la MA, les contraintes liées à l'agrément de conduite seront représentées par la plage de décélération considérée, où $\hat{a}_{veh} < 0$ est l'accélération maximale (décélération minimale) et $\check{a}_{veh} < \hat{a}_{veh}$ est l'accélération minimale (décélération maximale). Le paramètre d'agressivité de conduite sera donc aussi restreint à une plage de valeurs, $\zeta_i \in [\check{\zeta}, 1]$.

La Figure 2.8 présente les gains d'énergie associés à la MD. Le cas étudié est une décélération allant de $V_0 = 50\text{km/h}$ à $V_f = 30\text{km/h}$, avec $\zeta_i \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$. La plus petite valeur se veut représentative de la *décélération naturelle* d'un véhicule conventionnel et, selon le choix de constructeur, il est possible que le conducteur n'y ai pas accès sur son VE. En outre, il faut signaler que le contexte de conduite pourrait ne pas permettre d'exploiter toute cette plage de décélération. Ainsi, les résultats pour les valeurs les plus faibles de ζ_i doivent être considérées comme un potentiel de gain *dans le meilleur des cas*.

Nous pouvons voir que, dans la situation considérée, la meilleure stratégie est la réduction du niveau d'agressivité, en exécutant des décélérations *en douceur*.

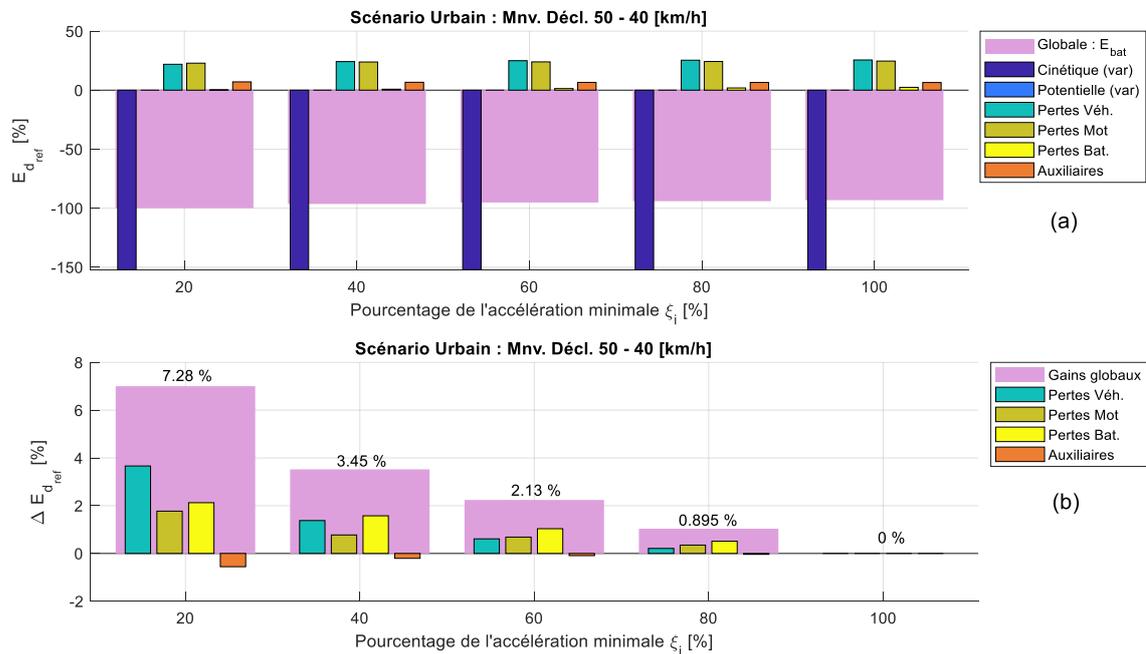


FIG. 2.8 – Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 50 - 40 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

Sur la situation étudiée, la majorité des gains pour le plus faible niveau de décélération ($\xi_i = 20\%$) est due à la réduction de pertes à l'avancement. En revanche, ce n'est pas le cas pour les autres valeurs de ξ_i , où la réduction des pertes dans la batterie et dans la motorisation sont prédominantes. Cela est mis en évidence sur le Tableau 2.3.

TAB. 2.3 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la modulation de la décélération, sur des scénarios urbains

Source de pertes	Pourcentage décélération maximale [%]				
	20	40	60	80	100
Pertes Véhicule	52.29%	39.11%	27.26%	20.41%	-
Pertes Motorisation	25.29%	21.96%	30.56%	33.75%	-
Pertes Batterie	30.35%	44.76%	46.26%	49.51%	-
Auxiliaires	-7.93%	-5.83%	-4.08%	-3.68%	-

Une fois de plus, la distribution des *sources de gain* varie fortement en fonction de la plage de vitesses considérée (voir Annexe IV). En particulier, dans le cas des décélérations en partant des très faibles vitesses, réduire au minimum l'agressivité du véhicule n'est plus, de manière systématique, la meilleure stratégie à adopter, dans la mesure où le potentiel de récupération est faible et l'énergie due à l'utilisation prolongée des auxiliaires surpasse les gains associés à la réduction des pertes dans les différents organes.

En outre, concernant décélérations jusqu'à l'arrêt, nous pouvons nous demander de demander s'il est légitime de considérer l'énergie allant aux auxiliaires comme une variable,

dans la mesure où la position du véhicule jusqu'à son redémarrage seraient imposée par l'infrastructure ou par le trafic (par exemple, lors d'un arrêt devant un feu). Ainsi, la consommation due aux auxiliaires serait fixée par le contexte, indépendamment de l'agressivité du conducteur.

2.2.4 Comparaison du potentiel des stratégies d'écoconduite

Jusqu'à présent nous avons étudié le potentiel de réduction de la consommation d'énergie des différentes stratégies d'écoconduite, en analysant l'origine des gains. Cependant, il est nécessaire également de comparer les différentes stratégies entre elles, afin de déterminer laquelle est la plus pertinente pour une situation donnée.

La Figure 2.9 présente la consommation et le gain d'énergie associés à chaque stratégie. Pour pouvoir faire des comparaisons justes, la consommation est normalisée à une distance de 1 km. La Figure 2.9a présente la consommation dans le pire des cas, (celle associée à un conducteur *dynamique*); la Figure 2.9b présente les économies d'énergie pour chaque stratégie d'écoconduite, c'est-à-dire, combien d'énergie en moins est prélevée de la batterie (ou y est stockée) lorsqu'un écoconducteur est à bord du véhicule. Il en est de même pour les autres figures de cette section, où toutes les valeurs ont été normalisées pour que la variation maximale d'énergie dans la batterie soit de 1 (en valeur absolue).

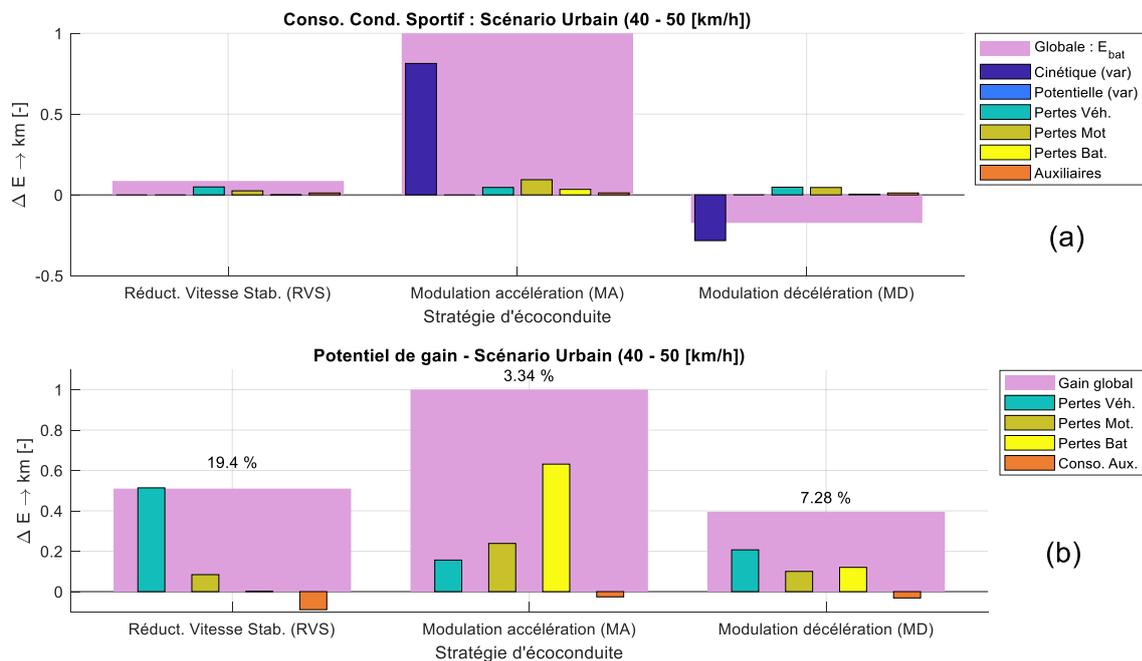


FIG. 2.9 – Synthèse du potentiel de gain des stratégies d'écoconduite, sur des scénarios urbains (40 km/h - 50 km/h); consommation équivalente à un déplacement de 1 km. Les unités ont été normalisées pour avoir un gain global maximum de 1. (a) Consommation absolue dans le pire des cas (conducteur sportif); (b) Gain d'énergie dû à l'écoconduite

La Figure 2.9 met en évidence que, dans le cas étudié, la stratégie d'écoconduite offrant le plus grand potentiel de gain, est la MA et, plus explicitement, la réduction du niveau d'accélération du véhicule. Même si le pourcentage de réduction de la consommation est

relativement bas, l'importante quantité d'énergie en jeu fait que, dans l'absolu, le potentiel de gain associé à la MA soit plus grand que celui des autres stratégies, lors qu'on considère une distance d'application équivalente. Ce résultat est compatible avec l'étude de terrain réalisé par Neumann et al. [153], ce qui sera développé dans la section dédiée à la discussion.

2.3 POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE DES STRATÉGIES D'ÉCOCONDUITE : SCÉNARIOS EXTRA-URBAINS

Objectif de la section

Évaluer et comparer le potentiel de gains des stratégie d'écoconduite, lors de la conduite extra-urbaine

Désormais, nous étudierons le potentiel de gain des stratégies d'écoconduite lors des situations extra-urbaines. De même que pour la section précédente, nous considérons que la route est parfaitement plate ($\alpha_r = 0$). Aussi, les états de la batterie et la consommation des auxiliaires sont les mêmes que pour le cas urbain ($SoC = 70\%$, $\Theta_{bat} = 30^\circ C$ et $P_{aux} = 300W$).

2.3.1 Réduction de la vitesse stabilisée (RVS)

La conduite en dehors des agglomérations est caractérisée par des vitesses plus importantes et plus régulières. Aussi, le contexte de conduite offre au conducteur plus de souplesse en ce qui concerne le choix de la vitesse de son véhicule ; par exemple, lors de la conduite sur autoroute en France, on peut décider de rouler sur la voie de droite, habituellement à 110 km/h au lieu de 130 km/h. Le potentiel de gain associé à ce comportement est présenté sur la Figure 2.10.

Nous constatons que les gains sont dûs principalement à la réduction des pertes à l'avancement du véhicule ; en effet, les pertes aérodynamiques évoluent avec le cube de la vitesse, faisant que ce terme *explose* pour des valeurs de vitesse élevées. En outre, la demande de puissance des auxiliaires est pratiquement négligeable dans le cas étudié. Le Tableau 2.4 vient confirmer ces affirmations.

TAB. 2.4 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la vitesse stabilisée, sur des scénarios extra-urbains

Source de pertes	Vitesse du véhicule [km/h]				
	110	115	120	125	130
Pertes Véhicule	88.28%	88.58%	88.7%	88.75%	-
Pertes Motorisation	9.29%	8.75%	8.41%	8.11%	-
Pertes Batterie	3.25%	3.42%	3.61%	3.81%	-
Auxiliaires	-0.81%	-0.76%	-0.72%	-0.67%	-

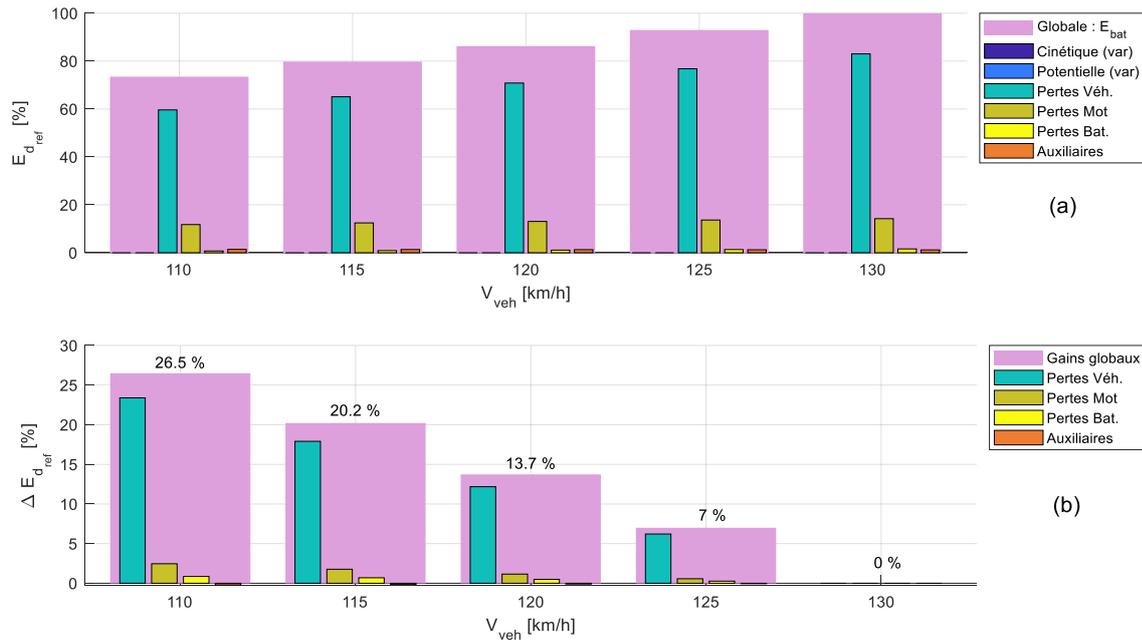


FIG. 2.10 – Effet de réduire la vitesse stabilisée sur la consommation: conduite extra-urbaine. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la RVS

2.3.2 Modulation de l'accélération (MA)

Pour l'étude du potentiel de gain offert par la MA, nous avons considéré une accélération allant de $V_0 = 110\text{km/h}$ à $V_f = 130\text{km/h}$, avec $\gamma_i \in \{0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1\}$. Pour des scénarios extra-urbains, les valeurs de γ_i ont été déterminés par rapport à des limites cohérentes avec la conduite extra-urbaine⁶. En revanche, dans le scénario considéré, l'accélération associée à un conducteur *sportif* excédait la capacité du système; ainsi, nous avons défini une valeur $\gamma = 1$ au voisinage de la limite d'accélération du véhicule étudié.

La Figure 2.11 présente le potentiel de gain de la MA dans un contexte extra-urbain. Nous constatons une fois de plus que la réduction de la résistance à l'avancement joue un rôle prépondérant sur les gains d'énergie. En revanche, une part non négligeable des gains est due à la diminution des pertes dans la batterie et la motorisation. Aussi, l'effet de la consommation des auxiliaires considérée est négligeable. Les informations présentées sur le Tableau 2.5 appuient ces affirmations.

2.3.3 Modulation de la décélération (MD)

Concernant le potentiel de gain associé à la MD, nous avons considéré une décélération à partir de $V_0 = 130\text{km/h}$ jusqu'à $V_f = 110\text{km/h}$, avec $\zeta_i \in \{0.3, 0.475, 0.65, 0.825, 1\}$. Dans le cas des décélération, le système n'attend pas ses limites lors de la demande

6. Comme vu au Chapitre II.1, il est vraisemblable que la vitesse ait une influence sur la perception de l'accélération, dans la mesure où elle se traduirait par des retours visuels, auditifs (et autres). En particulier, des neurones de la rétine, envoient des projections sur les noyaux vestibulaires; cela est associé aux réflexes vestibulo-oculaires [76]. Ainsi, il est même possible que la réponse des noyaux vestibulaires soit influencée par la perception visuelle de vitesse, ce qui pourrait affecter le *ressenti* des retours vestibulaires.

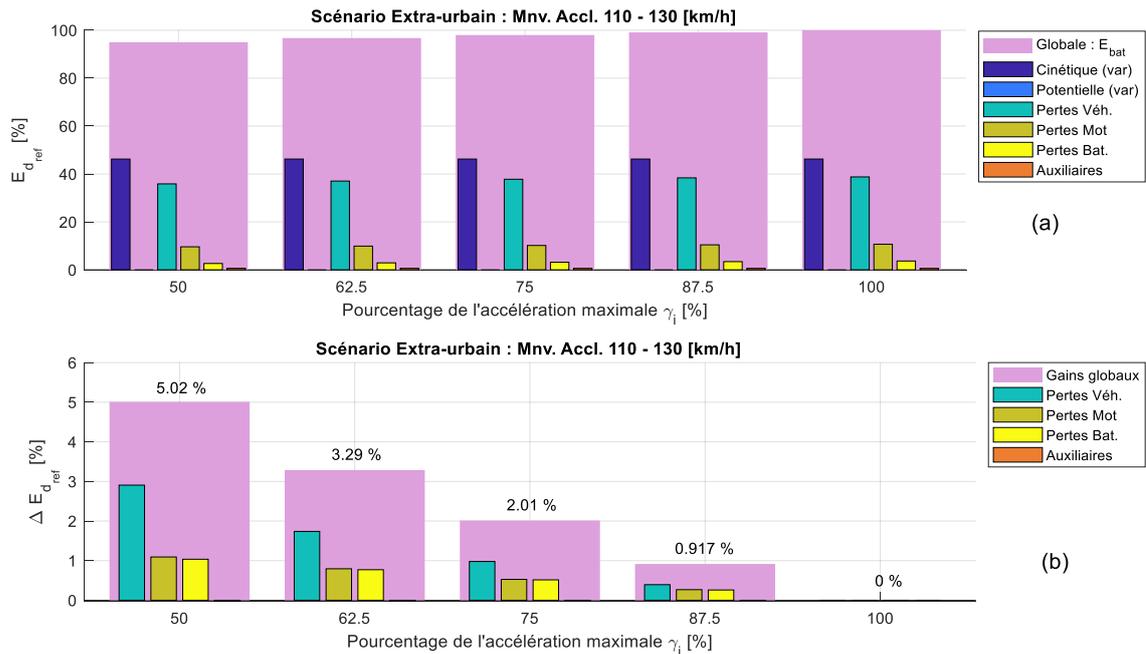


FIG. 2.11 – Effet de la MA sur la consommation : conduite extra-urbaine - accélération de 110 - 130 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

TAB. 2.5 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la modulation de l'accélération, sur des scénarios extra-urbains

Source de pertes	Pourcentage accélération maximale [%]				
	50	62.5	75	87.5	100
Pertes Véhicule	58.03%	52.85%	48.63%	42.92%	-
Pertes Motorisation	21.8%	24.17%	26.19%	29.17%	-
Pertes Batterie	20.67%	23.45%	25.59%	28.33%	-
Auxiliaires	-0.50%	-0.46%	-0.41%	-0.43%	-

de la décélération minimale; cela s'explique par le fait que, lors des décélérations, le système n'a plus besoin de compenser les efforts à l'avancement, qui contribuent même à décélérer le véhicule, en *délestant* la motorisation. Les limites d'accélération considérées correspondent à ce que le conducteur pourrait tolérer sur des scénarios à *criticité modérée*; sur des scénarios à plus haute criticité, il pourrait accepter des valeurs de décélération plus importantes car l'enjeu principal serait sa propre sécurité.

Les résultats associés à la consommation et au potentiel de gain sont présentés sur la Figure 2.12. Les valeurs affichées méritent quelques explications: d'une part, sur les ordonnées de la Figure 2.12 nous avons de pourcentages assez importants, ce qui est dû au fait que sur ce scénario c'est la manœuvre à moindre agressivité qui sert de référence de consommation (car la plus grande variation d'énergie dans la batterie lui est associée). Aussi, les grands pourcentages de gain par rapport au *conducteur sportif* peuvent surprendre; ils s'expliquent par la faible quantité d'énergie récupérée dans la batterie à la fin de la manœuvre avec la décélération la plus forte.

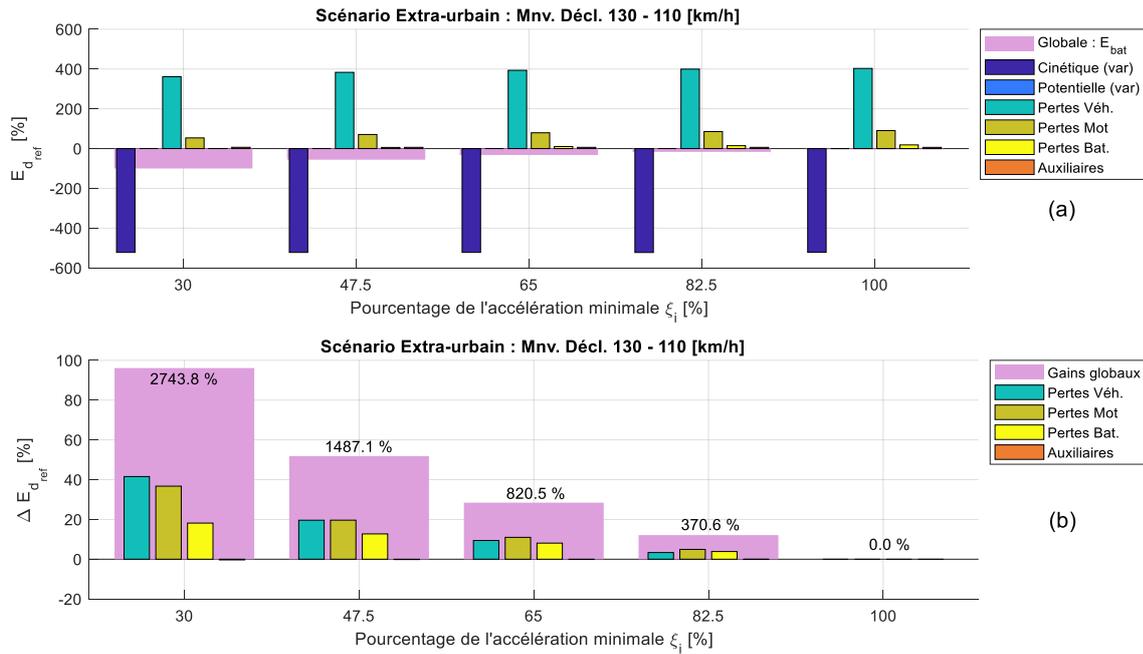


FIG. 2.12 – Effet de la MD sur la consommation : conduite extra-urbaine - décélération de 130 - 110 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

Les valeurs présentées en rose correspondent à l'énergie emmagasinée dans la batterie, en partant du point où la plus douce manœuvre a été amorcée. Ainsi, elle fait le bilan entre l'énergie dépensée avant de déclencher la décélération, et l'énergie récupérée pour réduire la vitesse du véhicule. Nous réalisons qu'avec la plus forte décélération ces deux énergies sont pratiquement compensées, et que la batterie se trouve avec à peu près la même énergie au début et à la fin de la manœuvre. En revanche, sur les autres manœuvres, moins d'énergie a été dépensée pendant la première phase car on a utilisé l'énergie cinétique stockée dans le véhicule pour le faire avancer, obtenant ainsi un meilleur bilan énergétique. Par exemple, sur la manœuvre la plus douce, on a récupéré plus de 27 fois d'énergie en plus qu'avec la décélération du conducteur sportif !

Si nous considérons d'où viennent les gains, nous réalisons que les pertes dans les différents organes (Véhicule, Motorisation et Batterie) ont des ordres de grandeurs similaires. Le Tableau 2.6 appuie cette affirmation. Il semblerait donc que la consommation est améliorée parce qu'on réduit plus tôt sa vitesse, diminuant les pertes à l'avancement, mais aussi par la plus faible demande de couple régénératif à la motorisation, devant travailler dans une zone d'opération à haut défluxage ; aussi, la grande puissance demandée à la batterie fait que ses pertes sont très sensibles aux variations dans la puissance sollicitée.

Sur ce dernier point, un levier pour réduire les pertes dans la batterie, consisterait à envoyer de l'énergie aux auxiliaires pendant les phases de freinage, en alimentant d'avantage tous les systèmes qui auraient une certaine « inertie énergétique » (p.ex. le système de climatisation). Cela permet d'une part d'amoindrir l'énergie perdue à cause du haut courant entrant dans la batterie, mais aussi d'alimenter les consommateurs électriques

TAB. 2.6 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la modulation de la décélération, sur des scénarios extra-urbains

Source de pertes	Pourcentage décélération maximale [%]				
	30	47.5	65	82.5	100
Pertes Véhicule	43.24%	37.86%	33.14%	27.69%	-
Pertes Motorisation	38.22%	37.89%	38.68%	40.72%	-
Pertes Batterie	18.9%	24.57%	28.47%	31.92%	-
Auxiliaires	-0.36%	-0.32%	-0.29%	-0.32%	-

directement, plutôt que de stocker d'abord l'énergie dans la batterie pour ensuite la dépenser pour alimenter les consommateurs, avec une *double perte de rendement*.

2.3.4 Comparaison du potentiel des stratégies d'écoconduite

Finalement, nous avons comparé le potentiel de gain des trois stratégies étudiées, en utilisant le même principe que dans la section III.2.2.4. Cela est présenté sur la Figure 2.13. Dans le cas de la conduite extra-urbaine, la stratégie offrant le plus grand potentiel pour réduire la consommation, sur une distance d'application équivalente, est la RVS. Toutefois, le potentiel de gain associé aux autres stratégies est du même ordre de grandeur, donc l'idéal est d'appliquer intelligemment une combinaison des trois, selon ce que le conducteur serait prêt à accepter et de la *marge de manœuvre* autorisée par le contexte de conduite.

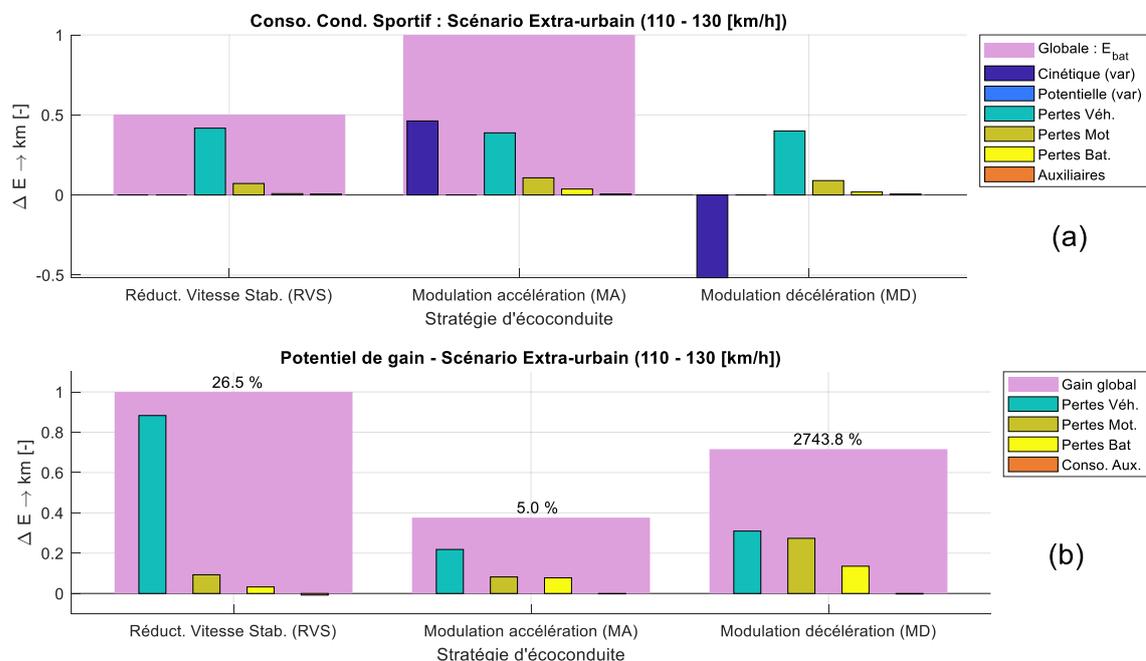


FIG. 2.13 – Synthèse du potentiel de gain des stratégies d'écoconduite, sur des scénarios extra-urbains (110 km/h - 130 km/h) ; consommation équivalente à un déplacement de 1 km. Les unités ont été normalisées pour avoir un gain global maximum de 1. (a) Consommation absolue dans le pire des cas (conducteur sportif) ; (b) Gain d'énergie dû à l'écoconduite

2.4 INFLUENCE DE L'UTILISATION DES AUXILIAIRES SUR L'ÉCOCONDUITE

Objectif de la section

Analyser comment l'utilisation intensive des auxiliaires électriques affecte l'application et l'efficacité de l'écoconduite

Les résultats que nous venons de présenter ont mis en évidence que la consommation des auxiliaires électriques augmente lorsque la durée des manœuvres se prolonge. Les « pertes » dues aux auxiliaires diminuent donc lors d'une conduite plus *sportive* ; ce phénomène s'oppose au comportement énergétique des autres organes, qui tendent à avoir un meilleur rendement pour un style de conduite *doux*. Si la demande de puissance des auxiliaires est faible, ce sont les autres pertes qui prédominent, ayant pour conséquence une meilleure efficacité énergétique en *réduisant l'agressivité* de la conduite. En revanche, il est naturel de se demander si cela reste vrai lors des sollicitations plus importantes des auxiliaires, par exemple, quand le système de climatisation est allumé. Cette section essaiera de répondre à cette question.

Pour nos études nous considérerons donc, en plus de la consommation de base des auxiliaires électriques nécessaires au fonctionnement du véhicule, l'utilisation de la climatisation, ce qui ajoutera environ 2kW à la demande de puissance à la batterie ; ainsi, nous considérerons $P_{aux} = 2300W$.

2.4.1 Scénarios urbains

Dans un premier temps, nous considérerons la conduite en ville, en étudiant les mêmes scénarios que dans les sections précédentes. Nous ferons varier uniquement, dans la mesure du possible, la valeur de P_{aux} .

2.4.1.1 Réduction de la vitesse stabilisée (RVS)

La Figure 2.14 présente le comportement énergétique associé à la RVS. Nous constatons que, lorsque la climatisation est allumée, réduire considérablement sa vitesse stabilisée se traduit par une plus grande consommation d'énergie ! En effet, les gains associés à la diminution de la résistance à l'avancement, et des pertes dans la motorisation, ne permettent pas de compenser le surplus d'énergie dû à l'utilisation de la climatisation pendant une plus longue durée. En revanche, une légère RVS produit une légère diminution de la consommation, mais cette valeur reste assez faible.

Le Tableau 2.7 présente les proportions d'énergie perdue dans les différents organes ou envoyée aux auxiliaires, comme des pourcentages de l'énergie totale dépensée. Le changement de signe dans les pourcentages est dû au fait que le bilan est négatif pour $V_{veh} = 40\text{km/h}$ et $V_{veh} = 42.5\text{km/h}$ et positif ou nul pour les autres valeurs. Les grandes valeurs traduisent le fait que l'énergie économisée grâce à la réduction de la vitesse finit

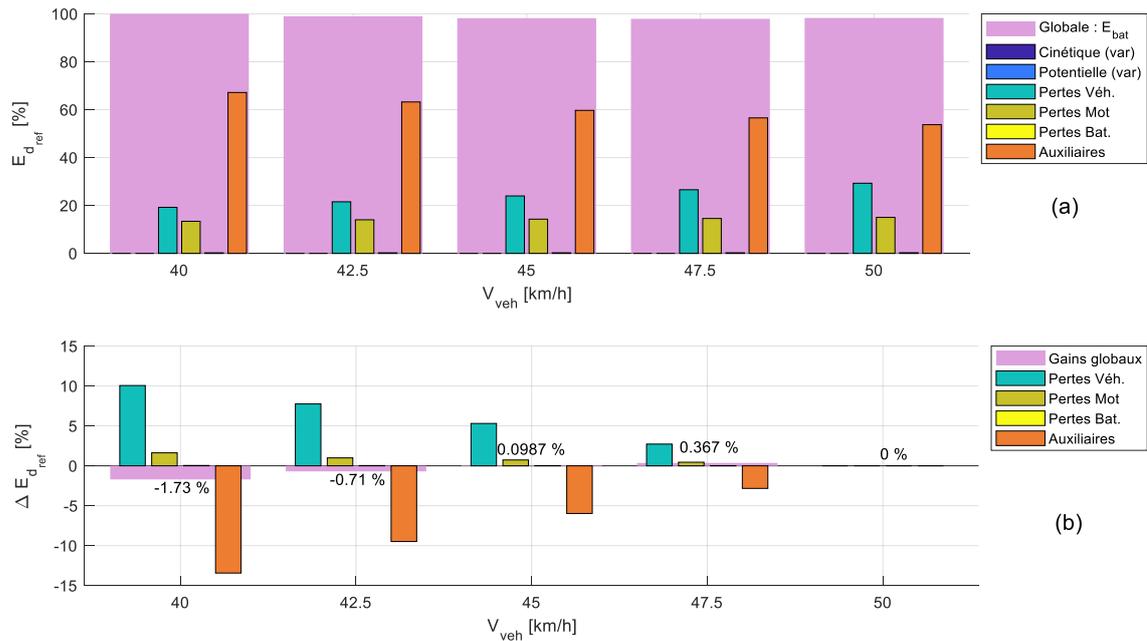


FIG. 2.14 – Effet de réduire la vitesse stabilisée sur la consommation, lorsque la climatisation est allumée : conduite urbaine. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la RVS

TAB. 2.7 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la vitesse stabilisée, sur des scénarios urbains - climatisation allumée

Source de pertes	Vitesse du véhicule [km/h]				
	40	42.5	45	47.5	50
Pertes Véhicule	-590.2%	-1111.0%	547.1%	755.0%	-
Pertes Motorisation	-95.4%	-142.8%	756.6%	125.0%	-
Pertes Batterie	-2.6%	-5.1%	27.0%	4.1%	-
Auxiliaires	788.2%	1358.9%	-6155.0%	-784.1%	-

par se perdre dans les auxiliaires, conduisant à des gains infimes, voire même à une surconsommation d'énergie. Ainsi, la RVS n'est pas une stratégie d'écoconduite pertinente en ville lors des sollicitations importantes des consommateurs électriques et, en particulier, quand la climatisation est allumée.

2.4.1.2 Modulation de l'accélération (MA)

La Figure 2.15 montre la consommation et le potentiel de gain associés à la MA, pour des sollicitations importantes de puissance par les auxiliaires. Les résultats sont relativement proches de ceux où la climatisation n'est pas allumée (cf. section III.2.2.2). Il y a néanmoins, une réduction du potentiel de gain à cause des demandes prolongées d'énergie des auxiliaires.

Le Tableau 2.8 permet de quantifier l'effet des auxiliaires sur le gain potentiel d'énergie. Par exemple, pour la manœuvre la moins agressive, la consommation des auxiliaires s'élève à 23.82% de l'énergie totale récupérée, alors qu'elle représentait à peine 2.59%

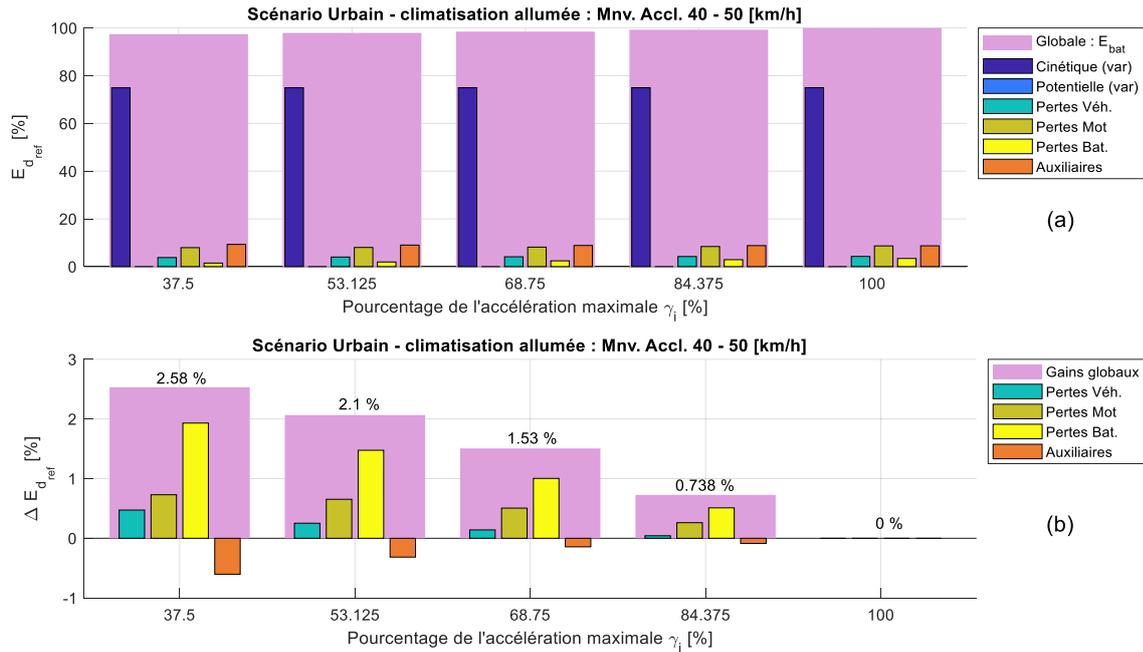


FIG. 2.15 – Effet de la MA sur la consommation, lorsque la climatisation est allumée : conduite urbaine - accélération de 40 - 50 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

TAB. 2.8 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la modulation de l'accélération, sur des scénarios urbains - climatisation allumée

Source de pertes	Pourcentage accélération maximale [%]				
	37.5	53.125	68.75	84.375	100
Pertes Véhicule	18.69%	12.22%	9.32%	5.8%	-
Pertes Motorisation	28.83%	31.63%	33.56%	35.92%	-
Pertes Batterie	76.3%	71.45%	66.65%	70.13%	-
Auxiliaires	-23.82%	-15.29%	-9.53%	-11.85%	-

quand la climatisation n'était pas allumée (cf. Tab. 2.2). Ainsi, nous pouvons conclure que, lors des roulages urbains, si la climatisation ou d'autres consommateurs électriques sont allumés, réduire son agressivité lors des manœuvres d'accélération reste une stratégie d'écoconduite pertinente ; en revanche, le potentiel de gain sera moindre.

2.4.1.3 Modulation de la décélération (MD)

La Figure 2.16 présente la consommation et le gain associé à la MD. En faisant abstraction de la demande supplémentaire des auxiliaires, les résultats sont relativement proches de ceux de la section III.2.2.3. Il y a eu une légère réduction dans les pertes batterie, due au fait qu'une part de la puissance régénérée par la motorisation est envoyée directement aux consommateurs électriques, permettant à la batterie d'avoir un meilleur rendement. En revanche, cette valeur est négligeable par rapport à la demande supplémentaire des auxiliaires pendant la manœuvre ; ainsi, à la fin, moins d'énergie cinétique stockée dans le véhicule est récupérée par la batterie.

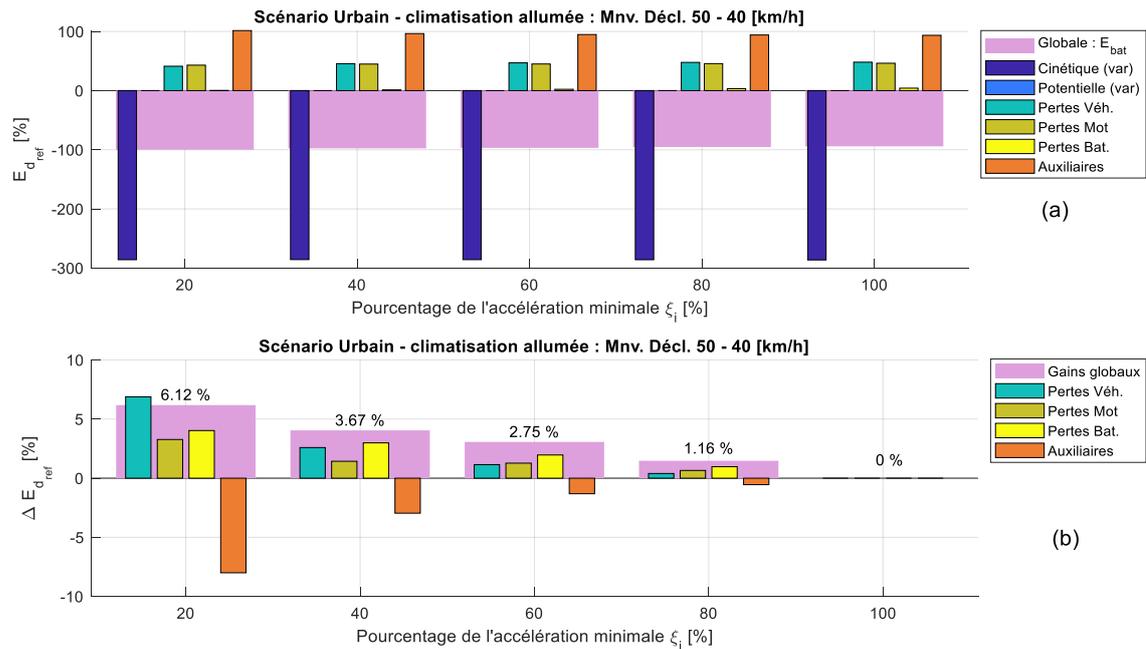


FIG. 2.16 – Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 50 - 40 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

TAB. 2.9 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la modulation de la décélération, sur des scénarios urbains

Source de pertes	Pourcentage décélération maximale [%]				
	20	40	60	80	100
Pertes Véhicule	111.38%	64.01%	37.42%	26.95%	-
Pertes Motorisation	52.94%	35.34%	41.46%	44.38%	-
Pertes Batterie	65.19%	73.83%	64.01%	65.89%	-
Auxiliaires	-129.52%	-73.18%	-42.89%	-37.22%	-

La Figure 2.16b et le Tableau 2.9 mettent en évidence que la durée supplémentaire des décélérations *en douceur*, se traduisant par une sollicitation prolongée des auxiliaires, diminue le potentiel de gain de la MD. Ainsi, lorsque le système de climatisation ou d'autres consommateurs électriques sont allumés, réduire l'agressivité en anticipant les décélérations reste une stratégie pertinente, mais le gain potentiel est fortement réduit.

2.4.2 Comparaison du potentiel des stratégies d'écoconduite : scénarios urbains

La Figure 2.17 compare le potentiel de gain maximum associé aux différentes stratégies d'écoconduite, lorsque la climatisation est éteinte, et quand elle est allumée. Nous constatons que le potentiel de gain associé à la MA et à la MD diminue, mais il reste conséquent. En revanche, l'utilisation intensive des auxiliaires rend la RVS complètement inefficace : non seulement on perd de l'énergie, mais on rallonge aussi inutilement la durée du trajet.

On peut imaginer qu'une partie des résultats présentés sur Neumann et al. [153], où la RVS n'a pas eu de corrélation significative avec la réduction de la consommation d'énergie,

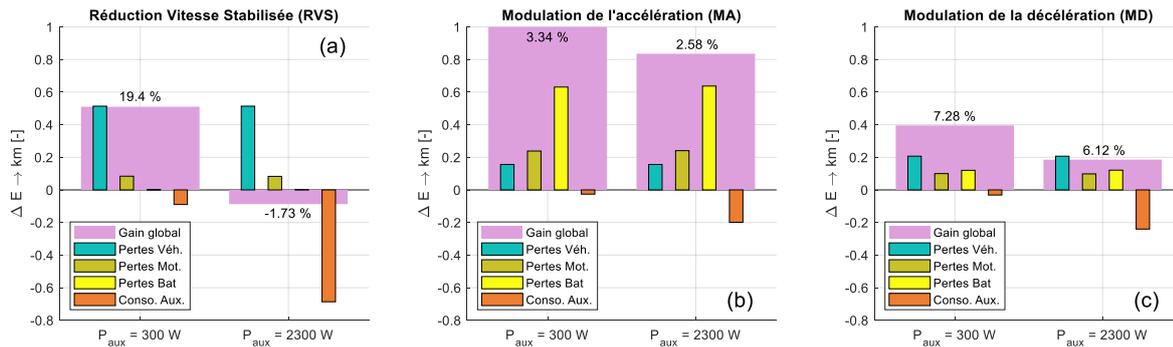


FIG. 2.17 – Influence des auxiliaires électriques sur le potentiel de gain énergétique des stratégies d'écoconduite : scénarios urbains (40 km/h - 50 km/h) ; gains équivalente à un déplacement de 1 km. Les unités ont été normalisées pour avoir un gain global maximum de 1. (a) Gain dû à la RVS ; (b) Gain dû à la MA ; (c) Gain dû à la MD

s'explique par le fait que la diminution de la consommation dans les différents organes du VE, a été compensée par une surconsommation due à la demande plus prolongée des consommateurs électriques (ainsi que des pertes fixes).

2.4.3 Scénarios extra-urbains

Nous étudierons désormais des scénarios de conduite extra-urbaine. Sauf mention explicite, les scénarios considérés seront les mêmes que pour la section III.2.3, à l'exception de la valeur de P_{aux} .

2.4.3.1 Réduction de la vitesse stabilisée (RVS)

La Figure 2.18 et le Tableau 2.10 présentent la consommation et le potentiel de gain de la RVS sur autoroute, lorsque la climatisation est allumée. Nous constatons que l'effet de l'utilisation des consommateurs électriques sur l'efficacité de cette stratégie est beaucoup moins important que dans le cas urbain. La meilleure stratégie est donc de diminuer sa vitesse autant que possible, même si le potentiel de gain souffre d'une certaine dégradation.

TAB. 2.10 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la vitesse stabilisée, sur des scénarios extra-urbains - climatisation allumée

Source de pertes	Vitesse du véhicule [km/h]				
	110	115	120	125	130
Pertes Véhicule	93.04%	93.06%	92.89%	92.68%	-
Pertes Motorisation	9.81%	9.2%	8.80%	8.46%	-
Pertes Batterie	3.7%	3.87%	4.06%	4.25%	-
Auxiliaires	-6.54%	-6.13%	-5.74%	-5.39%	-

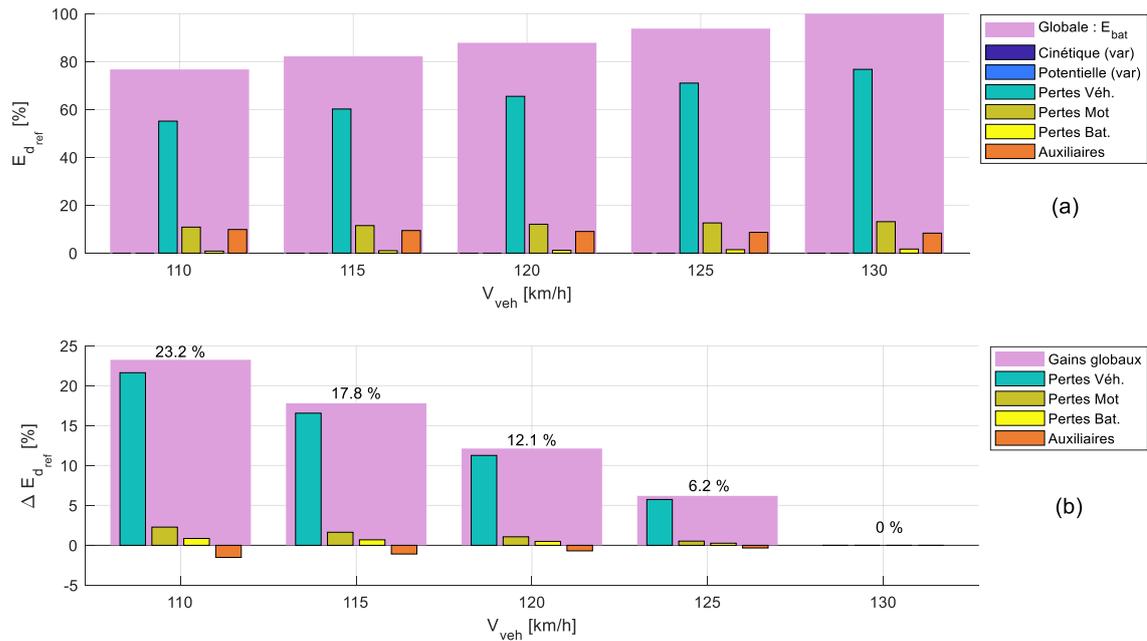


FIG. 2.18 – Effet de réduire la vitesse stabilisée sur la consommation, lorsque la climatisation est allumée : conduite extra-urbaine. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la RVS

2.4.3.2 Modulation de l'accélération (MA)

La Figure 2.18 présente la consommation et le potentiel de gain de la MA lors de la conduite extra-urbaine, avec une sollicitation importantes des consommateurs électriques. Dans ce cas, l'effet de l'utilisation des auxiliaires sur le potentiel de gain n'est plus négligeable, le gain d'énergie maximum chute de 5.02% (cf. Fig. 2.11) à 4.6%. Toutefois, l'écoconduite est toujours associée à une diminution de l'intensité des accélérations, autant que le contexte de roulage le permettra.

TAB. 2.11 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la modulation de l'accélération, sur des scénarios extra-urbains - climatisation allumée

Source de pertes	Pourcentage accélération maximale [%]				
	50	62.5	75	87.5	100
Pertes Véhicule	59.77%	54.27%	49.75%	43.96%	-
Pertes Motorisation	22.52%	24.88%	26.85%	29.93%	-
Pertes Batterie	21.68%	24.48%	26.60%	29.45%	-
Auxiliaires	-3.96%	-3.63%	-3.21%	-3.34%	-

Le Tableau 2.10 nous permet de voir que l'allumage de la climatisation se traduit par une perte de plus de 3% du potentiel de gain associé à la MA, pour toutes les valeurs de γ_i considérées.

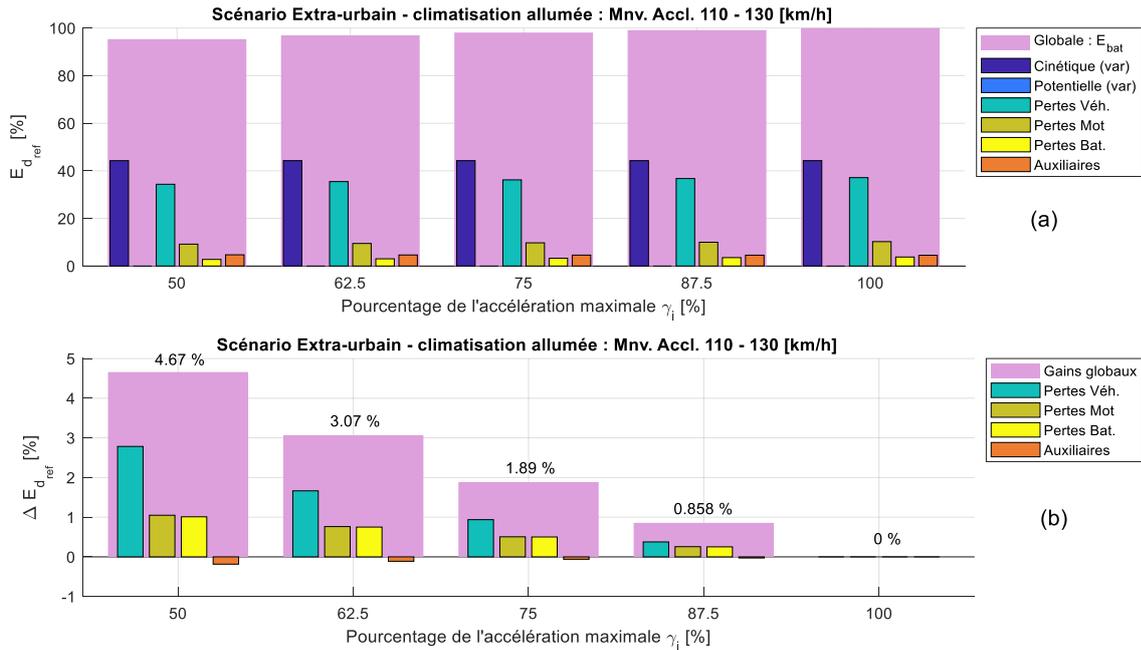


FIG. 2.19 – Effet de la MA sur la consommation, lorsque la climatisation est allumée : conduite extra-urbaine - accélération de 110 - 130 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

2.4.3.3 Modulation de la décélération (MD)

La Figure 2.20 présente les résultats associés à la MD. Nous constatons une influence non-négligeable de la demande des auxiliaires sur l'énergie totale récupérée pendant la manœuvre. En effet, avec la climatisation éteinte (cf. section III.2.3.3), le bilan d'énergie dans la batterie était négatif (donc on avait *rechargé* la batterie à la fin de la manœuvre), même pour le style de conduite le plus agressif ; cela veut dire que l'énergie récupérée pendant la décélération était plus importante que celle dépensée pendant la phase à vitesse stabilisée. Ce n'est plus le cas quand la climatisation est allumée : un conducteur *sportif* se retrouverait avec un bilan batterie défavorable, indiquant que l'énergie récupérée ne permet pas de compenser la dépense pendant la phase stabilisée.

TAB. 2.12 – Distribution des gains d'énergie en fonction de la modulation de la décélération, sur des scénarios extra-urbains - climatisation allumée

Source de pertes	Pourcentage décélération maximale [%]				
	30	47.5	65	82.5	100
Pertes Véhicule	44.16%	38.53%	33.66%	28.16%	-
Pertes Motorisation	39.05%	38.61%	39.34%	41.49%	-
Pertes Batterie	19.62%	25.36%	29.28%	32.86%	-
Auxiliaires	-2.83%	-2.51%	-2.28%	-2.52%	-

La Figure 2.20b et le Tableau 2.12 mettent en évidence qu'écoconduire consiste à minimiser son agressivité lors des phases de décélération.

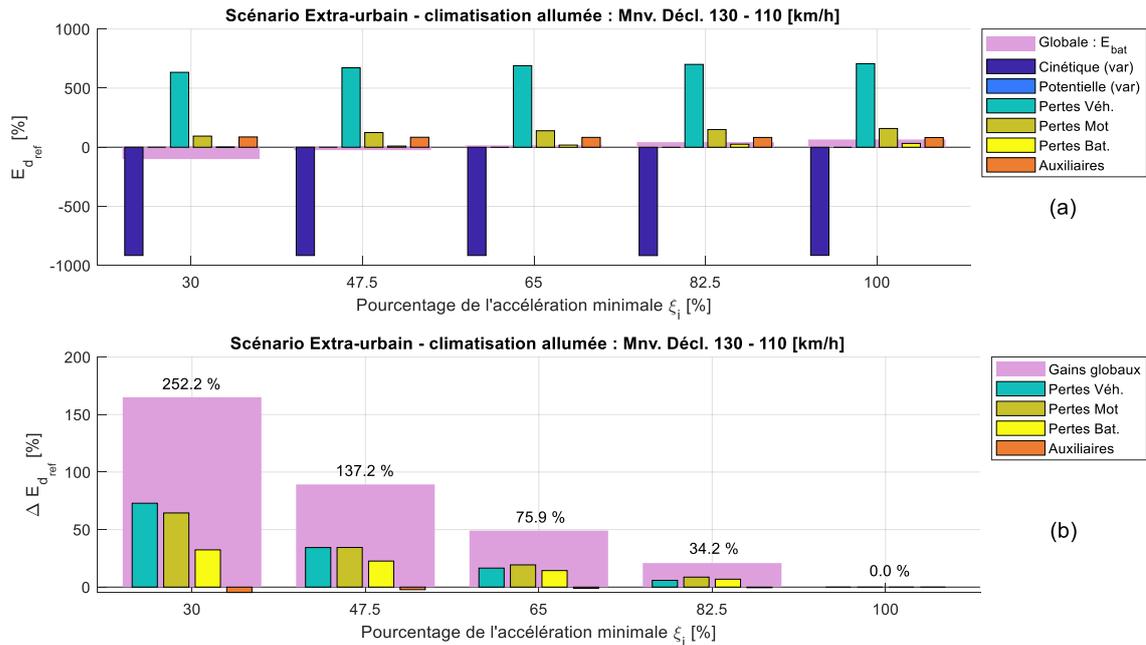


FIG. 2.20 – Effet de la MD sur la consommation, lorsque la climatisation est allumée : conduite extra-urbaine - décélération de 130 - 110 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

2.4.4 Comparaison du potentiel des stratégies d'écoconduite : scénarios extra-urbains

Finalement, nous avons analysé la perte de potentiel due à une *utilisation intensive* des auxiliaires électriques. Cela est présenté sur la Figure 2.21. Nous constatons que l'effet l'utilisation intensive des auxiliaires a un impact beaucoup moins important sur le potentiel de gain associé à l'écoconduite, que lors de la conduite en ville. Cela est dû à la moindre proportion de la puissance demandée par les auxiliaires par rapport à celle qui est nécessaire pour faire avancer le véhicule (avec prise en compte pertes dans les différents organes). Ainsi, sur des scénarios extra-urbains, les leviers permettant d'avoir une conduite écologique restent les mêmes, indépendamment de l'utilisation des auxiliaires.

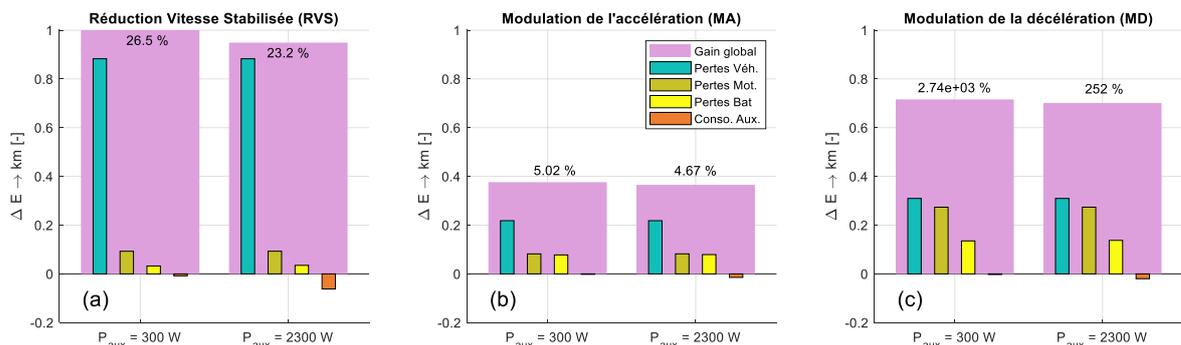


FIG. 2.21 – Influence des auxiliaires électriques sur le potentiel de gain énergétique des stratégies d'écoconduite: scénarios extra-urbains (110 km/h - 130 km/h); gains équivalente à un déplacement de 1 km. Les unités ont été normalisées pour avoir un gain global maximum de 1. Par des contraintes d'espace, les légendes sont présentées une seule fois. (a) Gain dû à la RVS; (b) Gain dû à la MA; (c) Gain dû à la MD

Nous attirons l'attention sur l'interprétation de nos résultats. Ils n'indiquent pas que l'utilisation des auxiliaires n'ait pas une influence sur la consommation, et donc une pé-

nalisation sur l'autonomie; c'est tout le contraire! En revanche, cette étude montre que, mise à part la RVS en ville, l'écoconduite reste un levier pertinent pour réduire la consommation même si le conducteur utilise de manière intensive les consommateurs de son véhicule.

Si l'on veut maximiser son autonomie, la meilleure stratégie consiste à appliquer l'écoconduite, tout en limitant autant que possible l'utilisation des auxiliaires du véhicule.

2.5 DISCUSSION

Objectif de la section

Faire le point sur ce que nous avons appris

Cette section a été consacrée à l'étude du potentiel de gain de la conduite écologique, dans les contextes urbain et extra-urbain. L'approche proposée permet, malgré sa simplicité (même grâce à celle-ci), d'expliquer l'origine de gains pour mieux comprendre les interactions énergétiques ayant lieu dans le véhicule. De même, elle offre la possibilité d'associer les gains d'énergie aux variables sur lesquelles le conducteur peut jouer (*l'accélération* et la *vitesse stabilisée*), et qui ont un impact potentiel sur son agrément de conduite. Cela permet d'avoir une notion de *coût de la sportivité* lors de la conduite d'un VE.

Les analyses présentées ne tiennent pas compte des contraintes cinématiques imposées par l'infrastructure et par le trafic, pouvant amoindrir le potentiel de gain. De même, selon le contexte de conduite, la possibilité d'appliquer les différentes stratégies ne sera pas la même. Par exemple, sur autoroute, on passe plus de temps à des vitesses stabilisées, alors qu'en ville, on est plus souvent confronté à des situations où il faut faire varier la vitesse du véhicule. Ainsi, la *réduction de la vitesse stabilisée* est *a priori* la stratégie la plus pertinente lors des roulages autoroutiers alors que, lors de la conduite en ville, il vaut mieux privilégier la *réduction de l'agressivité* (c-à-d, la diminution de l'intensité des accélérations et décélérations).

La considération de l'impact du trafic et de l'infrastructure sur le potentiel de gain de l'écoconduite est une perspective intéressante pour donner une suite à ces analyses.

En outre, la section III.2.4 nous a montré que, pour maximiser l'autonomie d'un véhicule électrique, un conducteur peut, en plus d'appliquer les stratégies d'écoconduite étudiées, minimiser autant que possible l'utilisation des auxiliaires électriques, tels la radio et le système de climatisation.

* * *

Pour reprendre la discussion de l'introduction, où nous avons présenté le *paradoxe* entre les résultats des études sur l'écoconduite des véhicules électriques basées sur la programmation dynamique et les expériences de terrain. L'explication, il nous semble, est relativement simple: la programmation dynamique, tout comme les études de terrain,

montrent que pour réduire la consommation, il est nécessaire d'avoir une vitesse *aussi constante que possible*, ce qui se traduit par des profils de vitesses avec un nombre important de phases à *vitesse stabilisée*, donc à des niveaux d'accélération assez faible, voire nulle. En revanche, la contrainte sur le temps de trajet imposée dans certaines formulations du problème d'écoconduite optimale, et héritée par une grande partie des études basées sur la programmation dynamique, se traduit par des fortes accélérations pendant les phases transitoires, permettant de *gagner du temps*. Pour le dire dans des mots relativement simples, la programmation dynamique semble montrer qu'il vaut mieux *accélérer une fois fort*, que *deux fois doucement*. Ce phénomène explique les fortes accélérations présentes sur ces études, qui semblent être en contradiction avec les observations de terrain.

Concernant la faible pertinence de la réduction de la vitesse stabilisée en ville, les études de Neumann et al. [153] montrent des faibles corrélations entre cette stratégie et la consommation du véhicule. Cette *observation empirique* est bien compatible avec et pourrait s'expliquer par le fait que les pertes fixes, et la consommation des auxiliaires, viendraient contrecarrer les gains associés à la baisse de vitesse, selon qu'il a été discuté sur la section III.2.4.

Il y a cependant, une explication complémentaire à ce phénomène. Ericsson [59] a mis en évidence, grâce à une étude de terrain, le fait que le type de route empruntée a une bien plus forte influence sur la vitesse moyenne que le type de conducteur. Ainsi, les contraintes imposées par l'infrastructure, et par la politesse, empêcheraient le conducteur de faire varier fortement sa vitesse par rapport à la moyenne des autres conducteurs. Cela viendrait limiter l'efficacité de cette stratégie.

Les accélérations moyennes sont aussi influencées par le type de route [59]. En revanche, du fait que les accélérations ont, en général, une moindre durée par rapport aux phases à vitesse stabilisée, le conducteur aurait en principe plus de liberté pour faire varier ses niveaux d'accélération et de décélération, sans gêner les autres conducteurs. Toutefois, les comportements admissibles risquent de varier selon le type de route, et même selon l'heure de la journée (heures normales et heures de pointe).

En vue de cela, il semble pertinent, concernant l'automatisation de l'écoconduite, d'avoir une fonction capable d'adapter la dynamique longitudinale au contexte, plutôt que de s'adapter tout simplement au type de voie. Cela permettrait d'avoir une réponse plus robuste et plus naturelle pour le conducteur, qui adapte son style de conduite selon la situation de roulage à laquelle il doit faire face.

* * *

La section III.2.4, et d'avantage les études de l'Annexe IV, mettent en évidence la grande influence des pertes fixes sur le type de stratégie d'écoconduite à utiliser. En effet, plus un véhicule aura des pertes fixes, plus la durée des manœuvres (au sens défini sur ce chapitre) aura un impact négatif sur la consommation associée à un trajet.

En particulier, l'onduleur est un vecteur de pertes fixes (notamment des pertes par commutation, qui sont à *peu près* constantes pour une tension de batterie donnée). Ainsi, l'efficacité énergétique de cet organe peut avoir une influence importante sur le potentiel

de l'écoconduite sur un véhicule donné, et pourrait même changer la stratégie d'écoconduite à appliquer. Cela offre une explication possible aux résultats de Mruzek et al. [145], qui ont trouvé que, sur le véhicule considéré, l'utilisation des accélérations fortes permettait de réduire la consommation. Ces résultats pourraient venir aussi de la non prise en compte des pertes batterie dans le bilan de consommation.

Ainsi, dans le cas de la conduite en ville, l'utilisation des auxiliaires pourrait modifier le type de comportement associé à l'écoconduite. En particulier, si beaucoup des consommateurs électriques sont allumés simultanément, la réduction de la vitesse du véhicule pendant les phases stabilisées aurait un impact négatif sur la consommation nécessaire pour faire un certain trajet.

Ces phénomènes, auxquels viennent s'ajouter le fait que l'écoconduite implique des comportements différents selon le type de GMP (*électrique, hybride, conventionnel*), peuvent rendre la conduite écologique confuse pour les non-initiés. Ainsi, il y a un enjeu fort à la définition de consignes d'écoconduite claires, répondant *au mieux* à la plupart de situations de conduite auxquelles un conducteur pourrait se voir confronté. Cela sera discuté dans la partie V de ce document.

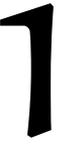
* * *

La dépendance au contexte de la meilleure stratégie d'écoconduite met en lumière l'intérêt d'avoir une *fonction d'écoconduite automatique*, permettant d'adapter la dynamique du véhicule à chaque situation de conduite (et potentiellement aussi à l'état du véhicule ; p.ex. quand la batterie est froide). Une telle fonction n'aurait pas à faire des compromis de simplicité, hormis ceux associés à l'agrément de conduite. La conception d'un *système d'écoconduite automatisée*, pour une application temps-réel, fera l'objet de la suite de notre discussion.

IV

Algorithme pour l'automatisation de l'écoconduite

STRUCTURE DE L'ALGORITHME



Objectif du chapitre

Proposer l'architecture d'une fonction automatique d'aide à l'écoconduite, basée sur des principes de la cognition humaine

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Architecture fonctionnelle d'une fonction d'écoconduite automatisée*
- *Formulation mathématique générale des stratégies de commande utilisées*

Nous venons d'explorer le potentiel de l'écoconduite pour réduire la consommation d'énergie des VE. Avant ça, nous avons eu un aperçu de ce que la physiologie et l'ergonomie nous apprennent sur ce qui rend la conduite agréable pour un conducteur ; cela a permis d'aboutir à un modèle simplifié de manœuvre. De plus, nous avons analysé les phénomènes cognitifs ayant lieu dans l'esprit du conducteur, le rendant capable d'une tâche aussi complexe comme la conduite d'un véhicule. Dans cette partie nous proposerons, grâce à ces informations, l'architecture d'une *fonction automatique d'aide à l'écoconduite* capable d'adapter le comportement dynamique du véhicule au contexte de roulage afin de réduire la consommation d'énergie, tout en respectant l'agrément de conduite.

Tel qu'il a été discuté précédemment, aussi simple qu'elle puisse paraître, la conduite est une compétence complexe exigeant de répondre à des nombreux enjeux et contraintes. Ceux-ci peuvent être de nature différente (*agrément, sécurité, efficacité énergétique, respect de la réglementation, interactions sociales...*), et peuvent être associés à des diverses horizons spatiaux et temporels (*l'à-coup produit lorsqu'on pose son pied sur la pédale, le maintien de distance avec le véhicule précédent, arriver à l'heure au rendez-vous en évitant les bouchons...*). Si le cerveau du conducteur est capable de gérer tout ça de manière simultanée, tout en s'occupant d'autres tâches en même temps (*parler avec les passagers, écouter la radio...*) c'est grâce à l'*architecture cognitive* de son cerveau, qui lui permet de gérer de manière simultanée et coordonnée un nombre conséquent des tâches, dont les résultats des unes viennent supporter et rendre robustes les résultats des autres.

Nous pensons (et nous ne sommes pas les premiers, p.ex. [140, 103]), que l'utilisation d'une structure inspirée sur la cognition humaine permettrait à une machine, à un *système*, de se rapprocher des performances d'un *humain expert* lors de la conduite d'un véhicule.

Ainsi, nous reprendrons certains des principes associés à l'apprentissage qui ont été présentés sur la section I.1.5.2.2, permettant à un conducteur novice de devenir un maître au volant. L'architecture de l'algorithme que nous allons présenter essaie de traduire une partie de la complexité de ce qui se passe dans le cerveau d'un conducteur expérimenté lorsqu'il fait face à diverses situations de conduite.

Sur ce chapitre nous introduirons la *structure générale de la fonction*, composée de quatre blocs associés chacun à un aspect de la cognition chez les humains. Nous expliquerons de manière générale ces aspects, pour introduire les notions qu'ils représentent, sans rentrer dans les détails de leur exécution technique. Cette aspect sera réservé aux autres chapitres de cette partie. De plus, à la fin du chapitre, nous proposerons une formulation de ce problème en employant la notation propre à l'Automatique, ce qui permet d'élargir les principes présentés à d'autres problématiques de commande.

1.1 RAPPEL DES PRINCIPES COGNITIFS UTILISÉS

Objectif de la section

Présenter les principes cognitifs inspirant la structure de l'algorithme proposé.

Le processus d'acquisition d'une compétence est facteur essentiel au développement d'une conduite fluide. Lors de l'apprentissage d'une certaine tâche, au début les différentes actions à réaliser nous paraissent complètement détachées les unes des autres (p.ex. *relâcher la pédale d'accélération, tourner le volant, ré-accélérer...*). Cependant, avec le temps, notre cerveau apprend à interpréter ces actions comme un ensemble cohérent (p.ex. *faire un virage*). Le mécanisme permettant de passer d'un tas de petites actions dissociées à une procédure cohérente et bien maîtrisée s'appelle **procéduralisation**.

Anderson [9] a étudié l'effet de la pratique sur les performances dans la résolution de problèmes mathématiques. Il a montré que les niveaux d'activité du cortex pré-frontal ont subi une forte réduction suite à plusieurs heures d'entraînement. Cela met en évidence que, grâce à l'expérience, le niveau de *raisonnement conscient*¹ nécessaire à l'exécution de la tâche a fortement décliné. Grâce à la procéduralisation, la résolution de la tâche peut être prise en main principalement par les régions motrices du cerveau, avec une intervention réduite des autres régions. Des études en imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle semblent indiquer que ce phénomène serait associé à une diminution de l'activation de l'*hippocampe* (lié à la connaissance déclarative) et une plus grande activation des *ganglions de la base* (en lien avec la connaissance procédurale), conforme l'apprentissage progresse [8, 171].

1. Pour être plus rigoureux, ils faudrait dire que « la dépendance sur de la connaissance déclarative s'est réduite ».

Avec de l'expérience, on apprend à raisonner en termes des séquences d'actions que l'on a apprises, comme un tout, plutôt que de penser de manière individuelle à chaque action. On *fait un changement de rapport*, plutôt que *lève le pied de l'accélérateur, appuie sur l'embrayage, pose sa main sur le levier,...*. Apprendre à exécuter des telles séquences s'appelle **apprentissage tactique** [8]. Grâce à cela, on peut mieux exploiter l'expérience acquise précédemment pour la résolution des tâches de la même nature, et même *mémoriser certaines des solutions*, tel que le suggèrent les expériences de Logan & Klapp [119].

En outre, quand il s'agit des problèmes plus complexes, un *expert* saura repérer la structure sous-jacente à des problèmes qui apparaissent assez différents au premier regard. Cela lui permettra de capitaliser sur ses expériences précédentes, même s'il se trouve face à des situations qui ne sont pas identiques. A titre d'illustration, nous pouvons penser à un conducteur français qui se servirait des expériences acquises en roulant dans son pays pour rouler au Royaume-Uni; même s'il doit désormais *conduire à gauche*, il peut se servir des *stratégies de conduite* acquises dans un contexte différent, car il est capable d'exploiter la *structure commune* aux différentes situations. Apprendre à organiser les problèmes afin de capitaliser sur la structure générale d'une certaine classe de problème s'appelle **apprentissage stratégique** [8].

Pour reprendre l'illustration d'Anderson : la distinction entre les apprentissages stratégique et tactique est la même que celle propre au domaine militaire. La *tactique* concerne des manœuvres à l'échelle des combats, alors que la *stratégie* est associée à toute la campagne militaire. De même, l'apprentissage tactique est associée à l'acquisition des nouvelles compétences utiles, alors que l'apprentissage stratégique concerne comment se servir de ces compétences pour atteindre ses objectifs.

La section I.1.5.2.2 fait une présentation plus exhaustive et technique des différents aspects associés à l'apprentissage. Nous pensons, toutefois, que la brève explication que nous venons de faire nous permet d'avoir une idée de comment ces notions pourraient opérer au sein d'un algorithme de conduite.

Finalement, un aspect clé pour l'exécution efficace d'une tâche est l'adéquate **représentation des problèmes** [8]. Un *expert* aura appris, avec le temps, quels sont les informations les plus pertinentes et de quelle manière il convient le mieux de les organiser. Cela lui permettra de gagner du temps et d'économiser de l'énergie lors de la résolution d'un problème, ainsi que d'obtenir des meilleurs résultats. Pour une fonction automatisée, la bonne représentation des informations en provenance des capteurs est aussi essentielle pour obtenir des résultats robustes et satisfaisants.

Sur la Figure 1.1, nous proposons une représentation de la structure des processus cognitifs associée à l'exécution d'une tâche par un *expert*. Cette proposition ne se veut pas exhaustive ni capable de tenir compte de la complexité des phénomènes associés à la cognition humaine; en revanche, elle offre un cadre *utile* pour la prise en compte des notions cognitives par un système automatisé.

En partant des informations en provenance des organes sensoriels, ainsi que de l'expérience acquise, la faculté de **Représentation du problème** permettrait de définir l'*espace*

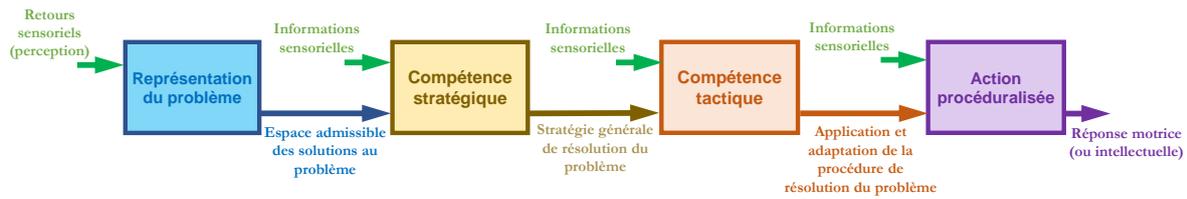


FIG. 1.1 – Représentation simplifiée de la structure cognitive associée à la résolution d'un problème

admissible des solutions au problème (cf. section I.1.5.1.2). Grâce à cette représentation, ainsi que d'autres informations issues des sens, l'humain utiliserait sa **Compétence stratégique** pour définir une *stratégie générale pour la résolution du problème*. Celle-ci impliquerait l'utilisation des compétences et des *procédures* préalablement apprises, ainsi que de leur *adaptation* en fonction des évolutions du contexte, ce qui relève de la **Compétence tactique**. Finalement, les différentes actions comprises dans la procédure seraient exécutées par les organes moteurs (ou par l'intellect) de la personne, en appliquant une **Action procéduralisée**. Dans cette dernière étape, les informations sensorielles seraient traitées de manière *inconsciente*, sans qu'on leur associe un *sens*.

Cette représentation ne cherche pas à suggérer une structure séquentielle dans la résolution de problème ; il semble plus probable que les processus cognitifs aient lieu de façon plus ou moins simultanée à tous les niveaux. Ils représentent plutôt une *chaîne de dépendances* entre les processus nécessaires à la résolution d'un problème, une sorte de hiérarchie. Il y a probablement aussi une notion de rétro-alimentation : les actions de chaque bloc auraient un impact sur la résolution du problème, pouvant faire évoluer la *tactique* ou la *stratégie* à appliquer. Des évolutions de l'environnement pourraient forcer des adaptations supplémentaires. En revanche, ces phénomènes seraient probablement perçus grâce aux informations sensorielles, donc la rétro-alimentation est considérée de manière *implicite* sur la figure.

1.2 STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'ALGORITHME

Objectif de la section

Présenter la structure globale de l'algorithme d'écoconduite et les principes cognitifs associés.

Nous proposons, pour notre *fonction d'aide à l'écoconduite*, une *structure fonctionnelle* à quatre blocs, basée sur la *structure cognitive* que nous venons de proposer. Cela est présenté par la Figure 1.2.

L'algorithme que nous proposons se compose donc de quatre sous-systèmes, à savoir :

1. **Génération des contraintes** : sous-système permettant de générer, à partir des informations associées à l'état du véhicule (en particulier à sa vitesse) et au contexte de roulage, des contraintes permettant de garantir l'agrément de conduite.

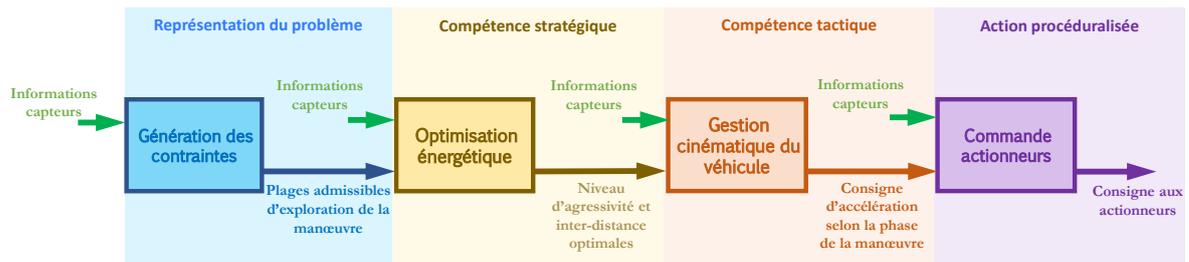


FIG. 1.2 – Structure de l'algorithme d'écoconduite, inspirée de la cognition humaine.

2. **Optimisation énergétique** : ce sous-système permet de déterminer quelle est la manœuvre optimale permettant de répondre à une certaine situation de roulage, tout en respectant l'agrément de conduite et la sécurité du conducteur. Le domaine du problème d'optimisation sera défini par la sortie du bloc de génération de contraintes, ainsi que par des informations liées au contexte de roulage. Ce bloc permet de déterminer le « niveau d'agressivité » à appliquer pendant la manœuvre, ainsi que la cible d'inter-distance finale.
3. **Gestion cinématique du véhicule** : en partant des informations associées à la manœuvre optimale, ce sous-système assure la gestion des différentes phases de celle-ci. De plus, il adapte la forme du profil d'accélération aux changements du contexte de roulage. Sa sortie est une consigne instantanée d'accélération en fonction de la phase actuelle de la manœuvre.
4. **Commande actionneurs** : Ce bloc permet de suivre la consigne d'accélération issue de la *Gestion cinématique du véhicule* ; pour ce faire, il génère une consigne de couple à demander à la motorisation.

Les chapitres suivants développeront le fonctionnement des trois derniers blocs. Les contraintes liées à l'agrément de conduite ont fait l'objet de la Partie II et nous nous limiterons donc à décrire brièvement le système *Génération des contraintes* quand nous traiterons l'*Optimisation énergétique*.

1.3 APPLICATION DES PRINCIPES COGNITIFS À LA COMMANDE DE SYSTÈMES DYNAMIQUES

Objectif de la section

Représenter dans une formulation générale, en utilisant une notation propre à l'Automatique, la solution proposée au problème d'écoconduite automatisée.

Avant d'aller plus loin, nous allons prendre le temps de présenter une formulation générale de l'algorithme que nous proposons pour la conception d'une *fonction d'écoconduite automatisée*. A partir de cette formulation, il devrait être possible d'appliquer des notions associées à la cognition humaine pour l'asservissement de systèmes dynamiques.

Nous nous limiterons à des systèmes ayant une seule entrée et une seule sortie, SISO (de l'anglais, *Single Input Single Output*).

1.3.1 Formulation « classique » d'un problème de commande optimale

Lorsqu'on souhaite déterminer le comportement optimal d'un système dans une situation donnée, la commande optimale offre un moyen de traduire cette problématique dans le langage mathématique.

Soit le système dont la dynamique est définie par l'équation (1.1), où $\underline{x} : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^n$ correspond aux états du système, $u : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}$ à son entrée et $y : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}$ à sa sortie. Les fonctions $\alpha : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\beta : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ et $\gamma : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, sont potentiellement non-linéaires.

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}(t) &= \alpha(\underline{x}(t)) + \beta(u(t)) \\ y(t) &= \gamma(\underline{x}(t))\end{aligned}\quad (1.1)$$

Et soit $\mathcal{J}(u(\cdot)) : \mathcal{U} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonctionnelle (une *fonction de fonction* [113]) d'un certain espace de fonction $\mathcal{U} = \{u : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}\}$. Dans un problème de commande, $\mathcal{J}(u(\cdot))$ représente l'*indice de performance à optimiser* et est donnée par :

$$\mathcal{J}(u(\cdot)) = \int_{t_0}^{t_f} L(\underline{x}(t), u(t), t) dt \quad (1.2)$$

Ainsi, un problème de commande optimale associé est donné, dans une formulation *plus ou moins générale*, par (1.3), où la fonction $L : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \times [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}$ est associée à une notion de *coût instantané*.

$$\begin{aligned}\text{minimiser} & \quad \mathcal{J}(u(\cdot)) \\ & \quad u(\cdot) \in \mathcal{U} \\ \text{tel que} & \quad \dot{\underline{x}}(t) = \alpha(\underline{x}(t)) + \beta(u(t)) \\ & \quad g_i(\underline{x}(t_f)) = 0 \quad , \quad i = 1, \dots, p \\ & \quad f_i(\underline{x}(t_f), t_f) \leq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, q \\ & \quad h_i(\ddot{\underline{x}}(t), \dot{\underline{x}}(t), \underline{x}(t), u(t), t) \leq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m\end{aligned}\quad (1.3)$$

Pour résoudre un tel problème, on doit faire appel au *Calcul des variations* (la PD peut être une autre option). Il s'agit d'un *problème dynamique d'optimisation*, dont l'entrée est de dimension infinie (car on a à faire à une fonction *continue* en t) et certaines des contraintes sont des équations différentielles. La solution du problème est l'entrée optimale, où *commande optimale*, devant être appliquée sur le système, afin qu'il fasse ce que l'on veut dans des *conditions acceptables* (ce qui est exprimé par les contraintes), avec la *meilleure performance* (traduite par la fonction coût).

Hormis les contraintes propres à la dynamique du système, données par (1.1), nous considérerons trois types de contrainte pouvant être utilisées à des fins différentes :

- **contraintes d'égalité sur les états finaux** : les fonctions de la forme $g_i(\underline{x}(t_f))$ permettent de définir de contraintes *fortes* sur les états du système à la fin de notre action sur celui-ci. Elles peuvent être utilisées pour définir des *objectifs du problème*.

- **contraintes d'inégalité sur les états et le temps finaux**: les fonctions de la forme $f_i(\mathbf{x}(t_f), t_f)$ représentent des *plages acceptables* des valeurs associées à certains états du système, à la fin de l'intervention de commande; de même, elles peuvent traduire des contraintes associées à la durée maximale (ou minimale) dans laquelle les objectifs doivent être atteints.
- **contraintes d'inégalité sur les états, ses dérivées premières et secondes et les commandes**: les fonctions de la forme $h_i(\ddot{\mathbf{x}}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t), u(t), t)$ représentent des contraintes définies tout au long de l'intervalle d'application de la commande, pouvant varier en fonction du temps. Elles peuvent traduire, par exemple, les limitations du système, ou des conditions d'acceptabilité par ses utilisateurs. Contraindre les dérivées secondes des états peut s'avérer d'intérêt pour traduire certains phénomènes (dont ceux associés à l'ergonomie automobile).

Sous certaines conditions, dont une connaissance *suffisamment fiable* des certaines conditions futures, il est possible d'utiliser le Principe de Minimum de Pontriaguine (PMP) pour résoudre certains des problèmes représentables par cette formulation [81, 195]. Dans ce cas, les contraintes d'égalité sur la condition finale peuvent être prises en compte grâce à l'ajout d'un terme à la fonctionnelle de coût, comme suit :

$$\tilde{\mathcal{J}}(u(\cdot)) = \Phi(\mathbf{x}(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{x}(t), u(t), t) dt \quad (1.4)$$

Où la fonction $\Phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est définie par (1.5) et permet d'introduire chacune des contraintes d'égalité $g_i(\mathbf{x}(t_f), t_f)$ dans la fonction coût modifiée.

$$\Phi(\mathbf{x}(t_f)) = \begin{cases} 0 & , \sum_{i=1}^p |g_i(\mathbf{x}(t_f))| = 0 \\ \infty & , \sum_{i=1}^p |g_i(\mathbf{x}(t_f))| \neq 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

Le PMP associe à chaque état du système une nouvelle variable dynamique, que l'on appelle « co-état ». Cela permet de calculer un *Hamiltonien*, qui est une somme du coût instantané L et de chaque co-état pondéré par la dynamique de l'état associé.

Le PMP permet de prendre en compte des contraintes sur les valeurs de la commande $u(t)$. En revanche, l'application des contraintes générales $h_i(\ddot{\mathbf{x}}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t), u(t), t)$, ou des tolérances associées aux états finaux $f_i(\mathbf{x}(t_f), t_f)$ est loin d'être triviale. En particulier, la prise en compte des contraintes sur les dérivées secondes des états, $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ peut s'avérer assez difficile.

Nous proposerons donc la formulation d'un problème d'optimisation *approximative* du problème (1.3) qui, sous certaines conditions, permettrait d'obtenir une solution respectant les contraintes et un résultat proche de l'optimalité. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés des principes cognitifs présentés sur les sections IV.1.1 et I.1.5.1.

1.3.2 Formulation du problème « quasi-optimal » de commande inspirée sur des principes cognitifs

Lorsque nous souhaitons résoudre certains problèmes *complexes*, notre compréhension des phénomènes en jeu peut s'avérer *insuffisante* pour pouvoir définir un ensemble accep-

table des *comportements dynamiques acceptables* du système, $\mathcal{A} \subset \mathcal{X}$, où $\mathcal{X} = \{\underline{\dot{x}} : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^n\}$, tel que :

$$\forall \underline{\dot{x}}(t) \in \mathcal{A} \quad , \quad \text{La réponse du système est acceptable} \quad (1.6)$$

En principe, le sous-ensemble \mathcal{A} est défini par les fonctions $h_i(\cdot)$, $g_i(\cdot)$ et $f_i(\cdot)$; néanmoins, dans la pratique, on pourrait ne pas avoir la connaissance de fonctions capables d'exprimer les contraintes d'acceptabilité du problème. C'est le cas, par exemple, lorsqu'on souhaite définir une *manœuvre de conduite acceptable*²(cf. Partie II).

En revanche, sous la base des observations issues des expériences *empiriques*, il peut être possible de déterminer un ensemble $\mathcal{C} \subset \mathcal{X}$, tel que :

$$\exists \mathcal{C}_{adm} \subset \mathcal{C} \quad | \quad \forall \underline{\dot{x}}(t) \in \mathcal{C}_{adm} \quad , \quad \text{La réponse du système est acceptable} \quad (1.7)$$

Une conséquence assez directe de (1.7) est le fait que $\mathcal{C}_{adm} \subseteq \mathcal{A}$. Le sous-ensemble \mathcal{C}_{adm} peut même être défini par (1.8). Cette idée peut être représentée en utilisant un diagramme de Venn, comme montré par la Figure 1.3.

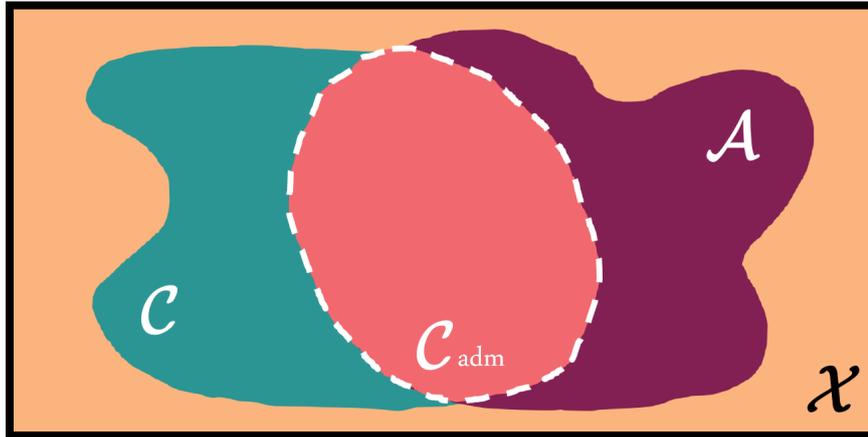


FIG. 1.3 – Définition de l'ensemble admissible du problème de commande quasi-optimale. La police utilisée est issue de jsMath (<http://www.math.union.edu/~dpvc/jsMath/>) et la palette des couleurs de The Bible Project Quaterly - Fall 2017 (<https://bibleproject.com>).

$$\mathcal{C}_{adm} = \mathcal{C} \cap \mathcal{A} \quad (1.8)$$

Si l'ensemble \mathcal{C}_{adm} était assez *représentatif* de l'ensemble \mathcal{A} , alors la méthode que nous allons proposer permettrait d'obtenir une réponse *proche* de la solution optimale, tout en ayant un certain niveau de confiance sur son *acceptabilité*.

Soit le système donné par (1.1) et la fonctionnelle (1.2). Soit \mathcal{C} une famille des fonctions de la forme (1.9), où la fonction $A : \mathbb{R}^r \times [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^n$ permet de définir une certaine

2. En particulier, outre la difficulté à formuler un modèle complet de l'agrément de conduite chez un conducteur, il existe le problème de la *dispersion inter-individu* et la *dispersion intra-individu*. La première correspond au fait que la perception d'agrément varie entre les conducteurs différents ; ce qui résulte acceptable pour un conducteur ne le sera pas forcément pour un autre. La *dispersion intra-individu* tient compte de l'influence de l'état physiologique et émotionnel du conducteur sur sa sensibilité au comportement du véhicule. Une approche beaucoup plus pragmatique pour représenter l'agrément de conduite est donc d'utiliser une certaine *famille de manœuvres* (des manœuvres trapézoïdales, dans notre cas), dont la formulation serait plus facile et qui pourrait être calibrée pour tenir compte des dispersions *inter-individu* et *intra-individu*.

topologie de fonction et est issue de l'expérience (en s'inspirant des principes cognitifs). Le vecteur $\underline{\theta}$ contient les paramètres définissant une certaine instance de la fonction $A(\cdot, t)$.

$$\mathcal{C} = \{ \dot{\mathbf{x}} : [t_0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^n \mid \dot{\mathbf{x}}(t) = A(\underline{\theta}, t), \quad \forall \underline{\theta} \in \mathbb{R}^r \quad \wedge \quad t_f \in \mathcal{T}_f \subset [t_0, \infty] \} \quad (1.9)$$

Nous ferons ensuite l'hypothèse qu'il existe des fonctions $\widehat{h}_i(\underline{\theta})$, $\widehat{g}_i(\underline{\theta})$ et $\widehat{f}_i(\underline{\theta})$ respectant la condition (1.10). On peut alors définir un sous-ensemble \mathcal{C}_{adm} à partir de ces fonctions.

$$\begin{aligned} \widehat{g}_i(\underline{\theta}) = 0 &\Rightarrow g_i(\mathbf{x}(t_f)) = 0, \quad i = 1, \dots, p \\ \widehat{f}_i(\underline{\theta}) \leq 0 &\Rightarrow f_i(\mathbf{x}(t_f), t_f) \leq 0, \quad i = 1, \dots, q \\ \widehat{h}_i(\underline{\theta}) \leq 0 &\Rightarrow h_i(\ddot{\mathbf{x}}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t), u(t), t) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (1.10)$$

Le lecteur notera que les nouvelles contraintes ne dépendent plus *explicitement* du temps t . Désormais, les contraintes sur la dynamique du système (1.1) affectent uniquement la valeur de la fonctionnelle $J(u(\cdot))$, définie sur (1.2). Par conséquent, si on intègrait (1.1) dans la fonctionnelle, on n'aurait plus à faire à une *optimisation dynamique*, ce qui simplifierait le problème de manière importante.

En supposant que la fonction $\beta(\cdot)$ est inversible pour toute valeur possible de $A(\underline{\theta}, t) - \alpha(\mathbf{x}(t))$, alors la commande du système peut être représentée en fonction des paramètres $\underline{\theta}$ et du temps t . Ainsi, $u(\underline{\theta}, t)$ est donné par (1.11).

$$u(\underline{\theta}, t) = \beta^{-1}(A(\underline{\theta}, t) - \alpha(\mathbf{x}(t))) \quad (1.11)$$

Les états du système peuvent être calculés en appliquant (1.2), où $\underline{\mathbf{x}}_0$ correspond à leur valeur initiale.

$$\underline{\mathbf{x}}(\underline{\theta}, t) = \underline{\mathbf{x}}_0 + \int_{t_0}^t A(\underline{\theta}, \tau) d\tau \quad (1.12)$$

Grâce à cela, il est désormais possible de formuler la fonctionnelle de coût comme une fonction des valeurs des paramètres $\underline{\theta}$, en appliquant (1.13). L'équation met en évidence la dépendance entre le temps final d'application de la commande, t_f et les paramètres $\underline{\theta}$, ce qui permet de prendre en compte le cas général, où le temps final est libre.

$$\mathcal{J}(u(\underline{\theta})) = \int_{t_0}^{t_f(\underline{\theta})} L(\underline{\mathbf{x}}(\underline{\theta}, t), u(\underline{\theta}, t), t) dt \quad (1.13)$$

En appliquant les fonctions qui viennent d'être présentées, il est possible de formuler le problème d'optimisation (1.14), dit *quasi-optimal*. Cette fois-ci, nous avons à faire à un problème *statique* d'optimisation, à dimension finie.

$$\begin{aligned} &\underset{\underline{\theta} \in \mathbb{R}^r}{\text{minimiser}} \quad \mathcal{J}(u(\underline{\theta})) \\ &\text{tel que} \quad \widehat{g}_i(\underline{\theta}) = 0, \quad i = 1, \dots, p \\ &\quad \quad \widehat{f}_i(\underline{\theta}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, q \\ &\quad \quad \widehat{h}_i(\underline{\theta}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (1.14)$$

La solution à ce problème d'optimisation permet d'obtenir une commande *acceptable*. De plus, pourvu que l'ensemble \mathcal{C}_{adm} soit *suffisamment représentatif* de l'ensemble admissible \mathcal{A} , cette solution devrait être *proche* de la réponse optimale. En revanche, cette formulation n'offre pas de garantie de convexité, ni d'autres indices qui prouveraient l'existence d'un algorithme permettant de résoudre (1.14) en temps polynômial³.

En trouvant une solution (dans l'idéal *globale*), au problème d'optimisation, notée $\underline{\theta}^*$, la dynamique globale du système, $\underline{\dot{\mathbf{x}}}^*(t)$, est donnée par (1.15), ses états, $\underline{\mathbf{x}}^*(t)$, par (1.16), et la commande optimale à appliquer, $u^*(t)$, par (1.17).

$$\underline{\dot{\mathbf{x}}}^*(t) = A(\underline{\theta}^*, t) \quad (1.15)$$

$$\underline{\mathbf{x}}^*(t) = \underline{\mathbf{x}}_0 + \int_{t_0}^t A(\underline{\theta}^*, \tau) dt \quad (1.16)$$

$$u^*(t) = u(\underline{\theta}^*, t) = \beta^{-1}(\underline{\dot{\mathbf{x}}}^*(t) - \alpha(\underline{\mathbf{x}}^*(t))) \quad (1.17)$$

Le vecteur $\underline{\theta}^*$ contient donc les *paramètres optimaux* de la topologie de commande définie par $A(\underline{\theta}, t)$. Ceux-ci respectent les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \widehat{g}_i(\underline{\theta}^*) &= 0, & i &= 1, \dots, p \\ \widehat{f}_i(\underline{\theta}^*) &= d_i, & i &= 1, \dots, q, & d_i &\leq 0 \end{aligned} \quad (1.18)$$

1.3.3 Gestion des perturbations sur les contraintes

La méthode que nous venons de proposer permet de déterminer une solution *presque* optimale à un problème de commande, dans les conditions du problème au moment où celui-ci a été résolu. Cependant, dans le monde réel, l'environnement du système peut évoluer dans le temps, ce qui veut dire que la formulation initiale du problème pourrait ne plus correspondre au nouveau contexte.

Dans ces conditions, la reformulation, en faisant *table rase*, du problème puis sa résolution, peut s'avérer coûteuse en temps de calcul. De plus, rien ne garantit que modifier la topologie de la dynamique du système serait acceptable. Cela est particulièrement vrai si l'on a à faire à des utilisateurs humains : une fois que le système a amorcé une certaine *stratégie*, la personne pourrait ne pas comprendre que, tout à coup, celui-ci se mette à faire autre chose. Il y a donc une notion de *continuité de la solution* à respecter.

Pour ce faire, nous proposons de considérer que les variations du contexte, ainsi que les imprécisions dans le suivi des dynamiques optimales, $\underline{\dot{\mathbf{x}}}^*(t)$, se traduiraient par des variations des contraintes de la forme (1.19). Il n'y a plus de garantie que les paramètres $\underline{\theta}^*$ respectent ces conditions. L'utilisation de q_a équations, au lieu de q , correspond à la possibilité d'avoir une certaine redondance dans la définition des contraintes (p.ex. des limites inférieures ou supérieures pour un même critère).

$$\begin{aligned} \widehat{g}_i(\underline{\theta}) &= \varepsilon_i^g, & i &= 1, \dots, p \\ \widehat{f}_i(\underline{\theta}) &= d_i + \varepsilon_i^f, & i &= 1, \dots, q_a ; & q_a &\leq q \end{aligned} \quad (1.19)$$

3. Le concept de complexité d'un algorithme est présenté, par exemple, sur [102].

Si le nombre des paramètres est supérieur à celui d'équations dans (1.19), $r \geq p + q_a$, alors nous pouvons établir des *conditions de continuité* de la solution de la forme (1.20), où $M \in \mathbb{R}^{[r-(p+q_a)] \times r}$ et $\underline{l} \in \mathbb{R}^{[r-(p+q_a)]}$. Cette équation permet, par exemple, de garder constantes les valeurs de certains paramètres de la solution optimale, en modifiant uniquement les autres. D'autres conditions plus complexes sont également possibles. Le choix de M et \underline{l} devrait faire en sorte de *favoriser* le respect des contraintes $\hat{h}_i(\underline{\theta}) \leq 0$, qui n'apparaissent plus de manière explicite.

$$M\underline{\theta} = \underline{l} \quad (1.20)$$

Ainsi, nous pouvons trouver une *solution corrigée* de la dynamique du système, en trouvant des paramètres $\underline{\theta}^\diamond$, qui respectent les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \hat{g}_i(\underline{\theta}^\diamond) &= \varepsilon_i^g, \quad i = 1, \dots, p \\ \hat{f}_i(\underline{\theta}^\diamond) &= d_i + \varepsilon_i^f, \quad i = 1, \dots, q \\ M\underline{\theta}^\diamond &= \underline{l} \end{aligned} \quad (1.21)$$

S'il existait une solution (et si on arrivait à la retrouver), alors on peut espérer que, en absence des petites variations du contexte, celle-ci devrait rester *proche* de la solution optimale associée au problème d'optimisation prenant en compte les *contraintes perturbées*.

La dynamique, les états et la commande *corrigés* du système sont donnés par (1.22), (1.23) et (1.24), respectivement.

$$\dot{\underline{x}}^\diamond(t) = A(\underline{\theta}^\diamond, t) \quad (1.22)$$

$$\underline{x}^\diamond(t) = \underline{x}_0 + \int_{t_0}^t A(\underline{\theta}^\diamond, \tau) dt \quad (1.23)$$

$$u^\diamond(t) = u(\underline{\theta}^\diamond, t) = \beta^{-1}(\dot{\underline{x}}^\diamond(t) - \alpha(\underline{x}^\diamond(t))) \quad (1.24)$$

1.3.4 Gestion des imprécisions sur le suivi de la dynamique

La commande $u^\diamond(t)$ sera satisfaisante à condition que les fonctions $\alpha(\cdot)$ et $\beta(\cdot)$ soient suffisamment représentatives du système, ce qui n'est pas probablement le cas dans une situation réelle.

Pour compenser les écarts dûs aux imprécisions des modèles, on peut partir de la valeur de $u^\diamond(t)$, en l'utilisant un terme *en boucle ouverte*⁴, puis rajouter un terme en boucle fermée, comme présenté sur (1.25), où $\dot{\underline{x}}_m(t)$ correspond aux valeurs instantanées de la dynamique du système. $\dot{\underline{x}}_m(t)$ peut être mesuré par des capteurs ou estimé à l'aide d'observateurs. u^{act} est la valeur de commande devant être sollicitée aux actionneurs.

$$u^{act}(\dot{\underline{x}}_m(t), \underline{\theta}^\diamond, t) = u(\underline{\theta}^\diamond, t) + u^{bf}(\dot{\underline{x}}^\diamond(t), \dot{\underline{x}}_m(t), t) \quad (1.25)$$

Dans le problème que nous allons étudier, pour des raisons qui seront discutées par la suite, u^{bf} prendra la forme d'un terme intégral. Ainsi, la commande à appliquer sera

4. Ou terme *feed-forward*, en nous permettant un anglicisme.

donnée par (1.26), où k_I est un levier de calibration et $\dot{\underline{x}}_m(t)$ une estimation *fiable* de la dynamique du système.

$$u^{act}(\dot{\underline{x}}_m(t), \underline{\theta}^\diamond, t) = \beta^{-1} \left(\dot{\underline{x}}^\diamond(t) - \alpha(\underline{x}^\diamond(t)) \right) + k_I \int_{t_0}^t \left(\dot{\underline{x}}^\diamond(t) - \dot{\underline{x}}_m(t) \right) dt \quad (1.26)$$

1.3.5 Commentaires sur la méthode proposée

La méthode que nous venons de proposer permet d'appliquer des principes associés à la cognition humaine à des problèmes *complexes* de commande optimale, où même la formulation du problème peut s'avérer assez difficile. Les différentes « étapes » d'obtention de la solution peuvent être associées aux compétences *stratégique*, *tactique* et au phénomène de *procéduralisation*, qui ont été rappelés sur ce chapitre et discutées dans la section I.1.5. L'application de ces *principes cognitifs*, semble prometteuse pour la *résolution de problèmes complexes de commande*, tout en gardant une certaine *continuité* et *cohérence* dans le comportement du système.

Comment des principes cognitifs peuvent être appliqués au problème d'écoconduite d'un VE, en utilisant une commande *quasi-optimale*, fera l'objet des chapitres suivants. La discussion qui suit mettra en lumière le lien entre la formulation mathématique proposée et l'application des principes associés à la cognition humaine.

COMPÉTENCE STRATÉGIQUE : OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE DES MANŒUVRES DE CONDUITE

2

Objectif du chapitre

Proposer, en s'inspirant du principe d'apprentissage stratégique, une méthodologie permettant de déterminer la manœuvre optimale pour répondre à un scénario de conduite donné

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Formulation de plusieurs type de problèmes d'optimisation d'une manœuvre de conduite trapézoïdale*
- *Méthodologie d'optimisation hors-ligne d'une manœuvre de conduite*
- *Optimisation d'une manœuvre pour un scénario réel, en utilisant les modèles physique et analytique*
- *Proposition des pistes pour une optimisation embarquée*

Sur ce chapitre nous allons traiter le problème de détermination du comportement du véhicule, à l'échelle d'une manœuvre, capable de minimiser la consommation d'énergie pour un scénario donné. Pour ce faire, nous proposerons une formulation du problème et une méthodologie inspirées de la *compétence stratégique* développée chez les êtres humains lors de l'acquisition d'expertise (cf. section I.1.5.2.2). De plus, nous tirerons profit des discussions sur l'ergonomie automobile de la Partie II en nous appuyant, en particulier, sur la modélisation des manœuvres présentée sur le Chapitre II.2. La consommation du VE sera représentée par les modèles énergétiques physique et analytique du chapitre III.1. L'approche proposée permet donc de faire converger les différents aspects traités dans nos travaux, pour les mettre au service de l'automatisation de l'écoconduite.

Comme discuté précédemment, l'apprentissage stratégique permet à un humain d'adapter une procédure préalablement apprise à des problématiques différentes, en tirant profil des caractéristiques communes aux diverses situations. Pour ce faire, la *représentation du problème* joue un rôle de premier ordre : en déterminant les *caractéristiques essentielles* des problèmes ayant une *structure semblable*, il est possible d'appliquer *un même type de solution* à des situations *a priori* différentes.

Dans le cas de la conduite d'un véhicule automobile, la personne au volant doit faire face à des situations diverses : elle devra exécuter des *dépassements*, des *changements de vitesse limite*, des *accostages derrière un véhicule*, des *arrêts devant un feu*, pour *redémarrer* ensuite, pour n'en citer que quelques unes. Même si les contextes mentionnés sont différents, le comportement du véhicule présente des caractéristiques communes : à chaque fois on part d'une vitesse *plus ou moins stabilisée*, pour atteindre une nouvelle vitesse *plus ou moins stabilisée*. Nous avons donc à faire à des *variations de la vitesse stabilisée*, se traduisant par des *manœuvres d'accélération longitudinale*. Il existe une *structure commune* aux différents scénarios de roulage. La *compétence stratégique* permettrait d'utiliser un même algorithme pour optimiser la consommation associée à ces scénarios de roulage, tout en respectant les contraintes et particularités de chacune de ces situations.

2.1 PROBLÈME *quasi-optimal* D'ÉCOCONDUITE : FONCTION COÛT ET CONTRAINTES

Objectif de la section

Formuler l'objectif et des contraintes associés au problème *quasi-optimal* d'écoconduite.

La gestion des transitoires de vitesse est associée à des horizons spatiaux et temporels réduits (quelques centaines de mètres et quelques dizaines de secondes, au pire des cas). De ce fait, au cours d'une manœuvre les variations de l'état de charge ou de la température de la batterie seront assez faibles. Cela nous permet de faire l'hypothèse que SoC et Θ_{bat} seront des constantes. Ainsi, les états du système correspondront *uniquement* à des variables cinématiques ; en particulier, nous aurons :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \begin{bmatrix} X_{veh}(t) \\ V_{veh}(t) \end{bmatrix} \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{X}_{veh}(t) \\ \dot{V}_{veh}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{veh}(t) \\ a_{veh}(t) \end{bmatrix} \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \ddot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{X}_{veh}(t) \\ \ddot{V}_{veh}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{veh}(t) \\ J_{veh}(t) \end{bmatrix} \\ \mathbf{x}(t) &= \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \ddot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.1)$$

L'entrée du système sera la force appliquée sur le véhicule F_{veh} , supposée en provenance uniquement de la motorisation. Nous considérons donc des manœuvres où les freins ne sont pas utilisés ($F_{frein} = 0$). Ainsi, nous avons :

$$u(t) = F_{veh}(t) \quad (2.2)$$

En nous basant sur les modèles de la section III.1.1.1.1, nous pouvons exprimer la dynamique du système en utilisant (2.3).

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \alpha(\mathbf{x}(t)) + \beta(u(t)) \\ \begin{bmatrix} \frac{dX_{veh}}{dt}(t) = V_{veh}(t) \\ \frac{dV_{veh}}{dt}(t) = a_{veh}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_{veh}(t) \\ -\frac{1}{M_{veh}^{eq}} [M_{veh} g \sin(\alpha_r(X_{veh}(t))) + F_{res}(V_{veh}(t))] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M_{veh}^{eq}} F_{veh}(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_2(t) \\ -\frac{1}{M_{veh}^{eq}} [M_{veh} g \sin(\alpha_r(x_1(t))) + F_{res}(x_2(t))] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M_{veh}^{eq}} u(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.1.1 Fonction coût

Soit la fonctionnelle (2.4), où P_{bat} est la *dépense d'énergie instantanée* dans la batterie. La puissance P_{bat} peut être calculée en appliquant l'équation (1.22) du chapitre III.1. $\mathcal{J}(u(\cdot))$ est donc la consommation d'énergie associée à la manœuvre due à l'application d'un certain profil de force, $u(t)$, $t \in [0, t_f]$, sur le véhicule pour un scénario donné. Pour optimiser la consommation d'un VE grâce à l'écoconduite, il faut trouver le profil de commande $u(t)$ minimisant $\mathcal{J}(u(\cdot))$ sous certaines conditions.

$$\mathcal{J}(u(\cdot)) = \int_0^{t_f} P_{bat}(\mathbf{x}(t), u(t), t) dt \quad (2.4)$$

Les Chapitres II.2 et II.3 ont montré que des trapèzes d'accélération font partie du *répertoire des manœuvres* d'un conducteur. Nous ferons l'hypothèse que les transitions de vitesse du véhicule ont lieu par le biais des *profils trapézoïdaux d'accélération*. Pour la mise en équation, nous retiendrons la notation présentée sur la section III.1.2.1.

Pour le choix des paramètres du trapèze, qui seront les paramètres d'optimisation de notre problème, nous avons décidé de privilégier des valeurs directement associables au style de conduite du conducteur. En particulier, nous prendrons les valeurs d'à-coup des phases initiale et finale de la manœuvre, J_1 et J_3 respectivement, ainsi que l'amplitude et la durée du plateau d'accélération, a_{ex} et τ_2 . Les valeurs d'à-coup et d'accélération sont directement associées avec l'agrément de conduite¹, alors que la durée de la phase stabilisée serait fortement corrélée avec la rapidité longitudinale (cf. section II.3.4.4 et [18]). Ainsi, nous aurons les paramètres d'optimisation $\underline{\theta} = [a_{ex}, J_1, J_3, \tau_2]^T$. La vitesse et l'accélération initiales, v_0 et a_0 , respectivement, sont des données d'entrée, mesurables par des capteurs. La durée totale de la manœuvre est $t_f = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$.

En reformulant les équations (1.47) et (1.49) de la section III.1.2.1, nous pouvons définir la fonction $A_{veh} : \mathbb{R}^r \times [0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^2$ grâce à (2.5), où $t_f : \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$. Chaque partie de (2.5) est associée à une phase de la manœuvre.

1. En particulier, elle serait associée au ressenti des SVS et SVT (cf. sections II.2.1 et II.2.2, respectivement).

$$\dot{\underline{x}}(\underline{\theta}, t) = A_{veh}(\underline{\theta}, t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} V_{veh}^{ph1}(\underline{\theta}, t) \\ a_{veh}^{ph1}(\underline{\theta}, t) \end{bmatrix}, & 0 \leq t < \frac{a_{ex}-a_0}{J_1} \\ \begin{bmatrix} V_{veh}^{ph2}(\underline{\theta}, t) \\ a_{veh}^{ph2}(\underline{\theta}, t) \end{bmatrix}, & \frac{a_{ex}-a_0}{J_1} \leq t < \frac{a_{ex}-a_0}{J_1} + \tau_2 \\ \begin{bmatrix} V_{veh}^{ph3}(\underline{\theta}, t) \\ a_{veh}^{ph3}(\underline{\theta}, t) \end{bmatrix}, & \frac{a_{ex}-a_0}{J_1} + \tau_2 \leq t \leq \frac{a_{ex}-a_0}{J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \end{cases} \quad (2.5)$$

Où :

$$V_{veh}^{ph1} : \mathbb{R}^r \times [0, \tau_1] \rightarrow \mathbb{R}, \quad V_{veh}^{ph1}(\underline{\theta}, t) = v_0 + a_0 t + \left(\frac{J_1}{2}\right) t^2 \quad (2.6)$$

$$a_{veh}^{ph1} : \mathbb{R}^r \times [0, \tau_1] \rightarrow \mathbb{R}, \quad a_{veh}^{ph1}(\underline{\theta}, t) = a_0 + J_1 t \quad (2.7)$$

$$V_{veh}^{ph2} : \mathbb{R}^r \times [\tau_1, \tau_1 + \tau_2] \rightarrow \mathbb{R}, \quad V_{veh}^{ph2}(\underline{\theta}, t) = \left[v_0 - \frac{(a_{ex}-a_0)^2}{2J_1} \right] + a_{ex} t \quad (2.8)$$

$$a_{veh}^{ph2} : \mathbb{R}^r \times [\tau_1, \tau_1 + \tau_2] \rightarrow \mathbb{R}, \quad a_{veh}^{ph2}(\underline{\theta}, t) = a_{ex} \quad (2.9)$$

$$V_{veh}^{ph3} : \mathbb{R}^r \times [\tau_1 + \tau_2, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3] \rightarrow \mathbb{R}, \quad V_{veh}^{ph3}(\underline{\theta}, t) = \left[v_0 - \frac{(a_{ex}-a_0)^2}{2J_1} - \frac{J_3}{2} \left(\frac{a_{ex}-a_0}{J_1} + \tau_2 \right)^2 \right] + J_3 \left[\frac{a_{ex}-a_0}{J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right] t - \frac{J_3}{2} t^2 \quad (2.10)$$

$$a_{veh}^{ph3} : \mathbb{R}^r \times [\tau_1 + \tau_2, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3] \rightarrow \mathbb{R}, \quad a_{veh}^{ph3}(\underline{\theta}, t) = J_3 \left[\frac{a_{ex}-a_0}{J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right] - J_3 t \quad (2.11)$$

Les relations entre les à-coups et les durées des phases transitoires sont données par (2.12) et (2.13). Grâce à ces équations nous avons pu définir (2.6)-(2.11) en ayant les éléments de $\underline{\theta}$ comme seules variables .

$$J_1 = \frac{a_{ex} - a_0}{\tau_1} \quad (2.12)$$

$$J_3 = \frac{a_{ex}}{\tau_3} \quad (2.13)$$

En intégrant (2.5) sur les modèles de consommation *physique* et *analytique*, donnés respectivement par les équations (1.55) et (1.144) de la section III.1.2, nous pouvons définir une fonctionnelle $\mathcal{J}(u(\underline{\theta}))$ en utilisant (2.14), où \check{P}_{bat} , et donc \check{E}_{mnv} , peuvent être issues des modèles physique ou analytique de consommation. Cette fonction coût, pour un paramétrage du système donné, est complètement définie par la connaissance de $\underline{\theta}$.

$$\mathcal{J}(u(\underline{\theta})) = \int_0^{t_f(\underline{\theta})} \check{P}_{bat}(\underline{\theta}, t) dt = \check{E}_{mnv}(\underline{\theta}) \quad (2.14)$$

2.1.2 Contrainte sur la vitesse finale

Nous pouvons considérer, comme discuté en section I.1.6.3, que l'*objectif principal* d'une manœuvre, d'un point de vue cinématique, est d'atteindre une vitesse cible, en partant

d'une vitesse initiale. Le *pourquoi* de cet objectif peut varier ; il peut être dû à l'infrastructure, au trafic, ou à d'autres facteurs. En revanche, pour un grand nombre de scénarios différents, il est possible d'identifier une vitesse que le véhicule doit atteindre à la fin de la manœuvre.

Nous devons faire à présent la distinction entre le véhicule dont nous souhaitons maîtriser la dynamique, que nous appellerons *véhicule hôte*, et les autres éléments de l'environnement que nous nommerons *les cibles*. Nous considérons pour nos études une seule cible à la fois. Il peut s'agir de l'automobile derrière laquelle on roule, mais aussi d'un feu tricolore ou d'un panneau de changement de vitesse réglementaire, pour ne citer que quelques exemples.

La vitesse du véhicule hôte à la fin d'une manœuvre est donnée par l'équation (1.50) de la partie III. Nous la retranscrivons sur (2.15) en adoptant une nouvelle notation, plus simple et plus propice à l'analyse des scénarios de conduite. En particulier, les variables cinématiques associées à des états seront accompagnées d'un exposant qui indique l'objet étudié : un « *h* » si on parle du véhicule hôte et un « *c* » si on fait référence à la cible. Aussi, l'indice « 0 » déterminera que nous avons à faire au paramètre *en début de manœuvre* et l'indice « *f* » qu'il s'agit de sa valeur *en fin de manœuvre*. A titre d'exemple, V_0^h et V_f^h correspondent respectivement aux vitesses initiale et finale du véhicule hôte.

$$V_f^h = V_{veh}(t_f) = V_0^h + a_0\tau_1 + \frac{1}{2}J_1\tau_1^2 + a_{ex}\tau_2 + a_{ex}\tau_3 - \frac{1}{2}J_3\tau_3^2 \quad (2.15)$$

En partant de ces équations, il est possible d'exprimer (2.15), en fonction des paramètres de la manœuvre, comme suit :

$$V_f^h = V_0^h + \frac{a_{ex}^2 - a_0^2}{2J_1} + a_{ex}\tau_2 + \frac{a_{ex}^2}{2J_3} \quad (2.16)$$

Ainsi, nous pouvons définir l'objectif sur la vitesse finale comme une *contrainte d'égalité* de la forme $\hat{g}(\underline{\theta}) = 0$, comme montré sur (2.17), où $\Delta V^h = V_f^h - V_0^h$ est la variation de vitesse du véhicule hôte entre le début et la fin de la manœuvre.

$$\hat{g}(\underline{\theta}) = \Delta V^h - \frac{a_{ex}^2 - a_0^2}{2J_1} - a_{ex}\tau_2 - \frac{a_{ex}^2}{2J_3} = 0 \quad (2.17)$$

* * *

La valeur finale de la vitesse du véhicule hôte peut être égale à celle de la cible, $V_f^h = V_f^c$, comme dans le cas d'un accostage derrière un véhicule. Cependant, cela n'est pas systématiquement le cas. Par exemple, lorsque la cible est un panneau de signalisation, ses vitesses initiale et finale seront nulles : $V_0^c = 0$ et $V_f^c = 0$; en revanche, la vitesse finale du véhicule hôte correspondra à ce qui est indiqué sur le panneau.

Cet exemple, permet de montrer le potentiel associé à l'utilisation d'une *représentation stratégique* du problème de changement de vitesse à bord d'un véhicule. Grâce à cela, nous pouvons nous servir d'un même algorithme pour calculer les manœuvres optimales pour des scénarios associés au trafic et à l'infrastructure.

2.1.3 Contrainte sur la distance finale

Un autre enjeu associé à l'exécution d'une manœuvre est le maintien d'une distance *pertinente* par rapport à la cible. Par exemple, lorsque la cible correspond à une autre automobile, se retrouver trop près à la fin d'une manœuvre peut être anxiogène, voire même dangereux ; en revanche, si on fini à une distance trop importante, le conducteur peut être gêné car d'autres véhicules pourraient s'insérer devant lui. Ainsi, il existe une notion de *couloir d'inter-distance admissible* devant être considérée pour respecter l'agrément de conduite. Stanger et del Re [209], puis Scmied et al. [192] ont proposé d'utiliser un tel couloir afin de gagner un degré de liberté dans l'optimisation de la dynamique longitudinale du véhicule.

Pour construire des contraintes basées sur ce principe, nous devons d'abord calculer la valeur de l'inter-distance en fin de manœuvre, en fonction des paramètres $\underline{\theta}$. Pour cela nous commencerons en calculant la position finale du véhicule hôte, X_f^h , en partant de l'équation (1.53) de la section III.1.2.1.2, en appliquant la nouvelle notation. Cela est présenté sur (2.18).

$$X_f^h = X_0^h + \left[V_0^h + \frac{a_0 \tau_1}{2} + \frac{J_1 \tau_1^2}{6} \right] (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + \left[\frac{a_0 \tau_1}{2} + \frac{J_1 \tau_1^2}{6} \right] (\tau_1 + \tau_2) + \frac{a_{ex}}{2} (\tau_2 + \tau_3)^2 - \frac{J_3}{6} \tau_3^3 \quad (2.18)$$

La même équation peut être reformulée en ayant comme seules variables les éléments de $\underline{\theta}$:

$$X_f^h = X_0^h + \left(\frac{a_{ex} - a_0}{J_1} \right) \left[V_0^h + \frac{a_0 (a_{ex} - a_0)}{6 J_1} + \left(\frac{a_{ex} + a_0}{2} \right) \left(\frac{a_{ex} - a_0}{3 J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \right] + \left[V_0^h + \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \right] \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) - \frac{a_{ex}^3}{6 J_3^2} \quad (2.19)$$

Pour calculer la position finale de la cible, nous supposons que celle-ci se déplace à une vitesse constante V_0^c . Même si cette hypothèse est grossière, le fait d'estimer un paramètre global représentatif du comportement de la cible, permet de gagner une certaine robustesse. C'est un avantage associé à l'application de la compétence stratégique : pour trouver une stratégie *pertinente* on a juste besoin d'une *représentation grossière* du *comportement global* de l'environnement ; les imprécisions dans cette estimation seront corrigées par l'application de la *compétence tactique* et de l'*action procéduralisée*.

Si l'on voulait gagner un peu en précision, une possibilité consiste à prédire la vitesse finale du véhicule cible en fonction du contexte. Par exemple, si le véhicule est en train d'accélérer à cause d'un changement de vitesse réglementaire, il est assez probable qu'il finira à la vitesse imposée par le panneau ; ainsi, il suffit de faire une hypothèse *pertinente* sur la durée de sa manœuvre pour estimer *grossièrement* l'*accélération moyenne* de la cible. Pour d'autres approches pour prédire le comportement cinématique du véhicule précédent, le lecteur peut consulter [107]. En revanche, les approches que nous proposons sont beaucoup moins sensibles aux imprécisions et au bruit dans l'estimation de l'accélération du véhicule précédant, paramètre assez difficile à déterminer.

Sous l'hypothèse de vitesse constante, la position finale de la cible, X_f^c est donnée par (2.20), où X_0^c est sa position en début de manœuvre.

$$X_f^c = X_0^c + V_0^c (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) \quad (2.20)$$

Cette expression peut être reformulée en fonction des paramètres de la manœuvre, comme suit :

$$X_f^c = X_0^c + \frac{V_0^c (a_{ex} - a_0)}{J_1} + V_0^c \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \quad (2.21)$$

Ainsi, l'inter-distance finale entre le véhicule hôte et la cible, $\Delta X_f = X_f^c - X_f^h$, est donnée par (2.22), où $\Delta X_0 = X_0^c - X_0^h$ et $\Delta V_0 = V_0^c - V_0^h$ sont l'inter-distance et la vitesse relative au début de la manœuvre. Les valeurs de ΔX_0 et ΔV_0 peuvent être mesurées en utilisant des capteurs *industriels* des véhicules, comme des radars ou des caméras.

$$\begin{aligned} \Delta X_f = \Delta X_0 + \left(\frac{a_{ex} - a_0}{J_1} \right) \left[\Delta V_0 - \frac{a_0 (a_{ex} - a_0)}{6 J_1} - \left(\frac{a_{ex} + a_0}{2} \right) \left(\frac{a_{ex} - a_0}{3 J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \right] \\ + \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \left[\Delta V_0 - \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \right] + \frac{a_{ex}^3}{6 J_3^2} \end{aligned} \quad (2.22)$$

* * *

Si le calcul est réalisé en début de manœuvre, alors que le véhicule roule à une vitesse *relativement stable*, il est possible de faire l'hypothèse que $a_0 = 0$. Dans ce cas, la position finale du véhicule hôte est donnée par :

$$\begin{aligned} X_f^h = X_0^h + V_0^h \left[\tau_2 + \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_3} \right) a_{ex} \right] + \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right)^2 \\ + \frac{a_{ex}^3}{6} \left(\frac{1}{J_1^2} - \frac{1}{J_3^2} \right) + \frac{a_{ex}^2}{2 J_1} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

La position finale de la cible devient :

$$X_f^c = X_0^c + \frac{V_0^c a_{ex}}{J_1} + V_0^c \tau_2 + \frac{V_0^c a_{ex}}{J_3} \quad (2.24)$$

Ainsi, l'inter-distance en fin de manœuvre est donné par (2.25).

$$\begin{aligned} \Delta X_f = \Delta X_0 + \Delta V_0 \left[\tau_2 + \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_3} \right) a_{ex} \right] - \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right)^2 \\ - \frac{a_{ex}^3}{6} \left(\frac{1}{J_1^2} - \frac{1}{J_3^2} \right) - \frac{a_{ex}^2}{2 J_1} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

* * *

Nous pouvons à présent exprimer le *couloir d'inter-distance acceptable* comme présenté sur (2.26), où $\Delta \check{X}_{mnv}$, $\Delta \hat{X}_{mnv} \in \mathbb{R}$ et peuvent dépendre de la vitesse finale. Le respect de $\Delta X_f \geq \Delta \check{X}_{mnv}$ permet de garder une distance de sécurité avec le véhicule précédent ; en plus du risque qu'elle représente, une inter-distance excessivement faible peut être anxiogène et produire de l'inconfort chez le conducteur [214]. La contrainte $\Delta X_f \leq \Delta \hat{X}_{mnv}$ évite d'avoir une inter-distance trop importante, favorisant l'insertion des nouveaux véhicules ; non seulement ce serait désagréable pour le conducteur, mais les variations de

vitesse nécessaires pour permettre l'insertion engendrerait des pertes supplémentaires d'énergie.

$$\Delta\check{X}_{mrv} \leq \Delta X_f \leq \Delta\hat{X}_{mrv} \quad (2.26)$$

Ainsi, il est possible de définir deux contraintes d'inégalité sur les état finaux, de la forme $\hat{f}_i(\underline{\theta}) \leq 0$. La première, $\hat{f}_1(\underline{\theta})$, est donnée par (2.27) et associée à l'inter-distance minimum à garder ; la contrainte $\hat{f}_2(\underline{\theta})$, présentée sur (2.28), évite de se retrouver trop loin du véhicule précédent à la fin de la manœuvre.

$$\hat{f}_1(\underline{\theta}) = \begin{bmatrix} \Delta\check{X}_{mrv} - \Delta X_0 - \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right) \left[\Delta V_0 - \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right) \right] - \frac{a_{ex}^3}{6 J_3^2} \\ - \left(\frac{a_{ex} - a_0}{J_1}\right) \left[\Delta V_0 - \frac{a_0(a_{ex} - a_0)}{6 J_1} - \left(\frac{a_{ex} + a_0}{2}\right) \left(\frac{a_{ex} - a_0}{3 J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right) \right] \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.27)$$

$$\hat{f}_2(\underline{\theta}) = \begin{bmatrix} \Delta X_0 - \Delta\hat{X}_{mrv} + \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right) \left[\Delta V_0 - \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right) \right] + \frac{a_{ex}^3}{6 J_3^2} \\ + \left(\frac{a_{ex} - a_0}{J_1}\right) \left[\Delta V_0 - \frac{a_0(a_{ex} - a_0)}{6 J_1} - \left(\frac{a_{ex} + a_0}{2}\right) \left(\frac{a_{ex} - a_0}{3 J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right) \right] \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.28)$$

En faisant l'hypothèse $a_0 = 0$, nous pouvons trouver les expressions simplifiées présentées sur (2.29) et (2.30).

$$\hat{f}_1(\underline{\theta}) = \begin{bmatrix} \Delta\check{X}_{mrv} - \Delta X_0 - \Delta V_0 \left[\tau_2 + \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_3}\right) a_{ex} \right] + \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right)^2 \\ + \frac{a_{ex}^3}{6} \left(\frac{1}{J_1^2} - \frac{1}{J_3^2}\right) + \frac{a_{ex}^2}{2 J_1} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right) \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.29)$$

$$\hat{f}_2(\underline{\theta}) = \begin{bmatrix} \Delta X_0 + \Delta V_0 \left[\tau_2 + \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_3}\right) a_{ex} \right] - \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right)^2 \\ - \frac{a_{ex}^3}{6} \left(\frac{1}{J_1^2} - \frac{1}{J_3^2}\right) - \frac{a_{ex}^2}{2 J_1} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3}\right) - \Delta\hat{X}_{mrv} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.30)$$

* * *

Le scénario le plus intuitif représentable par ce type de contraintes est celui de l'accostage derrière un autre véhicule. En revanche, la même formulation peut être utilisée pour d'autres scénarios, ce qui met en avant la composante *stratégique* de cette modélisation. Par exemple, des arrêts devant un feu tricolore peuvent être considérées en prenant $V_0^c = 0$ et $X_f^c = X_0^c$ (le feu étant un objet statique), et la vitesse final du véhicule hôte doit alors être nulle, $V_f^h = 0$, et la valeur finale d'inter-distance, ΔX_f doit être positive, car on doit s'arrêter avant le feu.

A contrario, si l'on est en face d'un feu vert, et si c'est *faisable*, on peut chercher à vouloir passer devant le feu avant qu'il devienne rouge. Dans ce cas, on doit finir à une vitesse positive, $V_f^h > 0$, pertinente par rapport au scénario, et à une inter-distance négative $\Delta X_f < 0$ qui représenterait le fait de finir la manœuvre *après* le feu. Dans un tel scénario, il peut être d'intérêt de définir une durée maximale pour attendre les objectifs de la manœuvre, ce qui permettrait de garantir de dépasser le feu avant que celui-ci change de couleur. La formulation d'une telle contrainte sera discutée ci-dessous.

2.1.4 Contraintes temporelles

Lors de la conduite en situation réelle, il existe une notion de *durée adéquate* des actions du conducteur. En effet, les normes sociales et l'agrément de conduite sont contraires à des manœuvres trop longues. Ainsi, nous pouvons introduire une *contrainte sur la durée maximale des manœuvres*, $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \leq \hat{\tau}_{mnv}$. Cette condition peut être représentée par une fonction de type $\hat{h}_i(\underline{\theta})$ en utilisant (2.31), où $\hat{\tau}_{mnv} \in \mathbb{R}_{++}$.

$$\hat{h}_1(\underline{\theta}) = \frac{a_{ex} - a_0}{J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} - \hat{\tau}_{mnv} \leq 0 \quad (2.31)$$

On peut imaginer aussi une *contrainte sur la durée minimale des manœuvres*, $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \geq \check{\tau}_{mnv}$, pour éviter des comportements trop brusques du véhicule. L'équation (2.32) permet de représenter une telle contrainte, où $\check{\tau}_{mnv} \in \mathbb{R}_{++}$.

$$\hat{h}_2(\underline{\theta}) = \check{\tau}_{mnv} - \frac{a_{ex} - a_0}{J_1} - \tau_2 - \frac{a_{ex}}{J_3} \leq 0 \quad (2.32)$$

En outre, les équations (2.33)-(2.35) permettent de garantir le respect du *Principe de causalité*², en évitant d'avoir des phases de manœuvre à durée négative.

$$\hat{h}_3(\underline{\theta}) = -\tau_1 = \frac{a_0 - a_{ex}}{J_1} \leq 0 \quad (2.33)$$

$$\hat{h}_4(\underline{\theta}) = -\tau_2 \leq 0 \quad (2.34)$$

$$\hat{h}_5(\underline{\theta}) = -\tau_3 = -\frac{a_{ex}}{J_3} \leq 0 \quad (2.35)$$

Pour appliquer l'hypothèse de début de manœuvre, il suffit de rendre $a_0 = 0$, dans les équations (2.31)-(2.35).

2.1.5 Contraintes liées à l'agrément de conduite

Nous représenterons l'agrément de conduite en utilisant la modélisation proposée dans le chapitre II.2. En particulier, les valeurs limites d'accélération et d'à-coup seront prises en compte pendant l'*Optimisation énergétique*, associée à la *Compétence stratégique*. Le chapitre II.2 a également introduit des contraintes sur la variabilité de l'à-coup et de l'accélération au cours de chacune des phases, représentée par des seuils δa_+ , δa_- , δj_+ et δa_- ; en revanche, cela sera traité implicitement par le sous-système de *Commande des actionneurs*, associé au phénomène de *procéduralisation*.

2.1.5.1 Contraintes sur l'accélération

Le fonctionnement du SVS ferait que l'acceptabilité de la conduite dépende du niveau d'accélération pendant sa phase stabilisée (cf. Chapitre II.1). Sur des manœuvres trapézoïdales, cela se traduirait par la *contrainte de boîte* (2.36), où \check{a}_{mnv} et \hat{a}_{mnv} sont les seuils minimum et maximum d'accélération acceptable (cf. section II.2.1).

2. A proprement parler, on ne sait pas si ce principe est *vrai*. En particulier, une interprétation plausible de certaines expériences à l'échelle quantique indiquerait que des particules *remontent le cours du temps* [66]. En revanche, à l'échelle humaine, à ce que nous savons, les événements semblent se dérouler *suivant la flèche du temps*, ce qui rend le Principe de causalité une description pertinente de la réalité tel que nous l'observons.

$$\check{a}_{mnv} \leq a_{ex} \leq \hat{a}_{mnv} \quad (2.36)$$

Sur des manœuvres d'accélération, la contrainte \hat{a}_{mnv} serait représentative de la tolérance associée au SVS ; sur des décélérations, ce serait le seuil \check{a}_{mnv} qui aurait le plus grand intérêt. Ainsi, dans chaque cas, on pourrait uniquement considérer le paramètre le plus influent, et rendre nulle la valeur de l'autre. Toutefois, on peut aussi se servir de ce paramètre pour inclure une notion de *performance minimale* à respecter afin de répondre aux attentes de l'utilisateur en termes des *sensations* que son véhicule lui produit.

Cette contrainte peut être déclinée sous la forme des deux fonctions $\hat{h}_6(\underline{\theta})$ et $\hat{h}_7(\underline{\theta})$, comme suit :

$$\hat{h}_6(\underline{\theta}) = \check{a}_{mnv} - a_{ex} \leq 0 \quad (2.37)$$

$$\hat{h}_7(\underline{\theta}) = a_{ex} - \hat{a}_{mnv} \leq 0 \quad (2.38)$$

2.1.5.2 Contraintes sur l'à-coup

L'expérience empirique montre que l'à-coup joue un rôle déterminant sur l'agrément de conduite [18], ce qui serait associé à l'opération du SVT (cf. Chapitre II.1). En outre, la topologie du profil d'accélération semble jouer un rôle sur l'agrément de conduite [19] ; en particulier, la sensibilité à l'à-coup pourrait varier en fonction du temps au cours d'une manœuvre. Ainsi, un conducteur pourrait être plus sensible à l'à-coup des phases stabilisée d'une manœuvre, qu'à celui des phases transitoires. Cela a été présenté et formalisé dans le Chapitre II.2.

L'agrément de conduite associé à l'à-coup se traduirait, sur un problème d'optimisation, sous la forme des contraintes sur la dérivée seconde des états. Sur la section IV.1.3.1, celles-ci ont été exprimées, de manière assez générale, comme des fonctions de la forme $h_i(\ddot{\mathbf{x}}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t), u(t), t) \leq 0$. En revanche, la formulation de telles contraintes sur un problème *dynamique* généralisé est loin d'être triviale.

Une approche possible, permettant au moins d'écrire ce type de contrainte, est l'utilisation des normes infinies comme, par exemple, $\|J_{veh}(t)\|_{\infty} - J_{mini} \leq 0$ (on peut faire de même sur l'accélération : $\|a_{veh}(t)\|_{\infty} - a_{mini} \leq 0$). En revanche, cette contrainte traduirait un seuil *constant* d'à-coup, J_{mini} , à ne pas dépasser pendant la manœuvre. Tel que nous l'avons vu, la tolérance à l'à-coup varierait entre les phases transitoires et stabilisées de la manœuvre. Les contraintes de type norme infinie, produisent donc une approximation grossière et moins représentative de la réalité, que celles qu'on pourrait générer en formulant un problème *quasi-optimal*. Pour utiliser un langage mathématique, on peut dire que l'ensemble \mathcal{A}' , issu d'une formulation *optimale* basée sur des normes infinies, *représente moins bien* l'ensemble admissible *réel* du problème, \mathcal{A} , que l'ensemble \mathcal{C}_{adm} , résultant de la formulation *quasi-optimale* proposée dans cette section.

Nous supposons ici que la sensibilité à l'à-coup est la même pour les phases transitoires initiale et finale d'une manœuvre. Ainsi, l'agrément de conduite peut être garanti par le respect des contraintes de boîte (2.39) et (2.40), où \check{J}_{mnv} et \hat{J}_{mnv} correspondent respectivement aux seuils minimum et maximum de tolérance à l'à-coup (cf. sections II.2.2,

II.3.4 et II.3.5). En général, selon qu'on ait à faire à des accélérations ou à des décélérations, un des ces deux seuils sera *prépondérant* ; en revanche, tout comme pour les accélérations, l'autre seuil peut être employé pour donner *plus de sensations* au conducteur.

$$\check{J}_{mnv} \leq J_1 \leq \hat{J}_{mnv} \quad (2.39)$$

$$\check{J}_{mnv} \leq J_3 \leq \hat{J}_{mnv} \quad (2.40)$$

Les contraintes de boîte peuvent être réécrites pour correspondre à la formulation du problème (1.14), comme suit :

$$\hat{h}_8(\underline{\theta}) = \check{J}_{mnv} - J_1 \leq 0 \quad (2.41)$$

$$\hat{h}_9(\underline{\theta}) = J_1 - \hat{J}_{mnv} \leq 0 \quad (2.42)$$

$$\hat{h}_{10}(\underline{\theta}) = \check{J}_{mnv} - J_3 \leq 0 \quad (2.43)$$

$$\hat{h}_{11}(\underline{\theta}) = J_3 - \hat{J}_{mnv} \leq 0 \quad (2.44)$$

* * *

Bellem et al. [19] ont montré que la topologie des manœuvres d'accélération aurait un impact sur l'agrément de conduite. En particulier, les conducteurs semblent mieux apprécier des décélérations ayant une forme « symétrique », c'est-à-dire, celles où le transitoire initial et le final ont la même intensité. Pour tenir compte de ce phénomène, il suffit d'ajouter la condition $J_1 = J_3$, pouvant être exprimée par la contrainte (2.45)³. L'utilisation de manœuvres symétriques réduit la complexité du problème d'optimisation dans la mesure où il ne faudrait trouver qu'une seule valeur d'à-coup ; de même, cela peut faciliter une implémentation temps-réel d'un algorithme d'éco-conduite, comme nous le verrons sur le prochain chapitre.

$$\hat{m}_1(\underline{\theta}) = J_1 - J_3 = 0 \quad (2.45)$$

2.2 PROBLÈME *quasi-optimal* D'ÉCOCONDUITE : SCÉNARIOS D'ÉCOCONDUITE

Objectif de la section

Formuler, dans le langage propre à l'Automatique, le problème de trouver une manœuvre presque optimale.

2.2.1 Problème *quasi-optimal* d'écoconduite : distance finale libre

Nous proposerons d'abord la formulation du *problème quasi-optimal d'éco-conduite*, résultant de l'intégration des éléments (fonction coût et contraintes) présentés dans la section précédente. Le problème (2.46) permet de déterminer la *manœuvre (presque) optimale* définie par les paramètres $\underline{\theta}^* = [a_{ex}^*, J_1^*, J_3^*, \tau_2^*]^T$ permettant de répondre à la volonté du conducteur, tout en respectant l'agrément de conduite, pour un scénario donné.

³. La notation en \hat{m}_1 se veut suggestive de l'équation (1.20).

$$\begin{aligned}
& \underset{\underline{\theta} \in \mathbb{R}^r}{\text{minimiser}} && \check{E}_{mnv}(\underline{\theta}) = \int_0^{t_f(\underline{\theta})} \check{P}_{bat}(\underline{\theta}, t) dt \\
& \text{tel que} && V_f^h = V_0^h + \frac{a_{ex}^2 - a_0^2}{2J_1} + a_{ex}\tau_2 + \frac{a_{ex}^2}{2J_3} \\
& && \Delta\check{X}_{mnv} \leq \Delta X_f(\underline{\theta}) \leq \Delta\hat{X}_{mnv} \\
& && \check{\tau}_{mnv} \leq t_f(\underline{\theta}) \leq \hat{\tau}_{mnv} \\
& && \tau_1(\underline{\theta}) \geq 0 \\
& && \tau_2(\underline{\theta}) \geq 0 \\
& && \tau_3(\underline{\theta}) \geq 0 \\
& && \check{a}_{mnv} \leq a_{ex} \leq \hat{a}_{mnv} \\
& && \check{J}_{mnv} \leq J_1 \leq \hat{J}_{mnv} \\
& && \check{J}_{mnv} \leq J_3 \leq \hat{J}_{mnv}
\end{aligned} \tag{2.46}$$

Nous avons décidé, dans un premier temps, de garder une notation assez proche du *sens* de chacune des contraintes. en revanche, le même problème peut être ré-écrit pour respecter la formulation générale d'un problème quasi-optimal, montrée par (1.14). Cela est présenté sur (2.47). La fonction \check{E}_{mnv} peut correspondre au modèle numérique E_{mnv} , ou au modèle analytique \tilde{E}_{mnv} , donnés respectivement par les équations (1.55) et (1.144) de la section III.1.2.

$$\begin{aligned}
& \underset{\underline{\theta} \in \mathbb{R}^r}{\text{minimiser}} && \check{E}_{mnv}(\underline{\theta}) = \int_0^{t_f(\underline{\theta})} \check{P}_{bat}(\underline{\theta}, t) dt \\
& \text{tel que} && \hat{g}(\underline{\theta}) = \Delta V^h - \frac{a_{ex}^2 - a_0^2}{2J_1} - a_{ex}\tau_2 - \frac{a_{ex}^2}{2J_3} = 0 \\
& && \hat{f}_1(\underline{\theta}) \leq 0 \\
& && \hat{f}_2(\underline{\theta}) \leq 0 \\
& && \hat{h}_1(\underline{\theta}) = \frac{a_{ex} - a_0}{J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} - \hat{\tau}_{mnv} \leq 0 \\
& && \hat{h}_2(\underline{\theta}) = \check{\tau}_{mnv} - \frac{a_{ex} - a_0}{J_1} - \tau_2 - \frac{a_{ex}}{J_3} \leq 0 \\
& && \hat{h}_3(\underline{\theta}) = \frac{a_0 - a_{ex}}{J_1} \leq 0 \\
& && \hat{h}_4(\underline{\theta}) = -\tau_2 \leq 0 \\
& && \hat{h}_5(\underline{\theta}) = -\frac{a_{ex}}{J_3} \leq 0 \\
& && \hat{h}_6(\underline{\theta}) = \check{a}_{mnv} - a_{ex} \leq 0 \\
& && \hat{h}_7(\underline{\theta}) = a_{ex} - \hat{a}_{mnv} \leq 0 \\
& && \hat{h}_8(\underline{\theta}) = \check{J}_{mnv} - J_1 \leq 0 \\
& && \hat{h}_9(\underline{\theta}) = J_1 - \hat{J}_{mnv} \leq 0 \\
& && \hat{h}_{10}(\underline{\theta}) = \check{J}_{mnv} - J_3 \leq 0 \\
& && \hat{h}_{11}(\underline{\theta}) = J_3 - \hat{J}_{mnv} \leq 0
\end{aligned} \tag{2.47}$$

Résoudre un tel problème est loin d'être facile : rien ne garanti la convexité de la fonction coût, la contrainte d'égalité n'est pas affine et certaines des contraintes d'inégalité ne sont pas convexes. Il est donc clair qu'il ne s'agit pas d'un problème d'optimisation convexe, pouvant être résolu de manière *globale* dans un *temps polynomial* [22]. Toutefois, étant donné que c'est un problème à petite dimension (quatre paramètres d'optimisation), si le temps de calcul n'est pas une contrainte, il existe des méthodes permettant de trouver l'*optimum global*. Nous en proposerons une dans la suite de ce document.

2.2.2 Problème quasi-optimal d'écoconduite : distance finale libre et manœuvre symétrique

Comme nous l'avons dit précédemment, il peut avoir un intérêt à imposer aux trapèzes d'accélération d'être « symétriques » ; par cela nous entendons que la valeur d'à-coup ait la même amplitude dans les deux phases transitoires. Pour introduire cette condition, nous pouvons inclure (2.45) comme une contrainte d'égalité supplémentaire (de la forme $\hat{m}_1 = 0$) sur le Problème (2.47). En revanche, par souci de simplification, il est possible de définir une nouvelle variable $J_s = J_1 = J_3$ et de reformuler le problème comme montré sur (2.48), en faisant les changements de variables adéquats. Les paramètres du problème sont donnés alors par $\underline{\theta}_s = [a_{ex}, J_s, \tau_2]^T$.

$$\begin{aligned}
\underset{\underline{\theta}_s \in \mathbb{R}^r}{\text{minimiser}} \quad & \check{E}_{mnv}(\underline{\theta}_s) = \int_0^{t_f(\underline{\theta}_s)} \check{P}_{bat}(\underline{\theta}_s, t) dt \\
\text{tel que} \quad & V_f^h = V_0^h + \frac{a_{ex}^2 - a_0^2}{2J_s} + a_{ex}\tau_2 + \frac{a_{ex}^2}{2J_s} \\
& \Delta\check{X}_{mnv} \leq \Delta X_f(\underline{\theta}_s) \leq \Delta\hat{X}_{mnv} \\
& \check{\tau}_{mnv} \leq t_f(\underline{\theta}_s) \leq \hat{\tau}_{mnv} \\
& \tau_1(\underline{\theta}_s) = \frac{a_{ex} - a_0}{J_s} \geq 0 \\
& \tau_2 \geq 0 \\
& \tau_3(\underline{\theta}_s) = \frac{a_{ex}}{J_s} \geq 0 \\
& \check{a}_{mnv} \leq a_{ex} \leq \hat{a}_{mnv} \\
& \check{J}_{mnv} \leq J_s \leq \hat{J}_{mnv}
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Le Problème (2.48) a une dimension en moins, et deux des contraintes d'inégalité ont disparu. De plus, il est peut-être possible de simplifier la fonction coût. De ce fait, on peut espérer un moindre coût lors du calcul associé à la résolution du problème.

2.2.3 Problème quasi-optimal d'écoconduite : distance finale libre et à-coup défini à l'avance

Pour réduire d'avantage le coût de calcul, il est possible d'enlever une dimension supplémentaire au problème d'optimisation, en fixant en amont la valeur de l'à-coup à

utiliser. Pour déterminer le niveau d'à-coup de la manœuvre, il est envisageable de résoudre le problème *hors-ligne* sur un certain nombre de cas, puis trouver des mécanismes pour déterminer des valeurs *pertinentes* d'à-coup en fonction de certains paramètres représentatifs du contexte. Un exemple de cette approche de modélisation, appliquée dans un contexte différent, concernant la consommation des véhicules hybrides rechargeables est présentée sur [162].

Le problème simplifié, en supposant toujours des *trapèzes symétriques*, est présenté sur (2.49), où \tilde{J}_s est la valeur d'à-coup définie en amont. Bien évidemment, cette valeur doit respecter la condition $\check{J}_{mnv} \leq \tilde{J}_s \leq \hat{J}_{mnv}$. De cette manière, les seuls paramètres du problème seraient l'amplitude et la durée de la phase stabilisée d'accélération. On notera une simplification de la contrainte d'égalité (même si elle n'est malheureusement pas affine); de même, les contraintes d'inégalité sont devenues beaucoup plus simples comme on peut le voir *explicitement* dans les cas de la durée de chaque phase: du fait que \tilde{J}_s est une constante, toutes les contraintes sont devenues des *fonctions affines*, beaucoup plus simples à traiter!

$$\begin{aligned}
& \underset{a_{ex}, \tau_2 \in \mathbb{R}}{\text{minimiser}} && \check{E}_{mnv}(a_{ex}, \tau_2) = \int_0^{t_f(a_{ex}, \tau_2)} \check{P}_{bat}(a_{ex}, \tau_2, t) dt \\
& \text{tel que} && \frac{1}{\tilde{J}_s} a_{ex} - \left(\Delta V^h + \frac{a_0^2}{2\tilde{J}_s} \right) \frac{1}{a_{ex}} + \tau_2 = 0 \\
& && \Delta \check{X}_{mnv} \leq \Delta X_f(a_{ex}, \tau_2) \leq \Delta \hat{X}_{mnv} \\
& && \check{\tau}_{mnv} \leq t_f(a_{ex}, \tau_2) \leq \hat{\tau}_{mnv} \\
& && \tau_1(a_{ex}, \tau_2) = \frac{1}{\tilde{J}_s} a_{ex} - \frac{a_0}{\tilde{J}_s} \geq 0 \\
& && \tau_2 \geq 0 \\
& && \tau_3(a_{ex}, \tau_2) = \frac{1}{\tilde{J}_s} a_{ex} \geq 0 \\
& && \check{a}_{mnv} \leq a_{ex} \leq \hat{a}_{mnv}
\end{aligned} \tag{2.49}$$

2.2.4 Problème quasi-optimal d'écoconduite: correction par rapport à une distance de référence

Un problème associé aux formulations précédentes réside dans le fait que, pour des valeurs différentes de $\underline{\theta}$, la distance parcourue par le véhicule ne sera pas la même. Dans certains cas, l'écart peut être important, et ce malgré les contraintes sur l'inter-distance. Par exemple, lors d'un accostage derrière un véhicule, si l'on réalise la manœuvre rapidement, le véhicule cible aura à peine parcouru une faible distance; en revanche, lors d'une manœuvre moins agressive, il aura eu plus de temps pour avancer et, en conséquence, le véhicule hôte devra rouler aussi une distance plus importante. Ainsi, même pour des cas où l'on finirait à des inter-distances identiques, il pourrait y avoir des grandes différences dans les distances *absolues* parcourues.

Dans beaucoup de situations de conduite, à la fin de la manœuvre, le véhicule devra, a

priori, continuer d'avancer à sa vitesse finale (cf. section III.2.1.2 et [184]), et donc consommer de l'énergie. La fonction coût (2.14) ne prend pas en considération la consommation supplémentaire pendant les phases à vitesse stabilisée en amont ou en aval de l'application du profil d'accélération. Cela introduit donc un biais dans l'analyse pénalisant les trapèzes qui permettent d'aller le plus loin.

Toutefois, il s'avère que les manœuvres permettant de parcourir les plus longues distances sont aussi celles qui prennent le plus de temps (cf. section III.2.1.2). Des transitoires prolongés peuvent augmenter la sensibilité du conducteur à l'accélération et à l'à-coup (cf. section II.1.3); de plus, des manœuvres trop longues pourraient être perçues comme désagréables (les utilisateurs pourraient considérer que le véhicule est « mou »). Ainsi, l'utilisation de (2.14) peut servir comme mécanisme de *régularisation* pour favoriser des trapèzes moins longs, afin de renforcer le respect de l'agrément de conduite.

Il est tout de même intéressant de pouvoir optimiser le comportement du véhicule, en faisant la comparaison la *plus juste* possible; ne serait-ce que pour quantifier *le coût de la régularisation*. Nous présenterons ci-dessous une approche permettant d'obtenir une fonction coût « corrigée », compensant les différences dans les distances parcourues grâce aux différentes manœuvres. Pour ce faire, nous appliquerons un principe assez proche de celui de la section III.2.1.

En prenant comme référence la manœuvre qui, tout en respectant l'ensemble des contraintes, permet d'aller le plus loin, nous définirons une *distance de référence*, notée ΔX^r . Sa valeur correspondra à la plus grande distance parcourue en faisant une *manœuvre acceptable*. Nous supposons le même temps de début pour toutes les manœuvres. De même, une fois la vitesse cible atteinte, le véhicule continuera de rouler à cette vitesse jusqu'à parcourir la distance de référence. Cela correspond par exemple à un *système d'aide à l'écoconduite* permettant de gérer les accostages derrière un véhicule et dont l'action commencerait lors de la levée de pied de la pédale d'accélération. C'est d'ailleurs le scénario que nous allons étudier.

Afin que la discussion ci-dessous soit valable pour l'ensemble des cas étudiés, nous allons utiliser la notation générique du problème d'optimisation présentée sur (2.50), où $\tilde{\theta}$ correspond au jeu de paramètres du cas à traiter.

$$\begin{aligned} & \underset{\tilde{\theta} \in \mathbb{R}^r}{\text{minimiser}} && \check{E}_{mnv}(\tilde{\theta}) \\ & \text{tel que} && \hat{g}_i(\tilde{\theta}) = 0 \quad , \quad i = 1, \dots, p \\ & && \hat{f}_i(\tilde{\theta}) \leq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, q \\ & && \hat{h}_i(\tilde{\theta}) \leq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \tag{2.50}$$

Soit $\delta X_f(\tilde{\theta})$ la différence entre la distance de référence et celle issue du trapèze défini par les paramètres $\tilde{\theta}$. Nous pouvons calculer $\delta X_f(\tilde{\theta})$ en utilisant (2.51), où $\Delta X^h(\tilde{\theta})$ est la longueur du déplacement pendant l'accélération, en fonction des paramètres $\tilde{\theta}$.

$$\delta X_f(\tilde{\theta}) = \Delta X^r - \Delta X^h(\tilde{\theta}) \tag{2.51}$$

Suite à la manœuvre, le véhicule hôte continue de rouler à vitesse stabilisée. Nous pouvons donc considérer une consommation instantanée constante, qui dépendra uniquement de sa vitesse finale, V_f^h . Nous noterons cette puissance $P_{fin}(V_f^h)$ et pouvons calculer sa valeur grâce à une cartographie. Ainsi, pour un jeu de paramètres $\tilde{\theta}$, la consommation totale de la *phase à roulage stabilisée*, E_{fin} , est donnée par (2.52), où $\tau_{fin} = \frac{\delta X_f}{V_f^h}$ est la durée de cette phase.

$$E_{fin}(\tilde{\theta}) = P_{fin}(V_f^h) \tau_{fin}(\tilde{\theta}) = \frac{P_{fin}}{V_f^h} \delta X_f(\tilde{\theta}) = \frac{P_{fin} \Delta X^r}{V_f^h} - \frac{P_{fin}}{V_f^h} \Delta X^h(\tilde{\theta}) \quad (2.52)$$

Ainsi, le problème d'optimisation (2.53), permet de déterminer le trapèze d'accélération optimal, avec prise en compte de la contrainte d'iso-distance parcourue. La nouvelle fonction coût est donnée par $\check{E}_{mnv}^{corr}(\tilde{\theta}) = \check{E}_{mnv}(\tilde{\theta}) + E_{fin}(\tilde{\theta})$.

$$\begin{aligned} & \underset{\tilde{\theta} \in \mathbb{R}^r}{\text{minimiser}} && \check{E}_{mnv}^{corr}(\tilde{\theta}) \\ \text{tel que} &&& \hat{g}_i(\tilde{\theta}) = 0 \quad , \quad i = 1, \dots, p \\ &&& \hat{f}_i(\tilde{\theta}) \leq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, q \\ &&& \hat{h}_i(\tilde{\theta}) \leq 0 \quad , \quad i = 1, \dots, m \\ &&& * \quad * \quad * \end{aligned} \quad (2.53)$$

La détermination de la distance de référence, ΔX^r , pour un certain espace de contraintes, peut-être formulé par un problème d'optimisation où l'on maximiserait $\Delta X^h(\tilde{\theta})$, tout en respectant toutes les autres contraintes du problème (2.53). En revanche, il n'y a pas de garantie que la fonction $\Delta X^h(\tilde{\theta})$ soit concave, ce qui rend difficile de résoudre le problème. Plus loin dans ce document nous proposerons une approche permettant de déterminer la valeur de ΔX^r pour une résolution *hors-ligne du problème*.

2.3 EXTRACTION DES PARAMÈTRES DU SCÉNARIO : ANALYSE DES MANŒUVRES RÉELLES

Objectif de la section

Extraire, à partir des informations issues des capteurs du véhicule, les paramètres décrivant un scénario d'écoconduite.

La plupart des situations de conduite que nous avons analysées dans le Chapitre III.3 impliquent des interactions complexes avec l'infrastructure, que ce soit à cause de la courbure ou de l'inclinaison de la route, de la signalisation, ou des changements de voie. Pour qu'un SAC puisse opérer en situation réelle, avec un niveau d'autonomie important, il doit pouvoir répondre à de telles situations. En revanche, pour pouvoir comprendre le fonctionnement et la performance de l'algorithme, il vaut mieux partir d'un

scénario simple. D'ailleurs, pour l'implémentation et la commercialisation industrielles, un constructeur automobile pourrait d'abord proposer des fonctions répondant à des cas à complexité relativement faible, pour ensuite développer des fonctions plus complètes en capitalisant sur le retour d'expérience.

Pour tester notre algorithme d'écoconduite, nous allons donc considérer le scénario étudié dans la section III.1.3.5, correspondant à un accostage derrière un camion sur la route D91, en direction de Versailles. Il s'agit d'un roulage sur une voie plate, avec une cible clairement définie ; de plus, à l'exception de la fin de la manœuvre, le scénario à lieu sur une seule voie. La Figure 2.1 présente les mesures des signaux cinématiques les plus importants associés à la manœuvre. Nous constatons un léger écart de vitesse entre les deux véhicules à la fin de l'action ; en revanche, la différence est suffisamment petite pour être acceptable pour le conducteur, voire pour que celui-ci ne puisse pas l'apercevoir⁴.

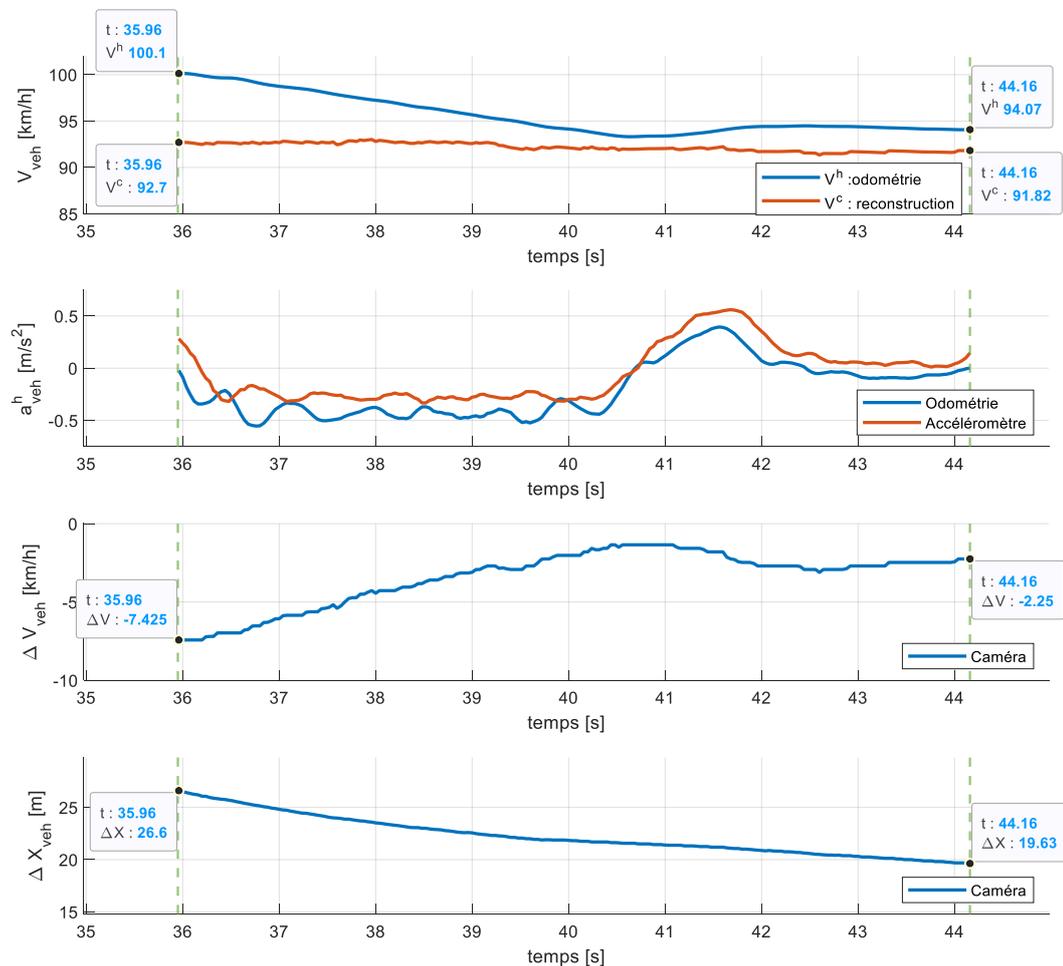


FIG. 2.1 – Mesures des signaux cinématiques au cours de la manœuvre. La vitesse de la cible a été reconstruite en ajoutant la vitesse du hôte, estimée grâce à l'odométrie, à la vitesse relative mesurée par la caméra.

4. Cela est d'autant plus vrai vu que le conducteur a tout de suite démarré une nouvelle action (cf. Figure 1.30 de la section III.1.3.5), ce qui lui aurait à peine laissé le temps pour évaluer l'écart de vitesse entre les deux véhicules.

La Figure 2.2 représente le sens des variables cinématiques dans un scénario d'accostage derrière un véhicule. Dans un tel problème, ΔX_0 représente la *distance initiale entre les deux véhicules*, pouvant être obtenue grâce aux capteurs de perception, c'est-à-dire, des radars, de caméras, des lidars, etc. Ces capteurs peuvent déterminer également la *vitesse relative* du véhicule précédent, ΔV_0 , permettant de calculer sa vitesse initiale comme $V_0^c = V_0^h + \Delta V_0$. Pour déterminer la *distance parcourue par l'hôte*, ΔX^h , il suffit d'intégrer la vitesse du véhicule, issue de l'odométrie, tout au long de la manœuvre. Pour calculer la *distance parcourue par la cible*, il suffit d'additionner à cette valeur l'inter-distance finale, puis de soustraire l'inter-distance initiale, $\Delta X^c = \Delta X^h + \Delta X_f - \Delta X_0$; les deux dernières valeurs étant mesurables par des capteurs.

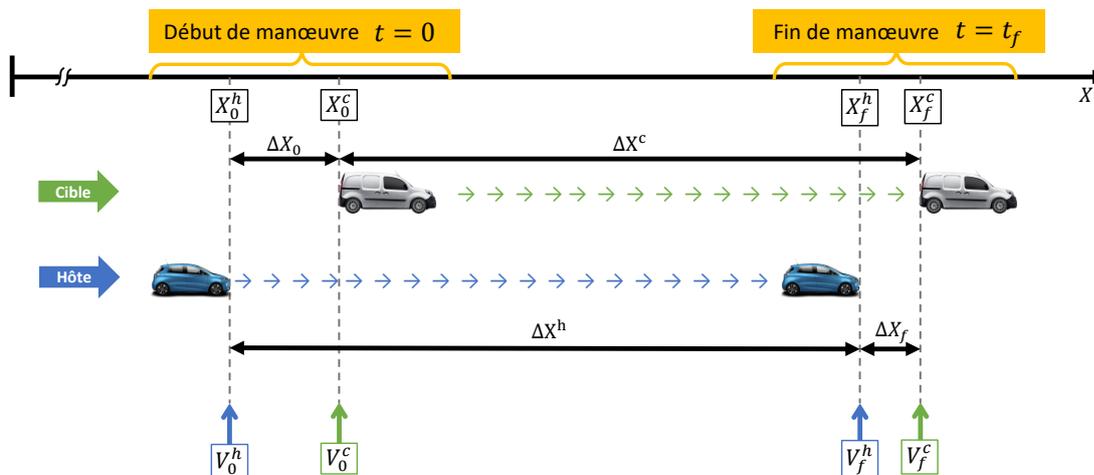


FIG. 2.2 – Variables cinématiques du scénario d'accostage derrière un véhicule

Le Tableau 2.1 présente des paramètres cinématiques et temporels du scénario étudié. À gauche, il est présenté les conditions initiales de la manœuvre, mesurées par les capteurs du véhicule, ou reconstruites à partir de celles-ci. Au centre, nous présentons les paramètres analogues mesurés en fin de manœuvre. Le tableau de droite présente les résultats de la méthode d'identification de la section II.3.3, appliquée au premier « trapèze » du conducteur lors du scénario étudié (entre $t = 35.96$ s et $t = 40.76$ s). Ces derniers devraient servir de parangon pour la solution proposée par l'algorithme ; ainsi, on pourrait évaluer la pertinence de la manœuvre exécutée par le conducteur par rapport au *trapèze optimal*. Aussi, on pourrait déterminer sur quels paramètres du profil le jugement du conducteur auraient été peu pertinents⁵.

Les instants de début et de fin de manœuvre sont données par rapport au début de l'enregistrement et leur seule fonction est de permettre de calculer sa durée totale.

Dans le scénario étudié, l'accélération de la phase stabilisée reste relativement faible, indiquant que le conducteur aurait correctement anticipé sa décélération. De ce point de vue, ce scénario ne serait pas le plus pertinent pour évaluer le gain énergétique potentiel

5. Toutefois, tel qu'il sera présenté plus tard, dans notre étude nous avons préféré faire la comparaison directement avec le profil d'accélération, après les traitements qui seront présentés dans cette section ; cela nous permet d'estimer plutôt un *potentiel absolu de gain*.

Début Mnv.		Fin Mnv.		Paramètre 1er Trpz.	
t_0	35.96 s	t_f	44.16 s	τ_1	0.31 s
V_0^h	27.806 m/s	V_f^h	26.131 m/s	τ_2	4.009 s
V_0^c	25.75 m/s	V_f^c	25.506 m/s	τ_3	0.3404 s
ΔX_0	26.63 m	ΔX_f	19.63 m	J_1	-1.676 m/s^3
ΔV_0	-2.063 m/s	ΔV_f	-0.625 m/s	J_3	-1.343 m/s^3
				a_{ex}	-0.419 m/s^2

TAB. 2.1 – Paramètres cinématiques et temporels du scénario étudié

de l'algorithme. En revanche, il devrait permettre d'évaluer le respect des objectifs et de l'agrément associé à la manœuvre de la solution proposé, sur des conditions réelles, ce qui indispensable pour pouvoir envisager une application embarquée.

* * *

Dans ce chapitre, nous allons supposer le respect de l'hypothèse de la section IV.2.1.3, selon laquelle le véhicule cible se déplacerait à vitesse constante tout au long de la manœuvre. Cela n'est en général pas le cas (voire par exemple [28] ou certaines de nos figures du chapitre II.3), mais cette hypothèse simplifie quelque peu les calculs et s'adapte bien aux informations pouvant être mesurées par des capteurs industriels. Les résultats de cette section nous serviront de référence du *potentiel de gain du scénario étudié*. Dans les chapitres suivants nous étudieront l'effet de la variation de la vitesse sur le potentiel de gain de la fonction, sur le même scénario.

En supposant une vitesse constante du véhicule cible tout au long de la manœuvre, nous allons « reconstruire » les paramètres initiaux qui auraient été mesurés. Pour ce faire, nous partirons des mesures finales des capteurs, en particulier de l'inter-distance, ΔX_f , la vitesse relative, ΔV_f , les vitesses initiale du véhicule hôte, V_0^h , et finale de la cible, V_f^c , ainsi que le signal d'accélération issue de l'odométrie, $a_{mes}^h [t_i]$. Ce dernier résulte de la méthode présentée dans la section II.3.1.1.5 et a donc été ré-échantillonné à un pas de temps constant, τ_e . Comme il s'agit d'un signal discret, il peut être représenté par le vecteur \mathbf{a}_{mes}^h .

Comme indiqué précédemment, à la fin de la manœuvre il restait un léger écart de vitesse entre les véhicules. Afin de tester l'algorithme dans les *conditions idéales*, nous avons multiplié le signal d'accélération d'un facteur, α_{cor} , permettant de garantir que la vitesse finale du véhicule hôte soit identique à celle de la cible, $V_f^h = V_f^c$, sans déformer la topologie de la manœuvre. Le profil d'accélération corrigé, $\mathbf{a}_{cor}^h \in \mathbb{R}^{n_s}$, peut être obtenu en utilisant (2.54), qui est basée sur une intégration à partir de la méthode *Euler explicite (vers l'avant)*⁶. Pour le scénario étudié, nous avons trouvé $\alpha_{cor} = 1.3781$.

$$a_{cor}^h [i] \approx \alpha_{cor} a_{mes}^h [i] = \left(\frac{V_f^c - V_0^h}{\tau_e \sum_{k=1}^{n_s} a_{mes}^h [k]} \right) a_{mes}^h [i] \quad (2.54)$$

6. *Explicit Forward Euler Method*, en anglais.

* * *

Pour la détermination des paramètres cinématiques en début de la manœuvre, dans les conditions idéales, nous partirons de la mesure d'inter-distance finale, ΔX_f . Ensuite, nous calculerons la distance parcourue par le véhicule hôte pendant la manœuvre, ΔX^h , ce qui demande d'abord d'obtenir un signal de vitesse corrigé, $a_{cor}^h [i]$, en appliquant (2.55). Cette équation emploie, une fois de plus, la méthode d'Euler explicite.

$$V_{cor}^h [i] = V_0^h + \tau_e \sum_{k=1}^{i-1} a_{cor}^h [k] = V_0^h + \alpha_{cor} \tau_e \sum_{k=1}^{i-1} a_{mes}^h [k] \quad (2.55)$$

En intégrant le signal de vitesse⁷, et en prenant $X_0^h = 0$, nous obtenons la distance parcourue par le véhicule hôte, pour chaque indice i , comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta X_{cor}^h [i] &= \sum_{j=1}^i V_{cor}^h [j-1] \tau_e \\ &= \sum_{j=1}^i \left(V_0^h + \alpha_{cor} \tau_e \sum_{k=1}^{j-1} a_{mes}^h [k] \right) \tau_e \\ &= i V_0^h \tau_e + \alpha_{cor} \tau_e^2 \sum_{k=1}^{i-1} (i-k) a_{mes}^h [k] \end{aligned} \quad (2.56)$$

A présent, pour trouver la distance parcourue par le véhicule hôte à la fin de la manœuvre, ΔX^h , il suffit d'appliquer à la formule précédente l'indice $i = n_s$, ce qui permet d'obtenir (2.57). Nous avons trouvé $\Delta X^h = 215.0765$ m.

$$\Delta X^h = \Delta X_{cor}^h [n_s] = n_s V_0^h \tau_e + \alpha_{cor} \tau_e^2 \sum_{k=1}^{n_s-1} (n_s - k) a_{mes}^h [k] \quad (2.57)$$

Nous allons désormais calculer la distance parcourue par la cible, ΔX^t . Profitant de l'hypothèse de vitesse constante, il suffit de multiplier V_f^c par la durée totale de la manœuvre t_f , comme montré par (2.58). Nous obtenons $\Delta X^c = 210.1661$ m.

$$\Delta X^c = V_f^c t_f = V_f^c n_s \tau_e \quad (2.58)$$

Finalement, comme illustré par la Figure 2.2, l'inter-distance initiale ΔX_0 , qui aurait été mesurée par le capteur est donnée par (2.59).

$$\Delta X_0 = \Delta X^h + \Delta X_f - \Delta X^c \quad (2.59)$$

Nous avons trouvé $\Delta X_0 = 24.54$ m, ce qui est relativement proche de la mesure réelle du capteur. Cela suggère que, pour le cas étudié, l'hypothèse de vitesse constante du véhicule cible est pertinente.

* * *

Pour déterminer des limites d'inter-distance, $\Delta \check{X}_{mnv}$ et $\Delta \hat{X}_{mnv}$, nous partirons de l'inter-distance mesurée à la fin de la manœuvre réelle, ΔX_f et nous définirons un *couloir admissible* en ajoutant une tolérance positive, $\delta \hat{x}_{lim}$, et une négative, $\delta \check{x}_{lim}$. Ainsi, nous pouvons

7. Cette fois-ci, nous avons utilisée la méthode *Euler explicite vers l'arrière*, en cherchant à compenser les imprécisions introduites par l'utilisation de la méthode *vers l'avant* précédemment. Pour que la notation ait du sens, nous avons défini $V_{cor}^h [0] = V_0^h$.

définir $\Delta\check{X}_{mnv}$ et $\Delta\hat{X}_{mnv}$ grâce à (2.60) et (2.61). Nous allons prendre un couloir de longueur relativement conservatrices : $\delta\hat{x}_{lim} = 2.5m$ et $\delta\check{x}_{lim} = 2.5m$, nous permettant d'obtenir $\check{X}_{mnv} = 17.13m$ et $\hat{X}_{mnv} = 22.13m$. Ces distances peuvent sembler trop petites ; cependant, comme le conducteur a changé de voie juste à la fin de la manœuvre, sa voiture a fini par garder une inter-distance adéquate avec la nouvelle cible.

$$\Delta\check{X}_{mnv} = \Delta X_f - \delta\check{x}_{lim} \quad (2.60)$$

$$\Delta\hat{X}_{mnv} = \Delta X_f + \delta\hat{x}_{lim} \quad (2.61)$$

* * *

Pour clôturer cette section, nous discuterons de la détermination de plages de valeurs acceptables associées à l'agrément de conduite. Concernant les limites d'accélération, \check{a}_{mnv} et \hat{a}_{mnv} , nous avons décidé de partir des estimations d'*accélération stabilisée* issues de l'odométrie sur des scénarios réels de *décélérations*, en contexte extra-urbain (cf. section II.3.4.3) ; les signaux associés à l'odométrie ont été privilégiés car ils sont beaucoup moins sensibles à l'effet de la pente (cf. section II.3.2.2). Ainsi, pour la limite inférieure d'accélération, \check{a}_{mnv} , nous prendrons la *médiane* des observations, moins la *déviations autour de la médiane*, selon qu'il est montré sur (2.62). Nous avons obtenu donc $\check{a}_{mnv} = -1.8080m/s^2$. Pour la limite supérieure, nous avons tout simplement pris $\hat{a}_{mnv} = -0.3m/s^2$, valeur assez proche de la décélération du véhicule « en roue libre ».

$$\check{a}_{mnv} = \text{median}(a_{ex}) - DAM(a_{ex}) \quad (2.62)$$

Pour déterminer les seuils d'à-coup, nous avons préféré utiliser les signaux issus de l'accéléromètre, leur estimation étant plus fiable que celle due à l'odométrie. Dans le cas des scénarios de décélération, les valeurs limites \check{J}_{mnv} et \hat{J}_{mnv} ont été calculées grâce à (2.63) et (2.64), respectivement. Pour \check{J}_{mnv} , nous avons décidé de retenir la valeur maximale (c'est-à-dire, la plus petite valeur absolue) entre l'à-coup des phases initiale et finale. L'utilisation du maximum peut sembler moins intuitive dans le cas de \hat{J}_{mnv} (on aurait pu s'attendre à voir un *min*) ; cependant, les conducteurs semblent peu sensibles aux faibles valeurs d'à-coup [147], et grâce au *max* on peut élargir légèrement la plage d'exploration de l'algorithme⁸. Nous avons donc $\check{J}_{mnv} = -1.12m/s^3$ et $\hat{J}_{mnv} = -0.48m/s^3$.

$$\check{J}_{mnv} = \max \{ \text{median}(J_1) - DAM(J_1), \text{median}(J_3) - DAM(J_3) \} \quad (2.63)$$

$$\hat{J}_{mnv} = \max \{ \text{median}(J_1) + DAM(J_1), \text{median}(J_3) + DAM(J_3) \} \quad (2.64)$$

En ce qui concerne les contraintes temporelles, associées à la *rapidité longitudinale* de la manœuvre (cf. [18], ou II.3.4.4), nous avons tout simplement imposé que la durée des trapèzes ne soit pas inférieure à la moitié de la durée du scénario réel, ni supérieure à 150% de sa valeur. Ainsi nous avons $\check{\tau}_{mnv} = 0.5(t_f - t_0) = 4.1s$ et $\hat{\tau}_{mnv} = 1.5(t_f - t_0) = 12.3s$.

8. En étant encore moins conservatifs, on pourrait considérer $\hat{J}_{mnv} = 0m/s^3$ pour des scénarios de décélération.

2.4 RÉSOLUTION HORS-LIGNE : ALGORITHME DE FORCE BRUTE

Objectif de la section

Présenter un algorithme, basé sur la méthode de Recherche exhaustive, permettant de résoudre le problème d'optimisation hors-ligne.

La résolution des problèmes présentés sur la section IV.2.2, n'est pas triviale. En particulier, la *non-convexité* des problèmes rend difficile de trouver leur minimum *global* dans un temps polynômial.

Si le temps de calcul n'était pas une contrainte, alors il serait possible d'utiliser d'autres méthodes pour déterminer la solution du problème. Dans cette section, nous proposerons une méthodologie basée sur une *recherche exhaustive*, appelée aussi *algorithme de force brute*, permettant de déterminer la manœuvre *quasi-optimale* minimisant la consommation de manière *globale*, tout en respectant les différentes contraintes. Ce choix est possible dans la mesure où le problème a un faible nombre de variables, et donc un coût de calcul absolu modéré. En outre, l'application de cette méthodologie permet de trouver *d'une seule traite* la solution de la plupart des problèmes de la section IV.2.2.

2.4.1 Domaine de recherche de l'algorithme

L'algorithme que nous proposons, utilise les contraintes de boîte sur l'accélération, et données par (2.36), et celles sur l'à-coup, exprimées par (2.39) et (2.40) pour définir le domaine de recherche du problème. Cela évite de passer du temps à étudier des manœuvres dont on sait à l'avance qu'elles ne seront pas acceptables pour le conducteur. Ainsi, les valeurs envisageables de ces grandeurs seront représentées par les vecteurs $\mathbf{J}_1^{\text{dm}} \in \mathbb{R}^{m_{J_1}}$, $\mathbf{J}_3^{\text{dm}} \in \mathbb{R}^{m_{J_3}}$ et $\mathbf{a}_{\text{ex}}^{\text{dm}} \in \mathbb{R}^{m_{a_{\text{ex}}}}$, définis par (2.65)-(2.67), où la fonction $f_{\text{Lin}}(\check{v}, \hat{v}, m)$ génère un vecteur de m points espacés linéairement, allant de \check{v} à \hat{v} . Par exemple, cette fonction est appelée *linspace* en Matlab [132].

$$\mathbf{J}_1^{\text{dm}} = f_{\text{Lin}}(\check{J}_{mnv}, \hat{J}_{mnv}, m_{J_1}) \quad (2.65)$$

$$\mathbf{J}_3^{\text{dm}} = f_{\text{Lin}}(\check{J}_{mnv}, \hat{J}_{mnv}, m_{J_3}) \quad (2.66)$$

$$\mathbf{a}_{\text{ex}}^{\text{dm}} = f_{\text{Lin}}(\check{a}_{mnv}, \hat{a}_{mnv}, m_a) \quad (2.67)$$

Pour des définitions mathématiques de f_{Lin} et des autres fonctions de génération de matrices et de vecteurs qui seront présentées par la suite, le lecteur est invité se référer à l'Annexe VI.

La proximité entre la solution obtenue en appliquant cette méthode et l'optimum global du problème d'optimisation dépend de la finesse du *maillage* des plages admissibles des paramètres. Si l'on désire améliorer la précision de la solution, il suffit d'augmenter la valeur de m_{J_1} , m_{J_3} et m_a ; en revanche, cela impliquera aussi une augmentation non-négligeable du temps de calcul.

2.4.2 Définition des fonctions utilisées par l'algorithme

Ci-dessous, nous définirons certaines fonctions nécessaires à l'exécution de l'algorithme d'optimisation. Les équations suivantes sont basées sur les formulations de la section IV.2.1.

Le lecteur aura peut-être réalisé que le domaine de recherche de l'algorithme définit uniquement les valeurs des trois des paramètres du trapèze d'accélération, laissant τ_2 « de côté ». Ce choix est justifié par l'existence d'une contrainte d'égalité, définie sur (2.17), et permettant de garantir le respect de la vitesse finale. En utilisant cette condition, il est possible de définir une fonction $g_v(J_1, J_3, a_{ex})$ permettant de calculer τ_2 , et définie comme suit :

$$\tau_2 = g_v(J_1, J_3, a_{ex}) = \left[\Delta V^h - \frac{a_0^2}{2J_1} \right] \frac{1}{a_{ex}} - \frac{1}{2} \left(\frac{J_1 + J_3}{J_1 J_3} \right) a_{ex} \quad (2.68)$$

En utilisant cette équation, nous pouvons réduire le problème d'une dimension, ce qui amoindri considérablement le temps de calcul.

* * *

Ensuite, $h_{\Delta X^h}(J_1, J_3, a_{ex}, \tau_2)$ permet de déterminer la distance parcourue, ΔX^h , en appliquant un profil d'accélération associé à un certain jeu de paramètres. Cette fonction est définie par (2.69).

$$\begin{aligned} \Delta X^h &= h_{\Delta X^h}(J_1, J_3, a_{ex}, \tau_2) \\ &= X_0^h + \left(\frac{a_{ex} - a_0}{J_1} \right) \left[V_0^h + \frac{a_0(a_{ex} - a_0)}{6J_1} + \left(\frac{a_{ex} + a_0}{2} \right) \left(\frac{a_{ex} - a_0}{3J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \right] \\ &\quad + \left[V_0^h + \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \right] \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) - \frac{a_{ex}^3}{6J_3^2} \end{aligned} \quad (2.69)$$

* * *

Finalement, la fonction $h_{\Delta X_f}(J_1, J_3, a_{ex}, \tau_2)$ est définie par (2.70) et permet de calculer l'inter-distance entre les deux véhicules à la fin de la manœuvre, en supposant que la cible se déplace à vitesse constante. Elle est juste la transcription de (2.22), en faisant apparaître les paramètres du trapèze comme variables.

$$\begin{aligned} \Delta X_f &= h_{\Delta X_f}(J_1, J_3, a_{ex}, \tau_2) \\ &= \Delta X_0 + \left(\frac{a_{ex} - a_0}{J_1} \right) \left[\Delta V_0 - \frac{a_0(a_{ex} - a_0)}{6J_1} - \left(\frac{a_{ex} + a_0}{2} \right) \left(\frac{a_{ex} - a_0}{3J_1} + \tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \right] \\ &\quad + \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \left[\Delta V_0 - \frac{a_{ex}}{2} \left(\tau_2 + \frac{a_{ex}}{J_3} \right) \right] + \frac{a_{ex}^3}{6J_3^2} \end{aligned} \quad (2.70)$$

2.4.3 Initialisation de l'algorithme

Les variables devant être déclarées et initialisées au début, sont présentées dans l'Algorithme 5. En plus de la définition du domaine de recherche, il est nécessaire de déclarer des variables auxiliaires (ΔX^r et δX_f), des matrices pour stocker la consommation associée aux différentes manœuvres (E_{mnv} , E_{fin} et E_{mnv}^{corr}), d'autres pour garder des variables cinématiques (ΔX^h et ΔX_f) ou temporelles (T_2 et T_{mnv}) résultantes, et d'autres matrices

de variables Booléennes pour indiquer le respect de l'agrément, B_{fs} , et de la faisabilité, B_{agr} . De plus, en calculant la puissance consommée pour maintenir le véhicule à la vitesse finale P_f , puis de l'énergie consommée par mètre parcouru E_{dist} , nous préparons le calcul de la consommation pendant la phase finale à vitesse stabilisée, comme présenté sur la section IV.2.2.4.

Certaines fonctions permettent l'initialisation des différentes matrices. D'une part, la fonction $Nan_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ génère une matrice de taille $m_{J_1} \times m_{J_3} \times m_a$, dont chaque élément correspond à la valeur NaN (*Not a Number*, « ce n'est pas un nombre ») pour des calculs en virgule flottante⁹, définie par le standard IEEE 754-2008 [1]. La fonction $Zero_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ permet de générer une matrice de zéros de la même taille. Finalement, $False_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ produit un matrice booléenne de taille $m_{J_1} \times m_{J_3} \times m_a$ contenant dans chaque case la valeur False (« faux »). Ces fonctions sont formellement définies dans l'Annexe VI.

Algorithme 5 : Initialisation de l'algorithme de force brute

1 Début initialisation

```

/* Domaine de recherche */
2 A-coup phase initiale:  $\mathbf{J}_1^{dm} = f_{Lin}(\check{J}_{mnv}, \hat{J}_{mnv}, m_{J_1})$ 
3 A-coup phase finale:  $\mathbf{J}_3^{dm} = f_{Lin}(\check{J}_{mnv}, \hat{J}_{mnv}, m_{J_3})$ 
4 Accélération phase stabilisée:  $\mathbf{a}_{ex}^{dm} = f_{Lin}(\check{a}_{mnv}, \hat{a}_{mnv}, m_a)$ 
/* Initialisation des structures de données */
5 Distance de référence:  $\Delta X^r = 0$ 
6 Distance à parcourir pendant la phase finale:  $\delta X_f = 0$ 
7 Consommation d'énergie de la manœuvre:  $E_{mnv} = Nan_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
8 Consommation d'énergie de la phase finale:  $E_{fin} = Nan_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
9 Consommation d'énergie totale (corrigée):  $E_{mnv}^{corr} = Nan_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
10 Consommation d'énergie totale corrigée, agrément respecté:  $\tilde{E}_{mnv}^{corr} = Nan_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
11 Distance parcourue par manœuvre:  $\Delta X^h = Zero_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
12 Inter-distance finale:  $\Delta X_f = Zero_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
13 Durée phase stabilisée:  $T_2 = Zero_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
14 Durée phase stabilisée:  $T_{mnv} = Zero_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
15 Flag de faisabilité:  $B_{fs} = False_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
16 Flag d'agrément:  $B_{agr} = False_{mat}(m_{J_1}, m_{J_3}, m_a)$ 
/* Calculs préliminaires */
17 Puissance à vitesse finale:  $P_f = P_{fin}(V_f^h)$ 
18 Consommation par unité de distance:  $E_{dist} = \frac{P_f}{V_f^h}$ 

```

19 Fin

2.4.4 Calcul de la consommation par Force brute

Suite à l'initialisation, on procède à l'application des étapes présentées sur la Figure 2.3, à chaque combinaison possible de $J_1^{it} = J_1[i]$, $J_3^{it} = J_3[j]$ et $a_{ex}^{it} = a_{ex}[k]$. L'algorithme

9. Pour être plus rigoureux, il faudrait définir les différentes variables, non pas par rapport à \mathbb{R} , mais par rapport à $\{\mathbb{R} \cup NaN\}$. Pour être encore plus strict, il faudrait définir toutes les variables comme appartenant à des ensembles basés sur la représentation en virgule flottante du Standard IEEE 754-2008 [1]. Néanmoins, cette notation ne changerait pas grand-chose à l'idée centrale de l'algorithme et, en revanche, alourdirait considérablement les équations.

présente une série de vérifications permettant de réduire le coût, en évitant des calculs inutiles. Cette première partie du code permet de remplir les structures de données avec les informations associées à toutes les combinaisons possibles des paramètres.

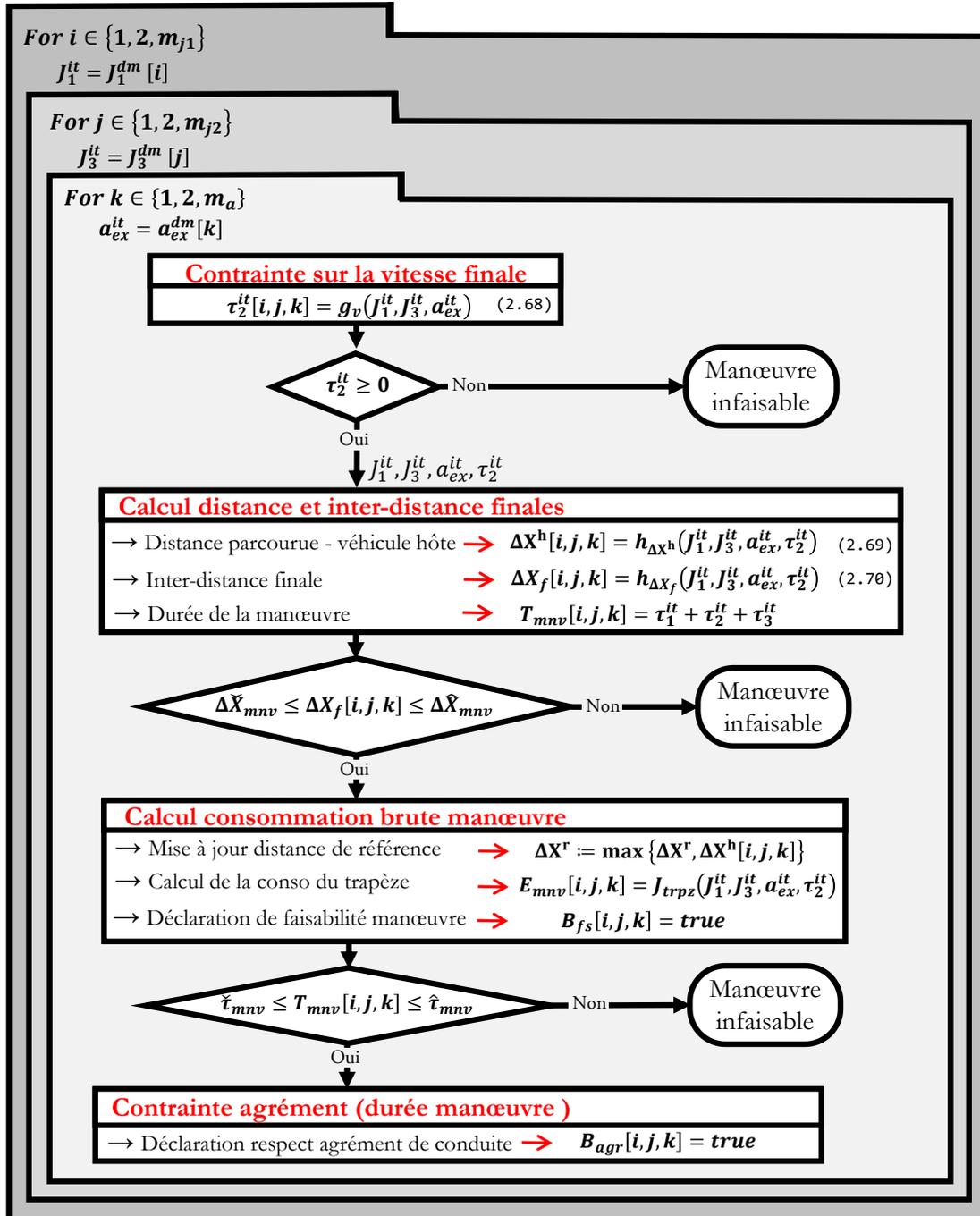


FIG. 2.3 – Noyau de l'algorithme d'optimisation des manœuvres trapézoïdales de type force brute - remplissage des structures de données

Tel qu'il a été dit précédemment, nous déterminons d'abord la durée de la phase stabilisée τ_2^{it} , en utilisant (2.68). Ensuite, pour vérifier la faisabilité de la manœuvre, on teste si $\tau_2^{it} \geq 0$; si ce n'était pas le cas, alors cela voudrait dire qu'il n'est pas possible d'atteindre la vitesse souhaitée, par un trapèze ayant J_1^{it} , J_3^{it} et a_{ex}^{it} comme paramètres. Dans

ce cas, on arrête le calcul et on passe au jeu de paramètres suivant ; grâce à l'initialisation, la case correspondante dans la matrice de faisabilité aura sa valeur par défaut, $E_{fs}[i, j, k] = \text{False}$. Cette façon de faire évite de devoir calculer la fonction coût pour des jeux de paramètres qui ne sont pas faisables, réduisant ainsi considérablement le coût de calcul de l'algorithme.

Ensuite, on calcule la distance parcourue $\Delta X^h[i, j, k]$, grâce à (2.69), l'inter-distance finale ΔX_f , avec (2.70), et la durée totale de la manœuvre $T_{mnv}[i, j, k] = t_f = \tau_1^{it} + \tau_2^{it} + \tau_3^{it}$. Il est désormais possible de vérifier le respect de la contrainte sur l'inter-distance finale, $\Delta \check{X}_{mnv} \leq \Delta X_f[i, j, k] \leq \Delta \hat{X}_{mnv}$, comme montré sur (2.26). Si c'est le cas, on continue le calcul ; dans le cas contraire, on passe à l'itération suivante (en laissant donc $E_{fs}[i, j, k] = \text{False}$).

Si les conditions précédentes sont respectées, nous pouvons considérer que la manœuvre est *faisable*, et l'indiquer en faisant $E_{fs}[i, j, k] = \text{True}$. Ensuite, on peut obtenir la consommation de la manœuvre en appliquant $E_{mnv}[i, j, k] = \check{E}_{mnv}(J_1^{it}, J_3^{it}, a_{ex}^{it}, \tau_2^{it})$, où la fonction \check{E}_{mnv} peut être issue de la modélisation analytique ou physique de la section III.1.2.

Pour déterminer la distance de référence, ΔX^r , définie comme le plus long déplacement réalisable grâce à une manœuvre *faisable*, on compare $\Delta X^h[i, j, k]$ avec la valeur actuelle de ΔX^r , et on remplace cette dernière par le maximum entre les deux valeurs. A la fin la dernière itération, la valeur de ΔX^r correspondra bien à la définition de la *distance de référence*.

Après, on vérifie que la durée totale de la manœuvre rentre dans la plage acceptable (cf. section IV.2.1.4), $\check{\tau}_{mnv} \leq T_{mnv}[i, j, k] \leq \hat{\tau}_{mnv}$. Si la durée n'est pas respectée, on considère la manœuvre comme infaisable et on passe à l'itération suivante. En revanche, si cette condition est validée, alors le trapèze respecte tous les critères d'agrément et on peut donc considérer que la manœuvre sera acceptable pour le conducteur.

Pour accélérer d'avantage l'algorithme, il est possible de faire en sorte que la vérification des contraintes sur la durée de la manœuvre soit faite en amont du calcul de la consommation de la manœuvre. Toutefois, en utilisant la méthode présentée sur cette section, nous pourrions étudier l'impact de la contrainte temporelle sur le potentiel de gain énergétique.

* * *

Une fois que ces étapes ont été réalisées pour toutes les combinaisons de paramètres, on doit exécuter des nouvelles boucles *for*, illustrées par la Figure 2.4. Celles-ci permettent de calculer la *consommation corrigée*, E_{mnv}^{corr} , basée sur la distance de référence (cf. section IV.2.2.4), ΔX^r , obtenue à l'issue des opérations précédentes.

* * *

Finalement, il est possible de générer une matrice \tilde{E}_{mnv}^{corr} , pour laquelle la consommation devient *NaN* pour les manœuvres qui ne respectent pas *toutes* les contraintes d'agrément. Pour ce faire, il suffit d'appliquer l'équation (2.71), reprenant la notation de *Matlab*, selon laquelle les affectations sont faites uniquement pour les éléments correspondant aux va-

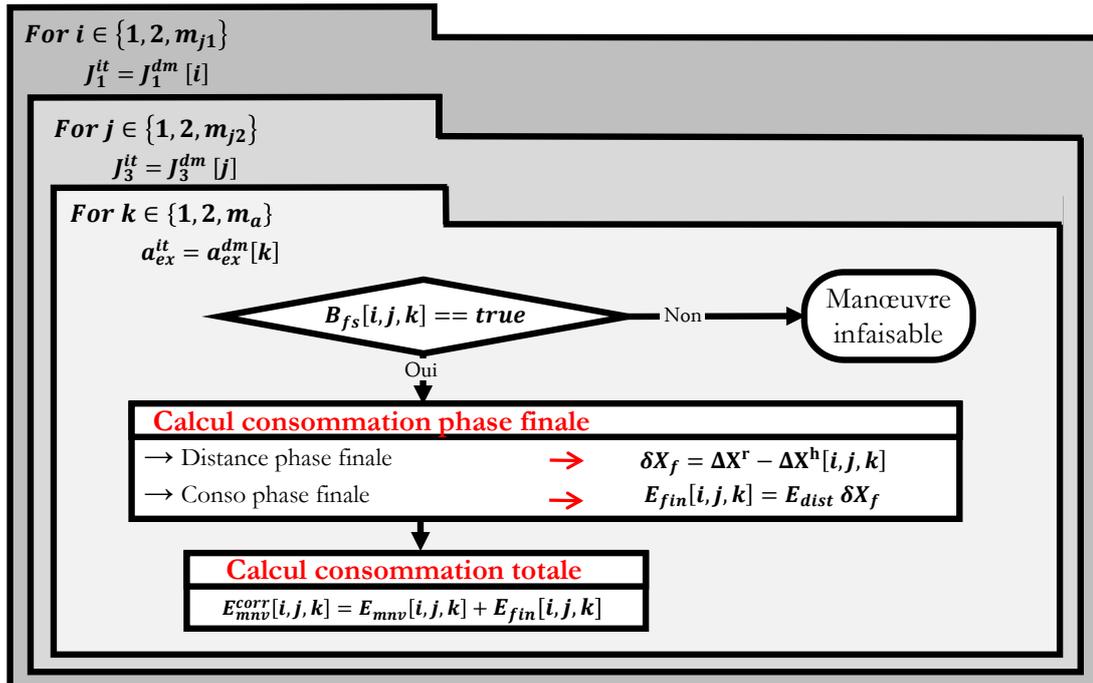


FIG. 2.4 – Noyau de l'algorithme d'optimisation des manœuvres trapézoïdales de type force brute - calcul de la consommation corrigée, E_{mnv}^{corr}

leurs vraies de B_{agr} (c'est-à-dire, les combinaisons de paramètres respectant l'agrément); dans tous les autres cas, la valeur de \tilde{E}_{mnv}^{corr} , qui reste inchangée, vaut donc NaN .

$$\tilde{E}_{mnv}^{corr}(B_{agr}) = E_{mnv}^{corr}(B_{agr}) \quad (2.71)$$

2.4.5 Résolution des problèmes d'optimisation

A présent, nous expliquerons comment obtenir les solutions aux problèmes de la section IV.2.2, à partir des structures de données obtenues en appliquant l'algorithme proposé. Dans les équations qui suivent, \check{E}_{mnv}^{corr} correspondra à \tilde{E}_{mnv}^{corr} si l'on souhaite prendre en compte la contrainte sur le temps de manœuvre et à E_{mnv}^{corr} dans le cas contraire. On pourrait également utiliser E_{mnv} , si l'on souhaitait obtenir la solution au problème sans appliquer la correction d'iso-distance parcourue.

2.4.5.1 Problèmes à trapèzes asymétriques

Dans un premier temps, nous nous intéresserons au problème général (2.47), en appliquant la correction sur la distance parcourue. Sur ces problèmes, les valeurs d'à-coup des phases initiale et finale de la manœuvre, J_1 et J_3 respectivement, sont indépendantes. Pour déterminer la manœuvre optimale, il suffit de résoudre (2.72), qui permet de déterminer les indices des paramètres optimaux dans les structures de données utilisées. Pour ne pas considérer la correction d'iso-distance, il suffit de remplacer \check{E}_{mnv}^{corr} par \check{E}_{mnv} dans l'équation.

$$\begin{aligned}
[i^*, j^*, k^*] = & \operatorname{argmin} \left\{ e_{val} \mid e_{val} = \check{E}_{mnv}^{corr} [i, j, k] \wedge B_{fs} [i, j, k] = \text{True} \right\} & (2.72) \\
& i \in \{1, \dots, m_{J_1}\} \\
& j \in \{1, \dots, m_{J_3}\} \\
& k \in \{1, \dots, m_a\}
\end{aligned}$$

Ensuite, pour déterminer les paramètres du trapèze optimal, il suffit d'appliquer (2.73)-(2.76).

$$J_1^* = \underline{J}_1^{\text{dm}} [i^*] \quad (2.73)$$

$$J_3^* = \underline{J}_3^{\text{dm}} [i^*] \quad (2.74)$$

$$a_{ex}^* = \underline{a}_{ex}^{\text{dm}} [i^*] \quad (2.75)$$

$$\tau_2^* = T_2 [i^*, j^*, k^*] \quad (2.76)$$

2.4.5.2 Problèmes à trapèzes symétriques

Pour résoudre le problème à trapèze symétrique (2.48), ainsi que son analogue avec correction de distance, nous supposons l'existence de valeurs communes entre $\underline{J}_1^{\text{dm}}$ et $\underline{J}_3^{\text{dm}}$. Dans ce cas, on peut définir deux ensembles \mathcal{I}_{sym} et \mathcal{J}_{sym} par (2.77) et (2.78), respectivement. \mathcal{I}_{sym} contient tous les indices du vecteur $\underline{J}_1^{\text{dm}}$ qui ont un équivalent dans le vecteur $\underline{J}_3^{\text{dm}}$, et vice-versa.

$$\mathcal{I}_{sym} = \left\{ i \mid \exists j \in \{1, \dots, m_{J_3}\}, \underline{J}_1^{\text{dm}} [i] = \underline{J}_3^{\text{dm}} [j] \right\} \quad (2.77)$$

$$\mathcal{J}_{sym} = \left\{ j \mid \exists i \in \{1, \dots, m_{J_1}\}, \underline{J}_3^{\text{dm}} [j] = \underline{J}_1^{\text{dm}} [i] \right\} \quad (2.78)$$

Dans ce cas, il est possible de définir une fonction *SymMap* qui associe à chaque indice $i \in \mathcal{I}_{sym}$ son équivalent dans \mathcal{J}_{sym} . Cela est montré par (2.79). Par exemple, dans le cas où $m_{J_1} = m_{J_3}$, c'est-à-dire, où les deux vecteurs sont identiques, nous avons $j = \text{SymMap}(i) = i$.

$$\begin{aligned}
\text{SymMap} : \mathcal{I}_{sym} & \rightarrow \mathcal{J}_{sym} \\
i & \mapsto j = \text{SymMap}(i) \quad | \quad \underline{J}_1^{\text{dm}} [i] = \underline{J}_3^{\text{dm}} [j]
\end{aligned} \quad (2.79)$$

Les problèmes à manœuvre symétrique peuvent alors être résolus comme :

$$\begin{aligned}
[i^*, k^*] = & \operatorname{argmin} \left\{ e_{val} \mid \begin{array}{l} e_{val} = \check{E}_{mnv}^{corr} [i, \text{SymMap}(i), k] \\ \wedge B_{fs} [i, \text{SymMap}(i), k] = \text{True} \end{array} \right\} & (2.80) \\
& i \in \mathcal{I}_{sym} \\
& k \in \{1, \dots, m_a\}
\end{aligned}$$

$$j^* = \text{SymMap}(i^*) \quad (2.81)$$

2.4.5.3 Problèmes avec à-coup défini à l'avance

Finalement, pour résoudre les problèmes où les valeurs d'à-coup sont fixées à $J_1 = J_1^{fx}$ et $J_3 = J_3^{fx}$, il suffit de résoudre le jeu d'équations (2.82)-(2.84).

$$[k^*] = \operatorname{argmin}_{k \in \{1, \dots, m_a\}} \left\{ e_{val} \mid e_{val} = \check{E}_{mnv}^{corr} [i^{fx}, j^{fx}, k] \wedge B_{fs} [i^{fx}, j^{fx}, k] = \text{True} \right\} \quad (2.82)$$

$$i^{fx} = \operatorname{argmin}_{i \in \{1, \dots, m_{J_1}\}} \left\{ \left| \mathbf{J}_1^{\text{dm}} [i] - J_1^{fx} \right| \right\} \quad (2.83)$$

$$j^{fx} = \operatorname{argmin}_{j \in \{1, \dots, m_{J_3}\}} \left\{ \left| \mathbf{J}_3^{\text{dm}} [j] - J_3^{fx} \right| \right\} \quad (2.84)$$

2.5 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION

Objectif de la section

Présenter les résultats de la solution quasi-optimale au problème d'écoconduite.

Nous allons désormais montrer les résultats de l'algorithme de *force brute* pour la résolution du problème d'écoconduite du scénario que nous étudions. Nous étudierons l'application de la modélisation physique et de la modélisation analytique pour obtenir la fonction de consommation globale de la manœuvre, $\check{E}_{mnv}^{corr} (J_1^{it}, J_3^{it}, a_{ex}^{it}, \tau_2^{it})$. Pour chaque type de modèle, trois types de problèmes seront traités : optimisation des *manœuvres à trapèzes asymétriques* (à-coups initial et final libres), avec des *manœuvres à trapèzes symétriques* et le problème où l'à-coup est fixé à l'avance. Comme nous l'avons dit, après avoir exécuté les calculs de la section IV.2.4.4, les trois problèmes peuvent être résolus avec peu d'effort.

2.5.1 Problème à trapèzes asymétriques (à-coups initiale et finale libres)

En partant des structures de données issues de l'algorithme présenté sur la section IV.2.4.4, nous avons calculé les valeurs des paramètres de la manœuvre optimale, J_1^* , J_3^* , a_{ex}^* et τ_2^* , grâce aux équations (2.72)-(2.76). Nous présenterons d'abord les résultats obtenus en appliquant le modèle physique, puis ceux issus de l'analytique.

2.5.1.1 Modèle physique

La Figure 2.5 représente les consommations issues de l'application du modèle physique de consommation des manœuvres (cf. section III.1.2.2), avant et après la prise en compte de la contrainte sur la durée de la manœuvre, E_{mnv}^{corr} (Fig. 2.5a) et \tilde{E}_{mnv}^{corr} (Fig. 2.5b), respectivement. A chaque itération, nous avons généré un profil trapézoïdal d'après les équations (2.5), (2.7), (2.9) et (2.11), en utilisant comme paramètres J_1^{it} , J_3^{it} , a_{ex}^{it} et τ_2^{it} . Ensuite, nous avons utilisé cette accélération comme entrée d'un modèle *physique* codé

sur Simulink. Puis, en intégrant le signal de puissance de la batterie, P_{bat} , nous obtenons la consommation d'énergie issue du trapèze, laquelle est stockée dans $E_{mnv}[i, j, k]$, i, j et k étant les indices de l'itération. Pour la simulation nous avons utilisé $m_{J_1} = m_{J_3} = m_a = 30$, représentant 27 000 itérations de l'algorithme¹⁰.

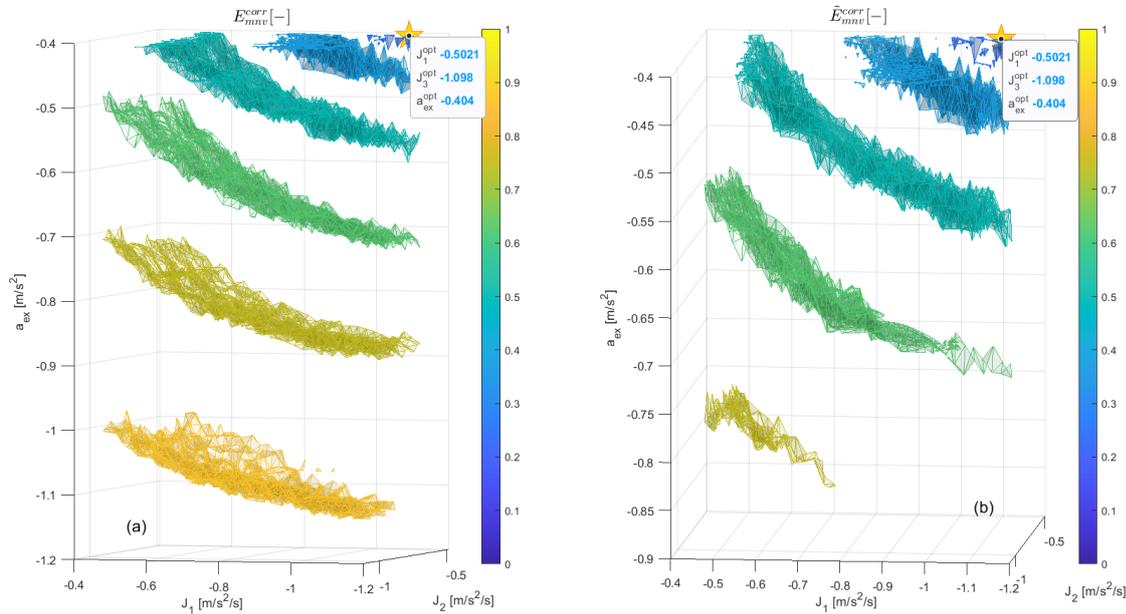


FIG. 2.5 – Consommation de la manœuvre en fonction des paramètres d'optimisation pour des manœuvres asymétriques, en utilisant le modèle physique et les conditions issue d'un scénario réel (a) Résultats sans la contrainte sur la durée de la manœuvre, E_{mnv}^{corr} ; (b) Résultats après l'application de la contrainte sur la durée de la manœuvre, \tilde{E}_{mnv}^{corr} . L'étoile indique les paramètres optimaux de chaque cas.

Sur les courbes, chaque « couche » d'une même couleur représente une *iso-surface* de la fonction d'optimisation, pour laquelle la consommation globale a une même valeur; la barre des couleurs permet d'associer chaque surface à une valeur de consommation, en unités normalisées. Les deux figures utilisent la même convention de couleurs afin de simplifier les comparaisons. Ainsi, plus une surface tend vers les bleus, plus la consommation est faible. L'étoile indique le jeu des paramètres *acceptables* qui minimisent la dépense énergétique.

Nous constatons qu'une part importante du domaine d'optimisation s'est réduite à cause de l'application de la contrainte sur le temps de manœuvre; en particulier, un nombre important de possibilités a été éliminé à cause de leur faible durée. En revanche, nous constatons que cela n'a pas eu de conséquence sur la manœuvre optimale, qui reste la même dans les deux cas. Il n'y a donc pas eu de réduction du potentiel de gain à cause des contraintes temporelles, pour le scénario considéré.

Aussi, nous pouvons observer que les iso-surfaces de consommation semblent avoir des formes *grossièrement régulières*, laissant penser que les *ensembles des sous-niveaux*¹¹ de E_{mnv}^{corr} soient à *peu près convexes*. Cela suggère la possibilité que la fonction coût issue du

10. En revanche, grâce à l'algorithme proposé, le nombre de simulations du modèle a probablement été bien inférieur au nombre d'itérations.

modèle physique soit *grossièrement convexe* ou, du moins, *grossièrement quasi-convexe* [22]. Cela pourrait simplifier la résolution du problème, par le biais des méthodes de programmation mathématique.

En outre, le paramètre permettant de séparer plus facilement deux iso-surfaces distinctes est l'accélération de la phase stabilisée, a_{ex} . Cela pourrait indiquer que c'est le paramètre ayant la plus forte influence sur l'efficacité énergétique d'une manœuvre trapézoïdale, l'à-coup des transitoires étant de moindre importance.

Les paramètres de la manœuvre optimale sont $J_1^* = -0.5021m/s^3$, $J_3^* = -1.098m/s^3$, $a_{ex}^* = -0.404m/s^2$ et $\tau_2^* = 5.1068s$, et la durée totale $\tau_{mnv} = 6.2794s$. Avant d'afficher le trapèze correspondant, nous allons nous intéresser aux résultats de l'optimisation utilisant le modèle analytique des manœuvres.

2.5.1.2 Modèle analytique

La Figure 2.6 représente la fonction de consommation totale corrigée issue du modèle analytique des manœuvres (cf. section III.1.2.3), sur le domaine *admissible* du problème d'optimisation. De même que pour le cas précédent, la Figure 2.6a correspond à l'énergie E_{mnv}^{corr} , sans tenir compte de la contrainte sur la durée de manœuvre, alors que sur la Figure 2.6b nous avons uniquement les valeurs \tilde{E}_{mnv}^{corr} , associées à des manœuvres respectant toutes les contraintes. Nous constatons que la contrainte temporelle n'est pas active dans la zone du point optimal, ce qui veut dire que, sur le scénario étudié, elle ne diminue pas le potentiel de gain.

Pour obtenir ces résultats, il a fallu choisir la valeur du paramètre c_ω , pour la pondération des zones pour l'approximation analytique de la cartographie de pertes dans la motorisation, présentée sur la section III.1.1.2.2. De manière assez remarquable, pour obtenir des résultats similaires à ceux associés au modèle physique, il a fallu prendre $c_\omega = 1$, c'est-à-dire, donner toute la priorité à la région de la cartographie représentative des *phases stabilisées* des manœuvres. Cela suggère que le comportement du véhicule pendant ces phases, aurait un impact sur l'efficacité énergétique bien plus important que celui des transitoires d'accélération.

Nous observons aussi une certaine déformation des iso-surfaces de consommation, même si globalement la fonction semble avoir le même comportement qu'avec le modèle physique. Toutefois, nous observons qu'une partie de la « convexité » des iso-surfaces a disparu. Ainsi, même si l'optimum est assez similaire entre les deux fonctions, l'utilisation « brute » d'algorithmes de descente de gradient pourrait conduire à des minimums locaux. En revanche, il est possible que ce ne soit pas le cas si, comme dans le cas présent, le minimum se trouve dans la frontière entre plusieurs contraintes. Dans ce cas, une fonction coût *grossière* et un algorithme adapté pourraient suffire pour avoir des résultats assez proches de l'optimum, potentiellement calculables en temps réel.

11. L'ensemble des sous-niveaux α d'une fonction $f : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ est défini par $C_\alpha = \{x \in \text{dom } f | f(x) \leq \alpha\}$. Les ensembles des sous-niveaux des fonctions convexes et quasi-convexes sont convexes [22].

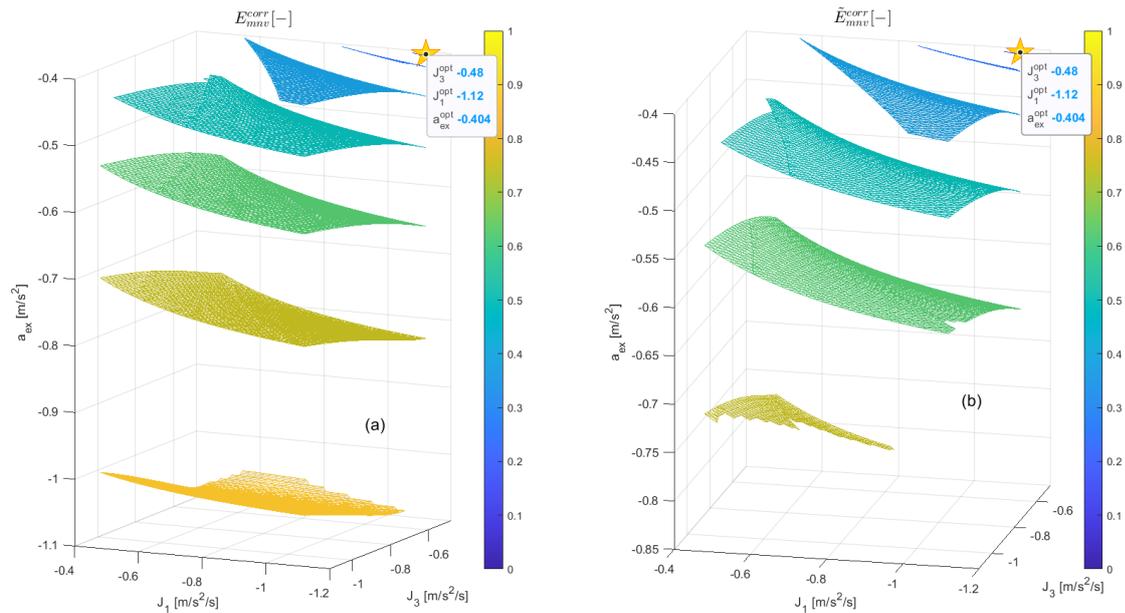


FIG. 2.6 – Consommation de la manœuvre en fonction des paramètres d’optimisation pour des manœuvres asymétriques, en utilisant le modèle analytique et les conditions issues d’un scénario réel (a) Résultats sans la contrainte sur la durée de la manœuvre, E_{mnv}^{corr} ; (b) Résultats après l’application de la contrainte sur la durée de la manœuvre, \tilde{E}_{mnv}^{corr} . L’étoile indique les paramètres optimaux de chaque cas.

2.5.1.3 Évaluation des résultats

Ci-dessous nous comparons les résultats de l’optimisation utilisant les modèles physique et analytique, avec la manœuvre réelle (outre les adaptations pour finir à la même vitesse que le véhicule cible). Pour faire des comparaisons justes, nous avons prolongé les trapèzes par des phases à vitesse stabilisée, afin d’avoir la même distance parcourue pour toutes les manœuvres. Ces résultats sont affichés sur la Figure 2.7.

Les Figures 2.7a, 2.7b et 2.7c présentent respectivement les profils d’accélération, vitesse et inter-distance. Nous remarquons que les manœuvres issues des deux optimisations sont presque identiques, suggérant que, avec le bon paramétrage des méthodes d’identification, la modélisation analytique proposée permet d’obtenir des résultats assez proches de ceux associés au modèle physique. Une perspective de nos travaux est l’étude de la robustesse de notre modèle analytique face sur d’autres scénarios de conduite.

Les points de fonctionnement du GMP, pour chaque manœuvre, sont présentés sur la Fig. 2.7d. Les points sur la cartographie nous offrent des informations permettant d’interpréter les résultats de l’optimisation : en ce qui concerne l’accélération pendant la phase stabilisée, a_{ex} , nous observons que l’algorithme n’a pas retenu la plus faible valeur admissible (représentée *approximativement* par le trait noir en pointillé, cf. section III.1.1.2.2) ; en revanche, la Fig. 2.7c, laisse penser qu’il a gardé la plus petite valeur de a_{ex} , respectant la contrainte sur l’inter-distance. Ce choix est probablement dû au fait que, plus la valeur de a_{ex} est petite, plus les pertes dans la motorisation sont faibles, tel que montré par la Fig. 2.7d. En outre, l’optimisation a rendu une valeur plutôt importante pour l’à-coup de la phase initiale, J_1 , et une faible valeur pour celui du transitoire final, J_3 .

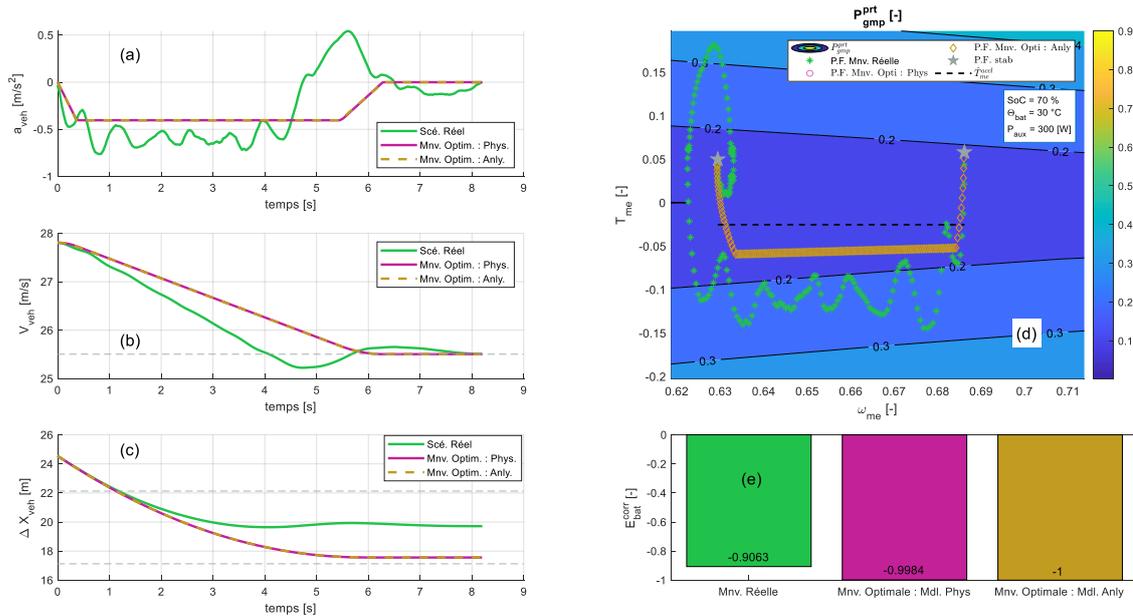


FIG. 2.7 – Évaluation des résultats : manœuvres asymétriques. (a) Accélération du véhicule; (b) vitesse; (c) inter-distance; (d) points de fonctionnement sur la cartographie du GMP (en unités normalisées); (e) consommation globale normalisée à iso-distance

En revanche, le fait que la manœuvre optimale se traduise par une faible inter-distance peut être problématique. En effet, plus on est prêt du véhicule précédent, moins on aura de temps après pour anticiper son comportement, ce qui réduira la *marge de manœuvre*, pour le scénario suivant. Un levier pour pallier à cette situation est de, suite à l'exécution de la manœuvre optimale, augmenter subtilement l'écart de distance entre les deux véhicules, en utilisant une décélération inférieure au seuil de perception du conducteur. Grâce à la faible valeur de décélération, on pourrait rétablir une distance plus importante, sans déranger le conducteur, tout en limitant les pertes d'énergie. Une autre possibilité consiste à utiliser des valeurs limites d'inter-distance assez conservatrice; en revanche, cela pourrait réduire considérablement le potentiel de gain.

La Figure 2.7e compare la consommation des différentes manœuvres. Les valeurs (en unités normalisées) sont négatives car, à la fin de l'action, la quantité d'énergie dans la batterie a été plus importante qu'au début de la manœuvre. Afin de faire une comparaison juste, le modèle physique a servi pour calculer l'énergie associée à chaque profil d'accélération. En appliquant la manœuvre optimale issue du modèle physique, on a récupéré dans la batterie 14,61% d'énergie de plus que dans la situation réelle; en faisant de même avec les résultats associés au modèle analytique, 14,80% supplémentaires d'énergie sont rentrés dans la batterie. Ces résultats peuvent surprendre car on se serait naturellement attendu à avoir des gains supérieurs à partir de la modélisation physique, plus proche de la réalité, qu'en utilisant le modèle analytique qui n'est qu'une approximation de celle-ci; mais ce paradoxe s'explique par le fait que la distance de référence, $\Delta X'$, utilisée pour le calcul des gains (c-à-d, la distance parcourue dans le roulage réel) est beaucoup plus importante que celle utilisée dans l'algorithme d'optimisation (la distance

du trapèze permettant d'aller le plus loin)¹². Cela met en évidence la représentativité des résultats associés au modèle analytique et laisse penser que, à condition d'avoir la bonne calibration pour l'identification, ce modèle offre une piste pour réduire le temps de calcul, s'approchant d'une optimisation temps-réel. En outre, nous constatons que la consommation globale semble peu sensible à des variations dans les valeurs d'à-coup des phases transitoires.

Les pourcentages de gain sont assez importants, d'autant plus que, dans la situation observée, le conducteur semble avoir utilisé une conduite peu agressive. Il existe plusieurs sources potentielles à ces résultats remarquables : d'une part, grâce aux *trapèzes optimaux*, on atteint la bonne vitesse *au premier coup*, sans devoir enchaîner des accélérations et décélérations supplémentaires, avec des pertes plus ou moins importantes (cf. Fig. 2.7d) ; aussi, le niveau d'accélération est légèrement inférieur pour les manœuvres optimales, ce qui permet d'avoir des points de fonctionnement de la motorisation à moindres pertes, et d'utiliser l'énergie cinétique déjà stockée dans le véhicule pour le faire avancer. Finalement, on observe des oscillations dans l'accélération en situation réelle, se traduisant par des variations de couple sur la cartographie ; vu que les pertes dans la motorisation et la batterie semblent être convexes par rapport au couple (cf. section III.1.1.1), l'*Inégalité de Jensen* nous dit que le fait d'osciller autour d'une valeur engendre une consommation supplémentaire, par rapport au maintien de cette valeur [22]. En revanche, le gain associé à ce dernier phénomène, pourrait ne pas être atteignable dans la pratique, dans la mesure où les oscillations sont peut-être dues à des irrégularités de la route et à d'autres phénomènes externes.

2.5.2 Problème à trapèzes symétriques (à-coups initial et final identiques)

Nous allons à présent considérer le potentiel de gain des trapèzes d'accélération dont l'à-coup des phases initiale et finale sont identiques, c'est-à-dire, lorsque la contrainte (2.45) est appliquée, ce qui correspond au Problème (2.48), avec la correction d'iso-distance. Une fois de plus, nous allons considérer les résultats obtenus grâce au modèles physique et analytique.

2.5.2.1 Modèle physique

La Figure 2.8 montre les résultats de l'optimisation avec des trapèzes symétriques, obtenus en appliquant la méthode de la section IV.2.4.5.2. Nous observons, une fois de plus, que la contrainte sur la durée des manœuvres ne change pas la manœuvre optimale, correspondant à une faible accélération (la même que pour les manœuvres asymétriques) et une forte valeur d'à-coup. Plus exactement, les paramètres du trapèze optimal sont $J_s^* = -1,076m/s^3$, $a_{ex}^* = -0.404m/s^2$ et $\tau_2^* = 5.3176s$, et la durée totale $\tau_{mnv} = 6.0686s$. Même si la durée de la phase stabilisée s'est allongée, au global la manœuvre prend moins

12. Lorsqu'on utilise la même distance que pour l'algorithme d'optimisation, la consommation est inférieure avec la manœuvre issue du modèle physique, ce à quoi on pouvait s'attendre.

de temps du fait que le transitoire final est exécuté plus rapidement (en raison de l'à-coup plus important).

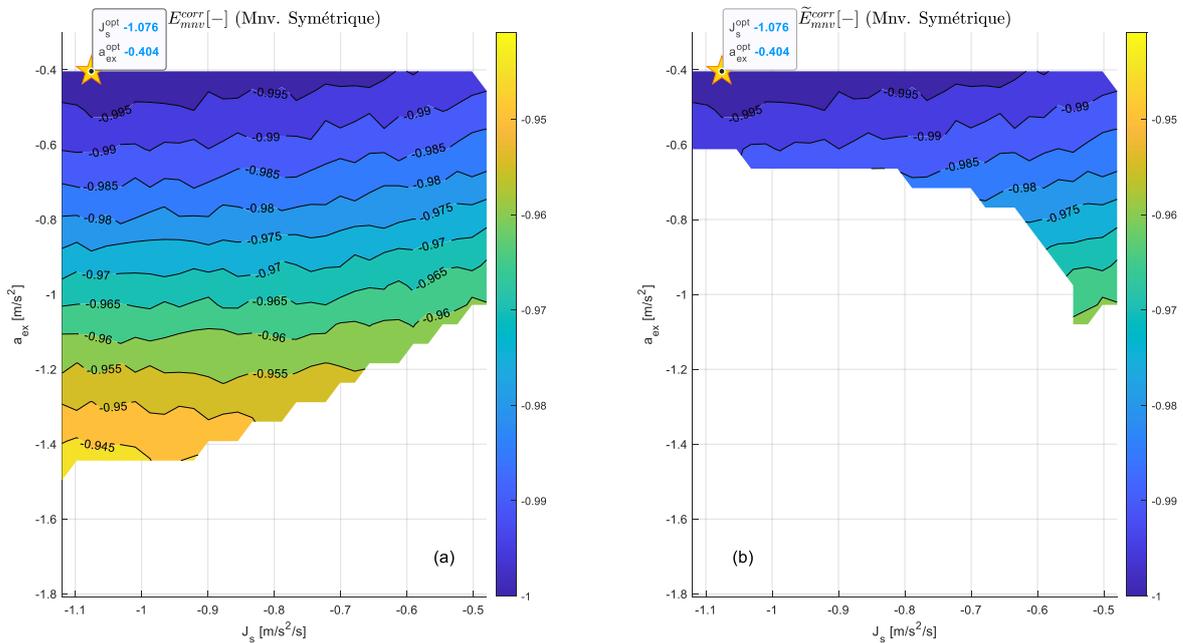


FIG. 2.8 – Résultats de l'algorithme d'optimisation pour des manœuvres symétriques, en utilisant le modèle physique et les conditions issue d'un scénario réel (a) Résultats sans la contrainte sur la durée de la manœuvre, E_{mnv}^{corr} ; (b) Résultats après l'application de la contrainte sur la durée de la manœuvre, \tilde{E}_{mnv}^{corr} . Les résultats ont été normalisés pour avoir une amplitude maximale égale à 1.

Les figures mettent également en évidence la faible sensibilité de la consommation à l'à-coup des phases transitoires. En effet, pour une valeur constante de a_{ex} , il y a très peu de variation sur la consommation pour les différentes valeurs de J_s .

2.5.2.2 Modèle analytique

Les résultats de l'optimisation issue du modèle analytique sont présentés sur la Figure 2.9. On peut voir que le modèle analytique n'est pas parfaitement représentatif de la modélisation physique; il réduit d'avantage la dépendance de la consommation globale à l'à-coup des phases transitoires. Néanmoins, la relation entre l'accélération de la phase stabilisée, a_{ex} , et la variation totale d'énergie dans la batterie, semble assez bien préservée. Les paramètres du profil optimal sont donc $J_s^* = -1.120m/s^3$, $a_{ex}^* = -0.404m/s^2$ et $\tau_2^* = 5.3324s$, pour une durée totale de $\tau_{mnv} = 6.0538s$. Ces résultats sont assez proches de ceux associés au modèle physique.

2.5.2.3 Évaluation des résultats

A présent, nous comparerons les résultats issus des deux modèles entre eux, ainsi qu'avec les résultats du problème d'optimisation où l'à-coup des phases initiale et finale a été laissé libre (en utilisant le modèle physique), et la manœuvre réelle. La Figure 2.10

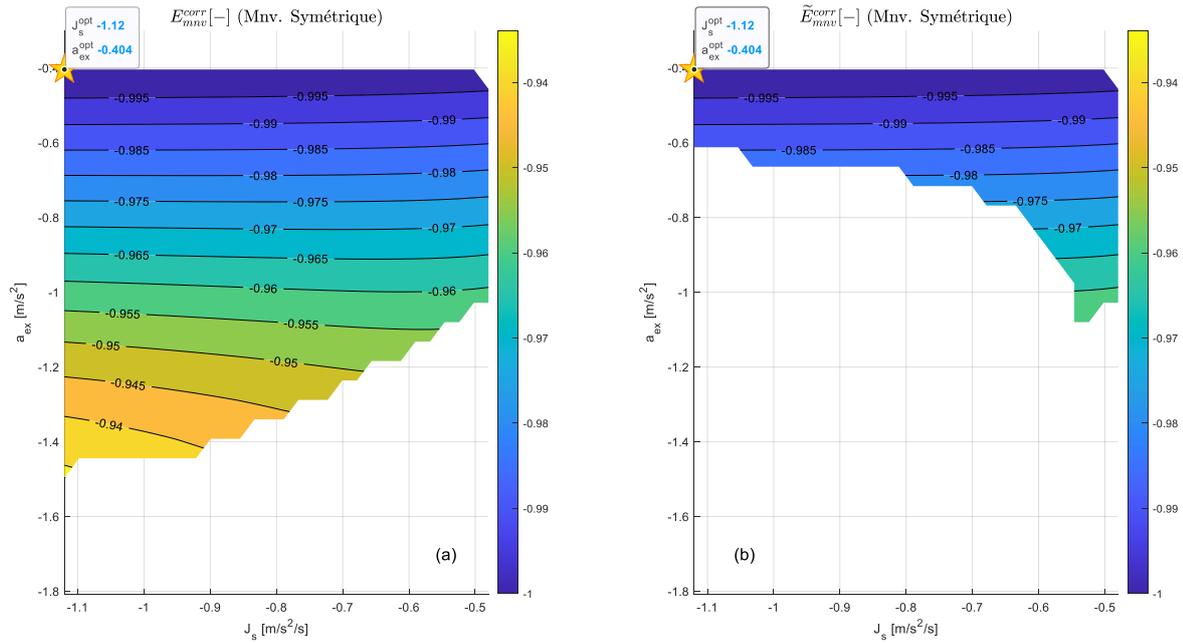


FIG. 2.9 – Résultats de l’algorithme d’optimisation pour des manœuvres symétriques, en utilisant le modèle analytique et les conditions issue d’un scénario réel (a) Résultats sans la contrainte sur la durée de la manœuvre, E_{mnv}^{corr} ; (b) Résultats après l’application de la contrainte sur la durée de la manœuvre, \tilde{E}_{mnv}^{corr} . Les résultats ont été normalisés pour avoir une amplitude maximale égale à 1.

présente les profils temporels des variables cinématiques, les points de fonctionnement de la motorisation et la consommation totale de chaque stratégie.

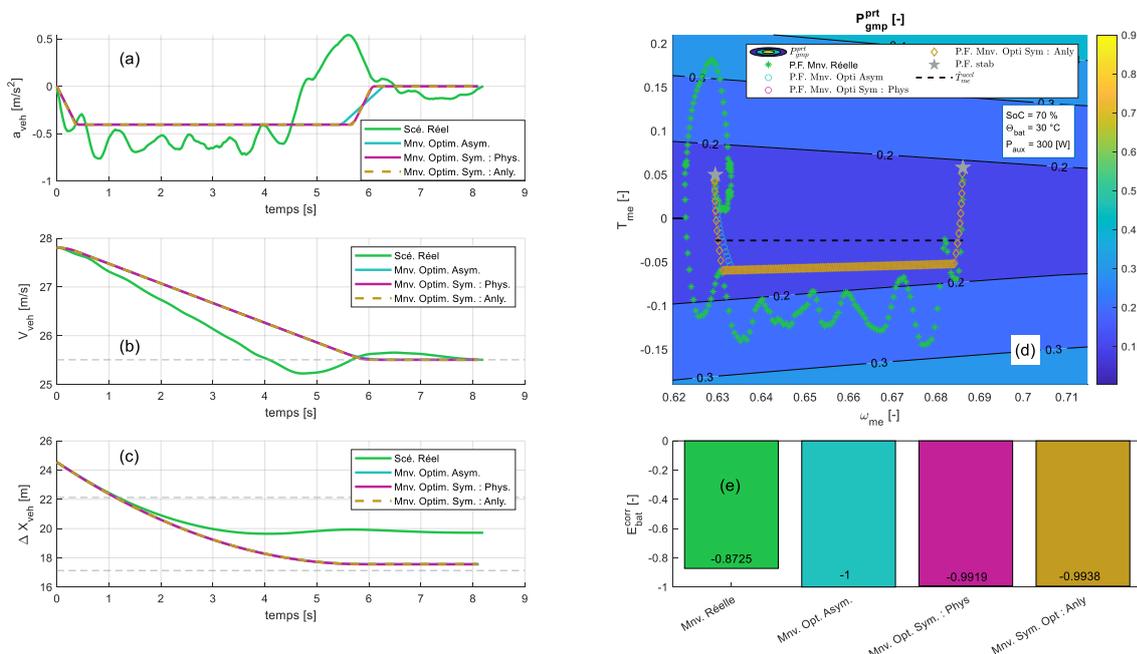


FIG. 2.10 – Évaluation des résultats : manœuvres symétriques. (a) Accélération du véhicule; (b) vitesse; (c) inter-distance; (d) points de fonctionnement sur la cartographie du GMP (en unités normalisées); (e) consommation globale normalisée à iso-distance

Sur Fig. 2.10a, nous constatons que les profils d’accélération issus des deux modèles

sont *pratiquement identiques*. En revanche, il existe une différence observable dans le transitoire final du trapèze à *à-coup libre* ; cependant, du fait que la durée de la phase stabilisée, τ_2 , a été allongée en conséquence, les profils de vitesse restent assez similaires en on finit pratiquement à la même distance du véhicule précédent.

En étudiant les points de fonctionnement (Fig. 2.10d), nous pouvons voir que la phase transitoire est légèrement prolongée avec les trapèzes symétriques, ce qui fait qu'on passe plus de *temps* sur des points de fonctionnement ayant plus de pertes ; ceci explique la légère réduction de l'énergie récupérée par la batterie, par rapport à la *manœuvre asymétrique*, observée sur la Fig. 2.10e.

Nos résultats suggèrent que l'à-coup des phases transitoires a peu d'influence sur la consommation globale d'une manœuvre ; ce sont la durée et l'accélération de la phase stabilisée, τ_2 et a_{ex} , qui seraient le principal levier d'écoconduite. Notez bien que la variation de ces deux paramètres a une influence considérable sur l'inter-distance à la fin de la manœuvre. Le respect d'une distance acceptable avec le véhicule précédent pourrait donc résulter le principal facteur limitant le potentiel de gain.

Le potentiel de gain d'énergie en utilisant des profils symétriques semble assez proche de celui des trapèzes asymétriques. Cela est favorable car, comme indiqué précédemment, les profils symétriques semblent être plus agréables pour les conducteurs [19] ; de plus, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, l'utilisation de trapèzes symétriques offre des avantages considérables lors de l'implémentation d'un algorithme temps-réel pour l'exécution de manœuvres trapézoïdales.

2.5.3 Problème à à-coups initial et final définis à l'avance

Tel que nous venons de le voir, la consommation d'énergie semble peu sensible à la valeur d'à-coup des phases transitoires. Ainsi, un levier pour réduire le temps de calcul de l'algorithme d'optimisation consisterait à fixer à l'avance l'à-coup et déterminer uniquement les valeurs optimales de a_{ex} et τ_2 . Pour ce faire, on pourrait se baser sur une heuristique, sur des optimisations faites *hors-ligne* ou sur des critères d'agrément de conduite.

La réduction de la dimension du problème (du nombre de variables d'optimisation) devrait se traduire par une forte diminution du coût de calcul. Il existe, toutefois, un deuxième phénomène pouvant simplifier le calcul du problème : le fait d'avoir des variables en moins, pourrait contribuer à *améliorer la convexité* du problème d'optimisation. Pour vérifier la plausibilité de cette hypothèse, nous allons tracer la consommation globale de la manœuvre en fonction de l'accélération de la phase stabilisée, a_{ex} , en partant des résultats d'optimisation du trapèze symétrique. A chaque fois, la durée de cette phase, τ_2 , a été calculée pour faire en sorte de respecter la vitesse finale.

La Figure 2.11 représente la variation globale d'énergie au cours de la manœuvre, E_{min}^{corr} , en prenant en compte la correction d'iso-distance, en fonction de a_{ex} . Nous observons, indépendamment du modèle utilisé, un comportement monotone décroissant, *dans*

le domaine de faisabilité du problème. Même si aucune des deux fonctions n'est convexe, ce qui serait l'idéal, cette régularité de la fonction coût pourrait simplifier considérablement le problème. Des algorithmes de descente pourraient rapidement converger vers des minimums locaux qui, dans le cas des fonctions monotones, seraient aussi des minimums globaux et se trouveraient à la frontière avec l'une des contraintes. D'autres solutions plus élégantes (mais pas forcément plus performantes dans la pratique) peuvent être imaginées¹³.

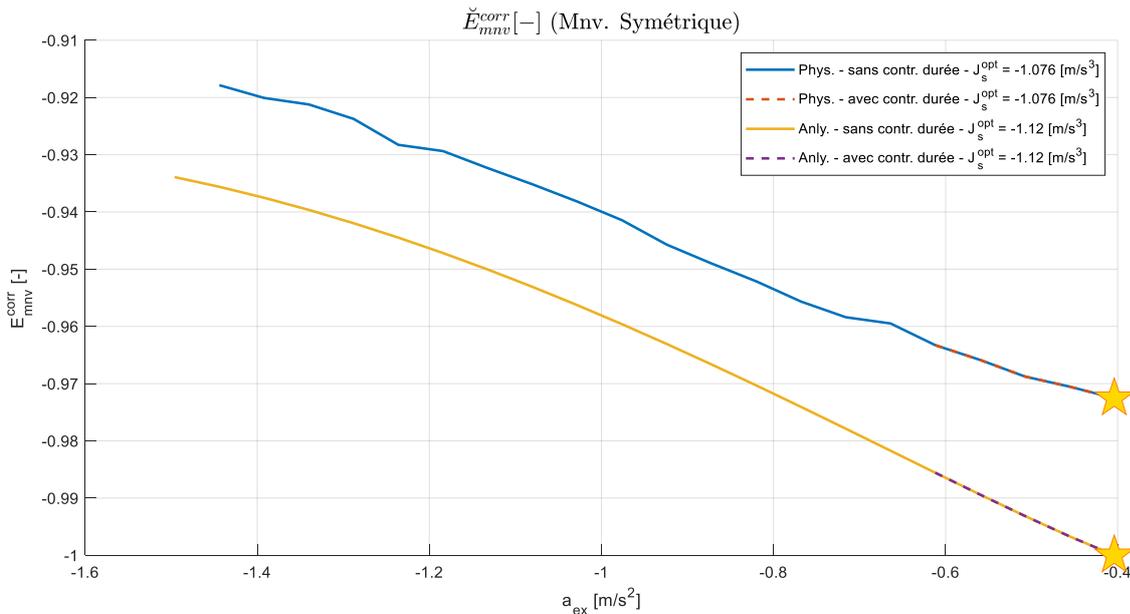


FIG. 2.11 – Estimation de la consommation globale corrigée de la manœuvre, \check{E}_{mnv}^{corr} , pour les modèles physique et analytique, en fonction de l'accélération de la phase stabilisée, a_{ex} ; avec l'à-coup des phases transitoires, J_s , fixé. Les valeurs ont été normalisées pour faire que la donnée ayant la plus grande amplitude corresponde à 1.

Une approche pour réduire d'avantage le coût de l'optimisation est d'approximer la fonction objectif par une fonction affine, simplification pertinente du comportement observé dans la figure. Toutefois, il faudrait trouver un mécanisme pour déterminer les paramètres de ladite fonction pour chaque scénario de conduite.

En outre, nous constatons un écart relativement important entre les consommations associées aux modèles physique et analytique. En effet, le modèle analytique surestime le potentiel de régénération d'énergie. Il faut signaler, toutefois, que la différence peut paraître amplifiée à cause de l'échelle de la figure. Nous utilisons des unités normalisées, -1 à la plus grande valeur d'énergie « récupérée »; ainsi, pour une même valeur de a_{ex} , l'écart reste toujours inférieur à 3%. De plus, étant donné que le modèle a pour vocation d'orienter l'optimisation énergétique, sa précision absolue n'est pas essentielle; ce qui compte est sa représentativité de l'influence des paramètres sur la consommation, dans le

13. Par exemple, dans le cas présent, la fonction coût issue du modèle analytique est quasi-convexe dans le domaine de faisabilité du problème. Si cela s'avérait vrai pour tous scénarios, alors on pourrait potentiellement résoudre le problème en utilisant des algorithmes d'optimisation quasi-convexe (qui, en revanche, ne garantissent pas de trouver un optimum global)

domaine de faisabilité du problème. Dans le cas présent, et concernant l'effet du paramètre a_{ex} , le comportement des deux fonctions est *grossièrement* le même, ce qui est suffisant pour notre objectif. Il reste à vérifier si cela est valable pour des scénarios différents.

2.6 ANALYSE DU TEMPS D'EXÉCUTION DE L'ALGORITHME

Objectif de la section

Déterminer et comparer le temps de calcul de l'algorithme d'optimisation, en utilisant les deux modèles.

Pour l'implémentation embarquée d'un SAC d'écoconduite, il est impératif d'avoir un temps de calcul acceptable. Même si la conception d'un algorithme d'optimisation temps-réel sort de la portée notre étude, il est d'intérêt de quantifier ce qu'on peut gagner à utiliser le *modèle analytique de consommation des manœuvres* pour obtenir le profil d'accélération optimal. Nous avons donc déterminé, sur des itérations successives, le temps nécessaire à l'exécution de notre algorithme de Force brute. Chaque itération intègre toutes les étapes nécessaires à la résolution du Problème (2.46), où l'on optimise par rapport à tous les paramètres du trapèze d'accélération ; en particulier, nous avons considéré : l'initialisation des structures des données (cf. section IV.2.4.3), le calcul de la consommation sur tout le *domaine de faisabilité* du problème (cf. section IV.2.4.4), avec la correction d'iso-distance, et la détermination des paramètres optimaux pour le problème à trapèzes asymétriques (cf. section IV.2.4.5.1). Les tests ont été réalisés sur le même ordinateur et dans de conditions similaires à ceux de la section IV.1.2.4.4 ; de même, nous avons essayé de limiter, autant que possible, l'utilisation d'autres applications, afin d'éviter d'introduire des biais dans notre analyse. Les temps de calcul globaux, en utilisant les modèles physique et analytique, sont présentées sur la Figure 2.12.

Nous constatons un écart assez significatif dans les temps de calcul avec les deux modèles. En médiane, la résolution du problème en utilisant le modèle physique a pris $\Delta t = 2.217[hrs]$, alors qu'en utilisant l'approximation analytique la médiane a été de $\Delta t = 2.61[s]$ (ce qui inclut le temps nécessaire à identifier le modèle de la motorisation) ; l'implémentation avec un modèle analytique s'exécute donc plus de 3000 fois plus vite ! Même si ce temps de calcul reste assez conséquent, l'utilisation du modèle analytique, en association avec un algorithme d'optimisation basé sur le gradient, laisse imaginer des coûts de calcul compatibles avec une implémentation temps réel.

De plus, tel qu'il sera précisé plus tard, une durée de quelques secondes par scénario, ouvre la possibilité de déterminer la manœuvre optimale sur une batterie de scénarios de tests suffisamment représentative, qui pourrait être utilisée postérieurement pour renseigner un algorithme heuristique capable de tourner en temps-réel.

Le lecteur aura peut-être remarqué une légère augmentation du temps d'exécution de l'optimisation basée sur le modèle physique sur chaque itération. Il y a au moins deux

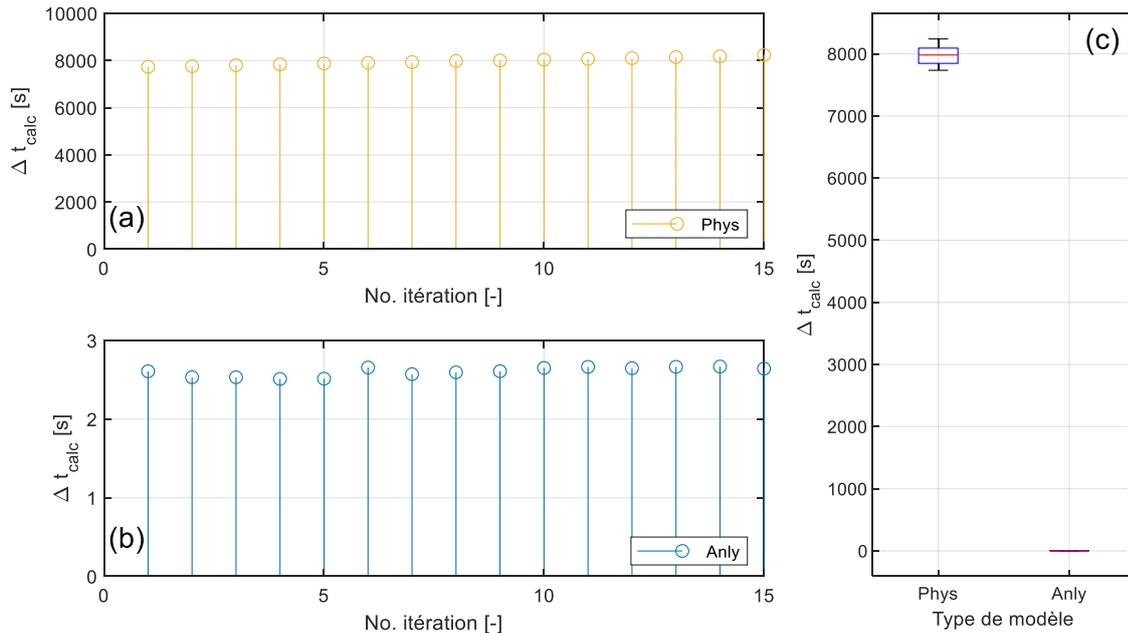


FIG. 2.12 – Comparaison des temps de calculs, Δt_{calc} , de l’algorithme d’optimisation par force brute. Le modèle physique, sur Simulink, a été exécuté en Mode Accelerator. Pour chaque modèle, 15 itérations ont été exécutées. (a) Δt_{calc} avec modèle physique, (b) Δt_{calc} avec le modèle analytique, (c) comparaison des durées des deux optimisations

explications possibles à ce phénomène : d’une part, il se peut que la montée en température du processeur et d’autres composants électroniques ait induit une baisse de performance¹⁴; une autre explication possible est la réduction, à chaque itération, de la mémoire vive ou de la capacité disponible de la carte graphique, ce qui aurait potentiellement imposé des tâches supplémentaire de transfert de variables à chaque itération ou limité les capacités à exécuter certaines tâches¹⁵.

2.7 PERSPECTIVES : SIMPLIFICATION DE LA FONCTION D’OPTIMISATION

Objectif de la section

Proposer une approche permettant de réduire davantage le coût de l’optimisation.

Finalement, nous proposerons une approche permettant de simplifier la fonction d’optimisation, et qui devrait se traduire par une réduction considérable du coût de calcul pour

14. En revanche, la progression presque linéaire étonne si l’on tient compte que l’ensemble de calculs a pris plus d’une journée; même si les constantes de temps thermiques tendent à être importantes, on se serait peut-être attendu à observer un phénomène de stabilisation vers les dernières itérations.

15. Cela est compatible avec le fait que, afin de vérifier la pertinence des résultats des optimisations successives, à la fin de chaque itération nous avons tracé les résultats de l’optimisation, sans les effacer postérieurement.

la résolution du problème de détermination de la manœuvre optimale. La modélisation considérée est basée sur les analyses énergétiques présentées récemment sur [195], où les auteurs montrent qu'il est possible d'exprimer la consommation globale d'un véhicule électrique comme une somme de produits entre un terme associé au véhicule et un autre associé à la conduite. Les auteurs introduisent également la notion de *Consommation d'énergie effective*, c'est à dire la consommation d'énergie qui dépend du style de conduite (le reste étant fixé par les conditions du scénario). En utilisant ces concepts, et en faisant certaines hypothèses sur la consommation, le problème d'optimisation est considérablement simplifié.

Nos résultats du Chapitre III.2, ont montré que *l'agressivité de conduite* est prépondérante pour la consommation lors des scénarios urbains. Cela est associé à la faible valeur des pertes aérodynamique dans ce contexte. Ainsi, nous pouvons faire la supposition que, *grossièrement* pour ce type de scénario, les pertes d'énergie dans le groupe motopropulseur seront proportionnelles au carré de la force appliquée, en prenant l'exemple sur [195]. De même, concernant la dissipation d'énergie dans le véhicule, seules des pertes au roulement constantes seront considérées. Ainsi, la puissance dans la batterie sera donnée par :

$$P_{bat}(t) = \kappa_{gmp}^{loss} F_{veh}^2(t) + F_{veh}(t) V_{veh}(t) + P_{aux} \quad (2.85)$$

La consommation totale de la manœuvre sera donc :

$$E_{mnv} = \int_0^{\tau_{mnv}} P_{bat}(t) dt = \kappa_{gmp}^{loss} \int_0^{\tau_{mnv}} F_{veh}^2(t) dt + \int_0^{\tau_{mnv}} F_{veh}(t) V_{veh}(t) dt + P_{aux} \tau_{mnv} \quad (2.86)$$

En négligeant les pertes aérodynamiques, et supposant que la pente, α_r et le coefficient des pertes au roulement, c_r , sont des constantes, nous aurons :

$$F_{veh}(t) = M_{veh}^{eq} a_{veh}(t) + F_0 = M_{veh}^{eq} a_{veh}(t) + M_{veh} g \sin \alpha_r + c_r M_{veh} g \cos \alpha_r \quad (2.87)$$

A présent, nous pouvons calculer l'énergie appliquée au véhicule en intégrant le produit entre la force appliquée au véhicule, F_{veh} , et sa vitesse, V_{veh} . Le résultat est montré sur (2.88) et est issu de [195], Δh étant le changement d'altitude au cours de la manœuvre, et Δx la distance parcourue.

$$\int_0^{\tau_{mnv}} F_{veh}(t) V_{veh}(t) dt = \frac{1}{2} M_{veh}^{eq} (V_f^{h2} - V_0^{h2}) + M_{veh} g \Delta h + c_r M_{veh} g \Delta x \quad (2.88)$$

Le premier terme est fixe pour un scénario donné. En revanche, les deux autres dépendent de la distance parcourue et donc du profil d'accélération appliqué. Toutefois, on négligera cette dépendance en se disant que leur valeur sur l'ensemble d'un trajet préalablement défini est fixe, et ce indépendamment du style de conduite utilisé [195].

A partir de la première partie de (2.87), nous pouvons calculer le carré de la force à la roue comme suit :

$$F_{veh}^2(t) = (M_{veh}^{eq} a_{veh}(t) + F_0)^2 = (M_{veh}^{eq})^2 \left(a_{veh}^2(t) + 2 \frac{F_0}{M_{veh}^{eq}} a_{veh}(t) + \frac{F_0^2}{(M_{veh}^{eq})^2} \right) \quad (2.89)$$

Il est possible désormais de calculer le premier terme de l'équation (2.86), c'est-à-dire, les pertes totales d'énergie au cours de la manœuvre comme montré sur (2.90).

$$\begin{aligned}
\kappa_{gmp}^{loss} \int_0^{\tau_{mnv}} F_{veh}^2(t) dt &= \kappa_{gmp}^{loss} (M_{veh}^{eq})^2 \int_0^{\tau_{mnv}} \left[a_{veh}^2(t) + 2 \frac{F_0}{M_{veh}^{eq}} a_{veh}(t) + \frac{F_0^2}{M_{veh}^{eq}{}^2} \right] dt \\
&= \kappa_{gmp}^{loss} (M_{veh}^{eq})^2 \int_0^{\tau_{mnv}} [a_{veh}^2(t)] dt + 2 \kappa_{gmp}^{loss} F_0 M_{veh}^{eq} \int_0^{\tau_{mnv}} [a_{veh}(t)] dt \\
&\quad + \kappa_{gmp}^{loss} F_0^2 \int_0^{\tau_{mnv}} dt \\
&= \kappa_{gmp}^{loss} (M_{veh}^{eq})^2 \int_0^{\tau_{mnv}} a_{veh}^2(t) dt + 2 \kappa_{gmp}^{loss} F_0 M_{veh}^{eq} \int_{V_{veh}(0)=V_0^h}^{V_{veh}(\tau_{mnv})=V_f^h} dV_{veh}(t) \\
&\quad + \kappa_{gmp}^{loss} F_0^2 \tau_{mnv} \\
&= \kappa_{gmp}^{loss} (M_{veh}^{eq})^2 \int_0^{\tau_{mnv}} a_{veh}^2(t) dt + 2 \kappa_{gmp}^{loss} F_0 M_{veh}^{eq} [V_f^h - V_0^h] \\
&\quad + \kappa_{gmp}^{loss} F_0^2 \tau_{mnv}
\end{aligned} \tag{2.90}$$

En combinant nos résultats et introduisant une nouvelle notation, nous pouvons calculer la variation énergie totale dans la batterie, E_{mnv} , grâce à (2.91). Sur cette équation, ΔE_{cin} correspond à la *variation de l'énergie cinétique du le véhicule*, ΔE_{pot} à la *variation d'énergie potentielle du véhicule*, E_{roul}^{prt} est l'énergie perdue à cause de la *résistance au roulement* et E_{gmp}^{prt} les *pertes totales dans le groupe motopulseur*. Le dernier terme, E_{mnv}^{eff} correspond à la notion de *Consommation d'énergie effective* [195]; sous les hypothèses faites dans cette section, en dehors de cette valeur, toutes les autres pertes sont fixes pour un scénario donné, indépendamment de la manœuvre exécutée.

$$E_{mnv} = \Delta E_{cin} + \Delta E_{pot} + E_{roul}^{prt} + E_{gmp}^{prt} + E_{mnv}^{eff} \tag{2.91}$$

Les quatre premières composantes d'énergie sont définies comme :

$$\Delta E_{cin} = \frac{1}{2} M_{veh}^{eq} (V_f^{h2} - V_0^{h2}) \tag{2.92}$$

$$\Delta E_{pot} = M_{veh} g \Delta h \tag{2.93}$$

$$E_{roul}^{prt} = c_r M_{veh} g \Delta x \tag{2.94}$$

$$E_{gmp}^{prt} = 2 \kappa_{gmp}^{loss} F_0 M_{veh}^{eq} (V_f^h - V_0^h) \tag{2.95}$$

L'énergie effective de la manœuvre, E_{mnv}^{eff} , est donnée par (2.96). Elle est composée par deux termes dont le premier tient compte de l'effet du style de conduite, et le deuxième de l'énergie dissipée à cause des pertes fixes, y compris l'énergie envoyée vers les auxiliaires électriques.

$$E_{mnv}^{eff} = \kappa_{gmp}^{loss} (M_{veh}^{eq})^2 \int_0^{\tau_{mnv}} a_{veh}^2(t) dt + [\kappa_{gmp}^{loss} F_0^2 + P_{aux}] \tau_{mnv} \tag{2.96}$$

Étant donné que seule l'énergie effective varie en fonction de la manœuvre utilisée pour répondre à un certain scénario de conduite, un problème d'optimisation ayant pour fonction coût E_{mnv}^{eff} est *équivalent* au problème de base, utilisant E_{mnv} ¹⁶. Nous pouvons

donc déterminer la manœuvre optimale en résolvant ce problème, ce qui demanderait beaucoup moins d'effort.

Nous pouvons donc appliquer le principe des *profils trapézoïdales d'accélération*, à la définition de la *consommation effective*, ainsi que les différentes contraintes considérées dans la section IV.2.1. Ainsi, en utilisant la notation générique présentée sur la section IV.2.2.4, nous pouvons définir un problème d'optimisation simplifié :

$$\begin{aligned}
\underset{\tilde{\theta} \in \mathbb{R}^r}{\text{minimiser}} \quad & \check{E}_{mnv}^{eff}(\tilde{\theta}) &= \kappa_{gmp}^{loss} (M_{veh}^{eq})^2 \int_0^{\tau_{mnv}} a_{veh}^2(\tilde{\theta}, t) dt + [\kappa_{gmp}^{loss} F_0^2 + P_{aux}] \tau_{mnv}(\tilde{\theta}) \\
\text{tel que} \quad & \hat{g}_i(\tilde{\theta}) = 0 &, \quad i = 1, \dots, p \\
& \hat{f}_i(\tilde{\theta}) \leq 0 &, \quad i = 1, \dots, q \\
& \hat{h}_i(\tilde{\theta}) \leq 0 &, \quad i = 1, \dots, m
\end{aligned} \tag{2.97}$$

Résoudre ce problème revient à trouver le meilleur compromis entre la réduction de l'agressivité de conduite, et la durée des manœuvres. Cette observation vient supporter nos résultats du Chapitre III.2 et, en particulier, notre discussion concernant l'effet de l'utilisation des auxiliaires en contexte urbain.

Grâce à cette nouvelle formulation, la charge de calcul associée à la fonction coût se trouve fortement réduite. En effet, l'influence du véhicule et son groupe moto-propulseurs se traduisent par de simples coefficients, de même l'intégrale du carré de l'accélération, et la durée de la manœuvre, peuvent s'écrire comme des polynômes des paramètres d'optimisation, d'un ordre bien plus bas que le modèle du Chapitre III.1, et donc la convexité pourrait être fortement améliorée. De même, déterminer le gradient de cette nouvelle fonction coût serait plus abordable, permettant d'envisager l'utilisation de méthodes de descente pour résoudre le problème.

* * *

Une démarche similaire pourrait être appliquée pour le cas extra-urbain, en considérant par exemple uniquement les pertes dans le groupe moto-propulseurs et les pertes aérodynamiques qui, d'après nos résultats du Chapitre III.2, seraient prépondérantes dans ce contexte.

* * *

Cela conclut ce chapitre concernant l'optimisation énergétique des manœuvres trapézoïdales de conduite. En revanche, trouver le profil optimal n'a d'intérêt que si on est capable de faire que le véhicule l'exécute. Le chapitre suivant propose un algorithme permettant d'appliquer les résultats de l'optimisation, tout en les adaptant aux évolutions du scénario de conduite ; celui-ci s'inspire de la *compétence cognitive tactique* des êtres humains. Nous présentons aussi un mécanisme pour générer des consignes vers les actionneurs du véhicule, inspiré du phénomène cognitif de *procéduralisation*.

16. La notion d'équivalence de deux problèmes d'optimisation est présentée, par exemple, sur [22].

EXÉCUTION TEMPS-RÉEL DES MANŒUVRES DE CONDUITE : COMPÉTENCE TACTIQUE ET ACTION PROCÉDURALISÉE

Objectif du chapitre

En s'inspirant des principes d'apprentissage tactique et de procéduralisation, proposer une méthodologie permettant d'exécuter, en temps-réel, une manœuvre trapézoïdale, tout en l'adaptant aux variations du contexte de conduite.

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DU CHAPITRE

- *Algorithme pour la commande cinématique d'un véhicule, embarquable, permettant d'adapter les manœuvres aux évolutions du contexte de roulage*
- *Structure de commande pour la génération des consignes aux actionneurs pour l'exécution des manœuvres de conduite*

Grâce à l'**Apprentissage tactique**, un être humain peut assimiler la résolution d'un problème spécifique à l'exécution d'une *procédure* préalablement apprise [8]. Quand il doit agir dans une situation avec laquelle il est familiarisé, un humain peut faire appel aux réponses à des problèmes auxquels il a été confronté par le passé, et qu'il a déjà résolus, plutôt que de devoir retrouver à nouveau une méthode pour atteindre ses objectifs. Ces connaissances se traduiront par une procédure consistant à une séquence de mouvements ou de raisonnements pouvant être réalisés de manière fluide. Dans ce chapitre, nous proposerons un algorithme pour adapter, en temps-réel, le trapèze d'accélération optimal aux évolutions de l'environnement de conduite ; celui-ci s'inspire de ce mécanisme

cognitif, que nous avons traité dans les sections I.1.5.2.2 et IV.1.1. De même, en nous inspirant d'un autre aspect de l'apprentissage, connu sous le nom de **Procéduralisation**, nous proposerons un mécanisme pour générer des consignes aux actionneurs, permettant au véhicule d'exécuter des manœuvres trapézoïdales.

Une manœuvre de conduite peut être découpée en étapes. Par exemple, pour une *décélération*, le conducteur doit d'abord *relâcher la pédale d'accélération*, puis *enfoncer celle de frein*, qu'il *maintiendra appuyée pendant un certain temps*, pour ensuite la *relâcher progressivement* et *rappuyer sur l'accélérateur* afin de maintenir la nouvelle vitesse de son véhicule. Cela fait au total cinq étapes ; toutefois, sous certaines conditions, il est possible de les simplifier en trois, qui peuvent être aussi utilisées pour décrire le comportement du véhicule lors des manœuvres d'accélération, notamment :

- **Transitoire initial** : au début de la manœuvre, en appliquant un niveau d'à-coup relativement élevé, le véhicule varie son accélération jusqu'à attendre une valeur pertinente pour la situation de conduite. Dans le cas d'un *scénario d'accélération*, cette phase serait associée à l'enfoncement de la pédale d'accélération. Lors d'une *décélération*, le transitoire initial combinerait le relâchement de l'accélérateur et l'enfoncement du frein ; ces étapes peuvent être assimilées à une seule quand le temps entre les deux est très bref ou quand l'enfoncement de la pédale de frein se fait de manière assez douce.
- **Phase stabilisée** : tel que nous l'avons vu sur les données issues des roulages réels (cf. section II.3.4), assez souvent lors des manœuvres, le véhicule maintient une accélération relativement constante, pendant un temps plus ou moins long. Pour ce faire, il est possible que le conducteur fasse inconsciemment varier la pression sur le frein ou l'accélérateur pour obtenir le comportement désiré.
- **Transitoire final** : une fois que le véhicule est *suffisamment* proche de la vitesse souhaitée, on fait varier l'accélération avec un à-coup relativement important, jusqu'à stabiliser la vitesse. Dans une *manœuvre d'accélération*, cela est obtenu en relâchant l'accélérateur jusqu'à stabiliser la nouvelle vitesse ; lors d'un *scénario de décélération*, ce comportement est le résultat d'un relâchement plus ou moins fort de la pédale de frein, puis d'un appui sur celle d'accélération.
- Finalement, si la vitesse finale est différente de zéro, le conducteur adaptera la pression sur l'accélérateur afin de permettre à son véhicule de rouler à **vitesse stabilisée**.

Cette description des manœuvres comme une suite d'un transitoire, suivi d'une phase stabilisée, puis d'un transitoire finale, rappelle évidemment la discussion de la Partie II. Sur le Chapitre II.1 nous avons montré des évidences pouvant indiquer une perception distincte chez le conducteur entre des stimuli transitoires et stabilisées d'accélération ; en particulier, les conducteurs seraient assez sensibles à l'à-coup. Sur le Chapitre II.2 ces notions ont été formalisées par un *modèle trapézoïdal des manœuvres d'accélération* et sur le Chapitre II.3 nous avons vérifié expérimentalement que des manœuvres *grossièrement*

trapézoïdales font effectivement partie du *répertoire de manœuvres* du conducteur. Nous pouvons donc espérer que, si un SAC utilisait des trapèzes d'accélération pour la gestion des transitoires de vitesse, les conducteurs trouveraient le comportement du véhicule familier et il y aurait plus de chances qu'ils activent la fonction dans le futur.

3.1 GESTION CINÉMATIQUE DES PHASES DE LA MANŒUVRE

Objectif de la section

Proposer un système de commande hybride permettant de générer des consignes instantanées d'accélération du profil trapézoïdal.

En accord avec la discussion précédente, il est possible de découper une manœuvre trapézoïdale en quatre phases, constituant une *procédure de changement de vitesse*, associable à la *compétence tactique*. Nous représentons ces différentes phases sur la Figure 3.1 ; en particulier, nous avons :

- **Phase 0 :** caractérise le comportement du véhicule à *vitesse stabilisée*. A proprement parler, il ne s'agit pas d'une étape des manœuvres, mais plutôt de la condition du véhicule en dehors de celles-ci. Afin de garantir le maintien d'une certaine vitesse, l'accélération peut varier légèrement ; en revanche, on ne pourrait que très difficilement établir une topologie de ce comportement, ou l'associer à des *choix conscients* du conducteur.
- **Phase 1 :** amorçage de la manœuvre, correspondant au *transitoire initial d'accélération*. Au cours de cette étape, l'accélération du véhicule varie considérablement jusqu'à atteindre une certaine valeur. Le ressenti du conducteur est associé à son SVT et donc caractérisé principalement par l'*à-coup* du véhicule.
- **Phase 2 :** maintien de l'*accélération stabilisée*. Pendant cette étape, le niveau d'accélération reste au voisinage d'une valeur relativement constante. Le ressenti associé à cet intervalle est déterminé principalement par le SVS et donc caractérisé par le niveau d'*accélération* du véhicule.
- **Phase 3 :** correspondant au *transitoire final* de la manœuvre. Au cours de cette étape, l'amplitude de l'accélération décroît jusqu'à atteindre une valeur *pratiquement* nulle. Le ressenti est majoritairement associé à l'*à-coup*, perçu par le SVT. A la fin de cette étape, le véhicule continuera de rouler à vitesse stabilisée, en démarrant une nouvelle **phase 0**.

* * *

Avant d'aller plus loin, nous introduirons brièvement la notion des Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH). D'un point de vue mathématique, un SDH est une entité qui reçoit et gère des signaux, dont certains appartiennent à des ensembles continus et d'autres à des

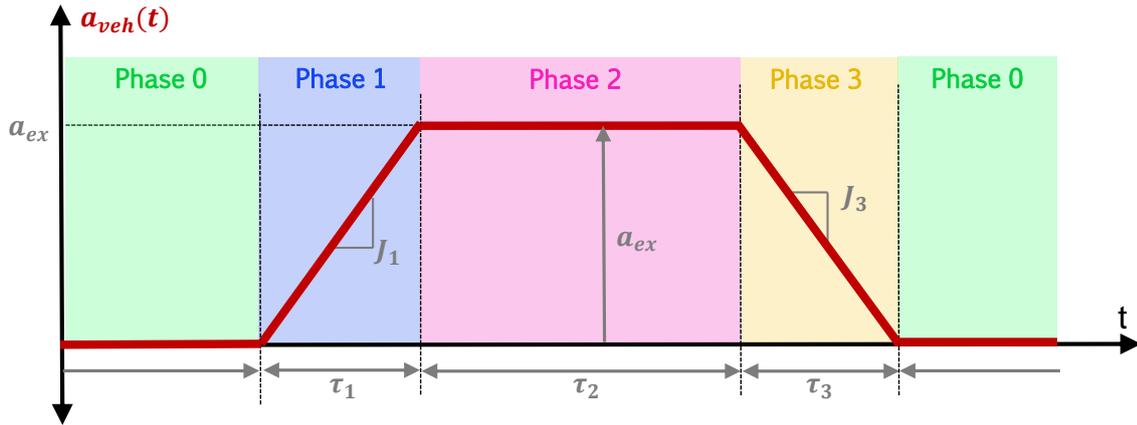


FIG. 3.1 – Phases d’une manœuvre trapézoïdale de conduite

ensembles discrets (habituellement finis) [10]. Aujourd’hui, la représentation privilégiée pour l’études des SDH est celle des *automates hybrides* [10, 178, 179].

Les SDH peuvent être d’intérêt pour caractériser des systèmes dont le comportement est naturellement associé à des dynamiques continues et discrètes, un exemple classique étant *une boule qui rebondit contre le sol* : tant qu’elle est dans l’air, elle a un comportement continu ; en revanche, quand elle atteint le sol (événement discret), son comportement varie, car elle change de direction et une partie de son énergie peut être dissipée pendant le choc, ce qui modifie ses *conditions initiales locales*.

Il existe, cependant, une deuxième application des SDH présentant un fort intérêt pour notre discussion. En effet, grâce à la *Commande automatique*, il est possible de contraindre un système naturellement continu à avoir le comportement d’un système hybride, ce qui pourrait être convenable pour certaines applications.

Cette dernière approche nous offre une opportunité dans le cadre de l’automatisation de la conduite : nous pouvons représenter le *comportement idéalisé* du véhicule pendant les différentes étapes d’une manœuvre, en utilisant un *système hybride*. Les variables du véhicule sur lesquelles on souhaite imposer des dynamiques hybrides seraient les dérivées des états du système étudié dans le chapitre précédent (cf. Eq. (2.1)), $\dot{\mathbf{x}}(t) = [V_{veh}(t), a_{veh}(t)]^T$, que nous nommerons $\underline{\mathbf{y}}(t)$, afin d’alléger la notation.

La Figure 3.2 propose un automate hybride, représentant les dynamiques d’un véhicule qui exécute une *manœuvre trapézoïdale de conduite*. Lors de l’*initialisation*, le véhicule se déplace à vitesse constante, v_0 , qu’il maintiendra tout au long de la *Phase 0*. Le passage de la variable Booléenne b_{mnv} à `vrai` indique le début de la manœuvre, c’est-à-dire, le passage à la *Phase 1*. Pendant cette phase, l’accélération varie avec un à-coup constant J_1 , et la vitesse évolue en conséquence. Ensuite, lorsque l’accélération atteint la valeur a_{ex} , on retient l’instant où cela a eu lieu, $t = t_1$, puis on démarre la *Phase 2*, pendant laquelle l’accélération sera maintenue à a_{ex} (l’à-coup étant donc nul). Après une période τ_2 , on fait la transition vers la *Phase 3*, où l’accélération variera avec un à-coup de $-J_3$, jusqu’à

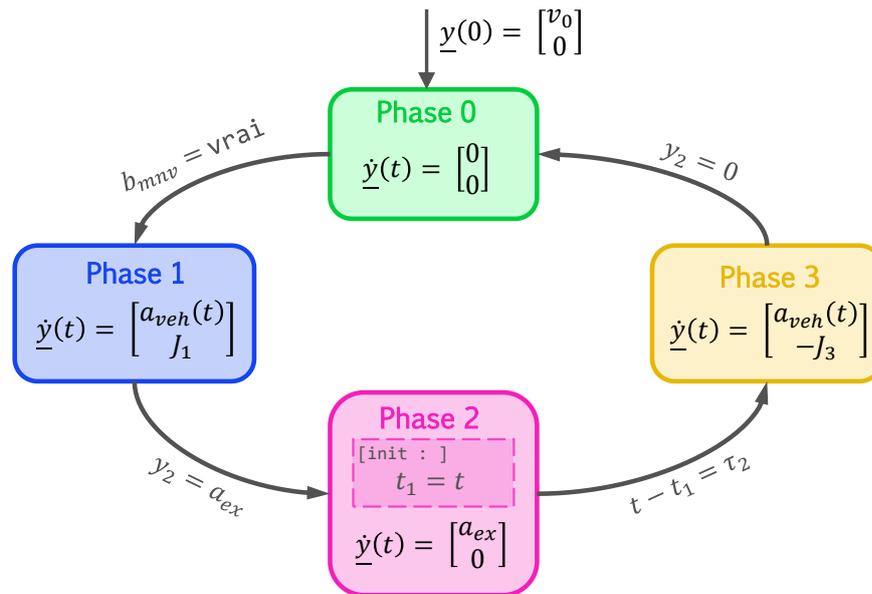


FIG. 3.2 – Représentation d'une manœuvre de conduite par un SDH

devenir nulle; à ce moment, on retourne à la *Phase 0*, en ayant une nouvelle valeur de vitesse stabilisée. Une nouvelle manœuvre pourrait alors démarrer.

* * *

Un SDH combine des variables discrètes et des variables continues. Ces dernières ne sont pas représentables par un ordinateur, ne pouvant utiliser que des variables appartenant à des ensembles discrets. En particulier, il existe deux phénomènes propres à l'électronique numérique qui rendent un ordinateur incapable de reproduire parfaitement le comportement d'un SDH: l'échantillonnage et la quantification [188]. L'échantillonnage est associé à l'utilisation d'une horloge pour séquencer les opérations; de ce fait, en ce qui concerne les calculs, les signaux n'ont de l'importance qu'à des instants *discrètement espacés dans le temps*. La *quantification* traduit l'utilisation d'interrupteurs pour emmagasiner de l'information¹, cela implique de représenter les quantités par des nombres binaires à taille finie; ainsi, nous ne pouvons pas utiliser des nombres réels et devons nous contenter avec des variables à *résolution finie*.

Pour implémenter la gestion cinématique des manœuvres sur un système embarqué, il est donc nécessaire d'approximer le SDH précédent par une *machine à états*, compatible avec un ordinateur. Cela est représenté sur la Figure 3.3. Nous considérerons uniquement l'accélération car c'est la variable qui déterminera le couple demandé aux actionneurs, la vitesse courante du véhicule supposée mesurable et connue. Il existe deux changements principaux par rapport au SDH: d'une part, la résolution limitée, ainsi que l'évolution des variables « par sauts », rendent nécessaire d'avoir des tolérances dans les conditions de transition, pour passer d'un état à un autre; d'autre part, comme les variables sont mises à jour uniquement à certains intervalles, nous avons remplacé les équations différentielles,

1. En effet, des transistors opérant en saturation, ainsi que d'autres composants électroniques, sont la base de la plupart de systèmes électroniques numériques.

par des *équations aux différences*, compatibles avec la nature séquentielle des machine à états. L'intervalle de temps entre deux calculs, noté Δt , sera supposé constant.

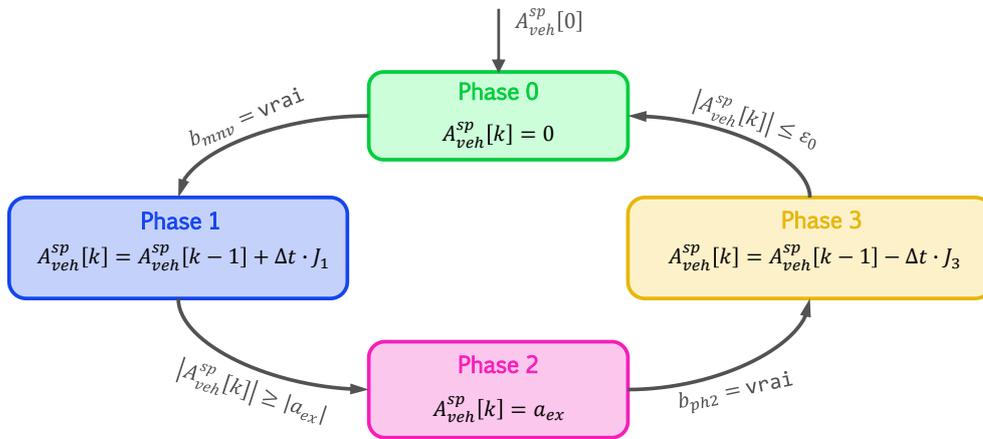


FIG. 3.3 – Représentation d'une manœuvre de conduite par une machine à états. Adaptation pour une implémentation embarquée. Les itérations ont lieu à des intervalles Δt . La condition b_{ph2} sera définie par la suite.

* * *

En principe, on pourrait se contenter de prendre le résultat de l'optimisation, et générer une consigne d'accélération « en l'état », à l'aide d'une machine à états. En revanche, au cours de la manœuvre, l'environnement de conduite peut varier, par rapport aux conditions utilisées dans la formulation du problème d'optimisation. En particulier, la vitesse du véhicule cible (que nous avons supposée constante) peut changer ; aussi, il est probable que la consigne d'accélération ne soit pas parfaitement respectée. D'autres changements pourraient également avoir lieu. Ainsi, il est d'intérêt d'inclure un mécanisme permettant d'adapter la topologie de la manœuvre aux évolutions du contexte de conduite.

Même si ce serait l'idéal, résoudre à chaque pas de temps le problème d'optimisation pourrait s'avérer trop coûteux. De plus, il serait nécessaire d'adapter le problème d'optimisation afin de pouvoir respecter la *topologie de la manœuvre*. En effet, l'à-coup initial J_1 est une variable avant de déclencher la manœuvre (pendant la *phase 0*). En revanche, une fois que le premier transitoire d'accélération serait démarré (*phase 1*) avec une certaine valeur d'à-coup, on devrait maintenir la valeur de J_1 aussi constante que possible ; dans le cas contraire, le comportement du véhicule pourrait surprendre le conducteur et lui être donc désagréable. Des adaptations similaires devraient s'appliquer aux phases suivantes du trapèze, avec une complication additionnelle : à chaque nouvelle phase, on aurait moins de *degrés de liberté*, rendant plus difficile le respect des contraintes associées aux objectifs de la manœuvre. Une approche différente pour adapter le profil trapézoïdal aux évolutions du scénario est donc nécessaire.

3.2 ADAPTATION DE LA MANŒUVRE AUX ÉVOLUTIONS DU CONTEXTE : APPLICATION DE LA COMPÉTENCE TACTIQUE

Objectif de la section

En s'inspirant de la compétence tactique humaine, proposer un mécanisme pour adapter le profil trapézoïdal aux changements du contexte de conduite.

Tel que nous l'avons vu précédemment, lors de chaque étape d'une manœuvre trapézoïdale, la dynamique du système est déterminée par des paramètres préalablement définis (dans l'ordre, J_1 , a_{ex} , τ_2 et J_3). Pendant l'exécution d'une phase, la modification du paramètre concerné reviendrait à changer la *topologie de la manœuvre*, ce qui pourrait entraîner des effets non désirés sur l'agrément de conduite.

Comme l'accélération instantanée du véhicule est figée, on pourrait croire qu'il n'est pas possible d'adapter le comportement du véhicule si le contexte change. Toutefois, l'*Apprentissage tactique* nous offre une approche permettant de rendre les manœuvres robustes aux évolutions du scénario. Le principe est le suivant : grâce à l'Apprentissage tactique, on peut considérer le trapèze d'accélération comme un tout, une *procédure de changement de vitesse* ; de ce fait, bien qu'il ne soit pas judicieux de changer l'accélération instantanée, il est tout de même possible de modifier *globalement* la procédure, c'est-à-dire, faire varier la forme du trapèze, afin d'adapter le comportement du véhicule au contexte de conduite.

Un exemple permettant de mieux comprendre cette notion, et qui m'est bien connu, vient du domaine musical. Pour faciliter l'exécution² d'un morceau, on découpe le temps par parties bien définies, qu'on appelle des « mesures ». Il est assez courant d'apprendre à jouer un morceau en maîtrisant ce qui doit être joué lors de chaque mesure ; chaque phrase musicale devient donc une *mini-procédure* faisant partie d'un tout plus grand (comme un couplet ou un refrain). Or, quand on doit jouer en groupe, il peut arriver à un moment de ne pas être bien calé sur le rythme, soit car les autres musiciens ont ralenti ou accéléré, soit parce qu'on l'a fait soi-même. En ce moment, il est très habituel d'adapter *comme on peut* son jeu, afin de rentrer dans le temps lors du début de la prochaine mesure. Cela laisse penser que, grâce à l'apprentissage de la procédure, les musiciens seraient capables d'adapter le jeu d'une phrase musicale pour compenser les évolutions du contexte de la pièce. Cela se fait *presque inconsciemment* et, souvent, de manière tellement rapide et discrète que le public ne réaliserait probablement pas l'inconvénient (sauf pour ceux ayant une oreille suffisamment entraînée).

Cette image met en valeur le potentiel de l'Apprentissage tactique lorsqu'il s'agit de gagner en robustesse lors de l'exécution d'une tâche. Pour appliquer ce principe aux manœuvres de conduite, nous allons traiter séparément chacune des phases du profil

2. Pour être plus exhaustif, on devrait ajouter « pour faciliter la compréhension et la réception d'une pièce ».

trapézoïdal. Ainsi, quand on se trouve dans une certaine phase, on pourrait récupérer des informations sur l'environnement et le système, et les utiliser pour mettre à jour les paramètres des phases à venir, afin de répondre *du mieux possible* à la nouvelle situation de conduite. Ci-dessous, nous présentons une méthode pour adapter le trapèze à chacune de ces phases.

3.2.1 Phase 1 : adaptation des paramètres

Dans la suite de la discussion, nous considérerons que les évolutions du scénario auront des effets sur deux paramètres cinématiques : la variation de vitesse du véhicule hôte, ΔV^h , et l'inter-distance finale avec le véhicule cible, ΔX_f . Nous appellerons ces paramètres les « objectifs de la manœuvre »; en effet, ils se traduiront par des indices pouvant être perçus par le conducteur³, et qui lui indiqueront si le profil d'accélération a bien répondu au scénario de conduite.

Lors du premier transitoire d'accélération, la phase « montante » du trapèze, la valeur de l'à-coup J_1 est fixe; on prend en effet, le résultat de l'optimisation, J_1^* . En revanche, à ce stade, les autres paramètres de la manœuvre (a_{ex} , τ_2 et J_3) peuvent être modifiés sans que le conducteur s'en rende compte. Cela est présenté sur la Figure 3.4, où l'on voit le changement du profil trapézoïdal entre deux itérations, pendant lesquelles les objectifs du scénario, ΔV^h et ΔX_f , ont subi des variations. Nous pouvons voir qu'à l'instant $t = t_k$, où le nouveau profil est calculé, l'à-coup initial est le même que pour l'ancien profil; toutefois, les autres paramètres ont changé, ce qui implique, dans l'exemple de la figure, une prolongation de cette phase, jusqu'à atterrir sur une valeur d' a_{ex} plus importante. La durée de la phase stabilisée τ_2 , et l'à-coup de la phase finale J_3 , ont également subi des évolutions, permettant de répondre aux nouveaux objectifs de la manœuvre.

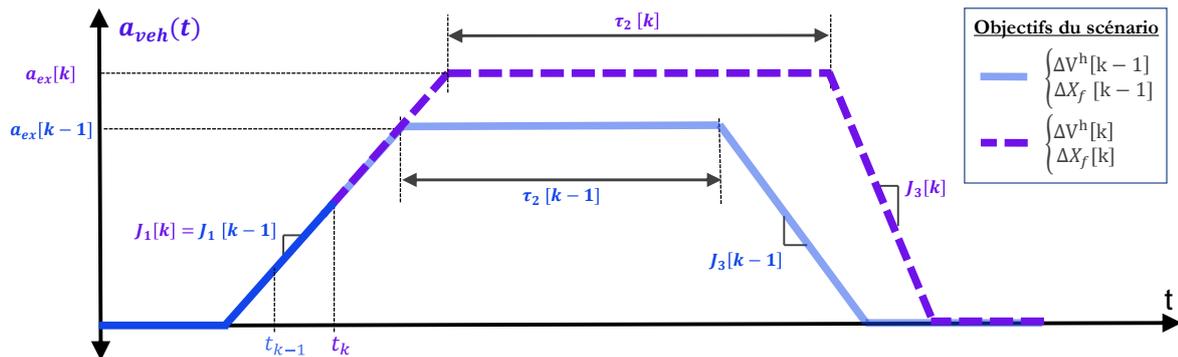


FIG. 3.4 – Phase 1 : mise à jour des paramètres de la manœuvre. Le temps $t = t_k$ correspond à l'instant courant de l'algorithme.

Afin de calculer des nouvelles valeurs des paramètres, nous ferons appel à notre discussion de la section IV.2.1, où il a été question des contraintes du problème d'optimisation. La discussion qui suit découle de la méthode de gestion des perturbations sur les

3. Il s'agira principalement d'indices visuels. Le non-respect de l'inter-distance cible, ΔX_f , sera facilement détecté car le conducteur verra qu'il est *trop près* ou *trop loin* de la cible. Le non-respect de l'objectif de variation de vitesse, ΔV^h , sera perçu en voyant que le véhicule *s'éloigne* ou *se rapproche* de la cible.

contraintes d'un *problème quasi-optimal de commande*, présentée sur la section IV.1.3.3, en l'adaptant au problème particulier des *manœuvres de conduite quasi-optimales*.

Pour l'initialisation du trapèze, nous partirons du profil optimal, $a_{veh}(\underline{\theta}^*, t)$, résultant d'appliquer les paramètres optimaux, J_1^* , J_3^* , a_{ex}^* et τ_2^* , à $\dot{x}_2(\underline{\theta}^*, t)$ de l'équation (2.5). Afin de garder au moins une partie de l'information fournie par l'optimisation, nous maintiendrons les valeurs optimaux d'à-coup, J_1^* et J_3^* tout au long de la manœuvre (et ce indépendamment de la phase où l'on fasse des corrections); cela nous permet également de garantir la continuité du profil d'accélération. On peut dire que l'optimisation nous renseigne sur *le niveau d'agressivité optimal* pour un scénario étudié. Cette *condition de continuité* peut être représentée sous la forme de l'équation (1.20), $M\underline{\theta} = \underline{L}$, comme suit :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_3 \\ a_{ex} \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^* \\ J_3^* \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Il existe un second levier pour exploiter les résultats de l'optimisation. Lors de la détermination de la manœuvre optimale, nous avons un degré de liberté sur l'inter-distance finale, ΔX_f , donnée par (2.25); en revanche, à la fin de l'optimisation, cette distance est fixée à une valeur dépendante des paramètres optimaux, $\Delta X_f(J_1^*, J_3^*, a_{ex}^*, \tau_2^*)$. On peut supposer que, si l'évolution du scénario n'est pas trop importante, cette valeur gardera une pertinence vis-à-vis des critères énergétiques. Ainsi, nous prendrons *l'inter-distance optimale* comme l'un des objectifs cinématiques lors de l'adaptation de la manœuvre aux évolutions du contexte de conduite.

Cette distance est fortement associée au paramètre d_i des équations (1.18) et (1.19) des sections IV.1.3.2 et IV.1.3.3, respectivement, même si elle n'est pas identique⁴. Même s'il existe deux contraintes sur la inter-distance finale (associées aux limites supérieure et inférieure), celles-ci ne peuvent pas être simultanément actives, et donc, elles se traduiront dans la suite de la discussion par une seule équation.

Ci-dessous, nous discuterons la mise à jour des objectifs sur la vitesse et l'inter-distance finales à chaque itération.

3.2.1.1 Condition de respect de la vitesse cible

Tout d'abord, nous porterons notre attention sur l'objectif de vitesse finale. Cependant, pour une manœuvre, il se traduit plus naturellement sous la forme de la variation de vitesse du véhicule hôte, ΔV^h , entre le début et la fin du trapèze d'accélération. Ce sera donc ce paramètre qui décrira l'évolution du contexte au cours du temps; ces évolutions peuvent être associées aux variations de la vitesse du véhicule cible, mais aussi à un suivi

4. En réalité, d'après la formulation de l'écoconduite de la section IV.2.1.3, en considérant la fonction $\hat{f}_1(\underline{\theta})$, donnée par (2.27) on aurait $d_1 = \Delta \hat{X}_{mnv} - \Delta X_f$, et si on prenait $\hat{f}_2(\underline{\theta})$, donnée par (2.28), nous aurions $d_2 = \Delta X_f - \Delta \hat{X}_{mnv}$.

approximatif du profil d'accélération désiré. Ainsi, nous considérerons par la suite que $\Delta V^h [k]$ changera potentiellement à chaque itération, par rapport à la *situation idéale*.

Nous reprendrons ici les équations et la discussion de la section IV.2.1.2, qui considérerait la contrainte sur la vitesse finale dans l'optimisation. Après avoir résolu le problème, l'à-coup des phases initiale et finale ne sont plus des variables; ils ont été figés à J_1^* et J_3^* , respectivement. Ainsi, en partant de l'équation (2.17), ou encore de (2.68), et en appliquant les à-coup optimaux, nous obtenons (3.2). A chaque itération, ayant lieu à l'instant $t = t_k$, l'accélération initiale est donnée par $a_0 [k] = \tilde{a}_{veh} (t_k)$, où \tilde{a}_{veh} correspond à la mesure d'accélération issue des capteurs du véhicule. Nous considérerons pour l'instant que l'accélération est *parfaitement* mesurée, donc $\tilde{a}_{veh} = a_{veh}$.

$$\tau_2 = \left[\Delta V^h [k] - \frac{(a_0 [k])^2}{2 J_1^*} \right] \frac{1}{a_{ex}} - \frac{1}{2} \left(\frac{J_1^* + J_3^*}{J_1^* J_3^*} \right) a_{ex} \quad (3.2)$$

Cette équation peut être exprimée par (3.3). Notez bien que le premier coefficient, α_1 , varie à chaque itération, mais pas le deuxième, α_2 . Ainsi, seulement $\alpha_1 [k]$ devra être mis à jour entre deux itérations.

$$\tau_2 = \alpha_1 [k] \frac{1}{a_{ex}} + \alpha_2 a_{ex} \quad (3.3)$$

avec :

$$\alpha_1 [k] = \left[\Delta V^h [k] - \frac{(a_0 [k])^2}{2 J_1^*} \right] \quad (3.4)$$

$$\alpha_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{J_1^* + J_3^*}{J_1^* J_3^*} \right) \quad (3.5)$$

Pour des scénarios d'accostage derrière un véhicule qui roule à vitesse supposée constante, nous avons $\Delta V^h [k] = \widetilde{\Delta V}_0 (t_k)$, où $\widetilde{\Delta V}_0$ est la mesure courante de la vitesse relative entre les deux véhicules et supposée parfaite dans la suite de ce document. Celle-ci peut être déterminée, par exemple, à l'aide d'une caméra. Pour d'autres situations de conduite, cette valeur doit être obtenue d'une façon adaptée.

3.2.1.2 Condition sur l'inter-distance finale

A présent, nous allons considérer le respect de l'objectif d'inter-distance en fin de manœuvre, ΔX_f . Cette fois-ci, ce paramètre proviendra des résultats de l'optimisation et correspondra donc à l'*inter-distance optimale*, ΔX_f^* , qui restera inchangée au cours des itérations. A partir de (2.22), et en considérant les paramètres issus de l'optimisation (indiqué par une étoile, \star , en exposant) et ceux provenant des capteurs (et donc variant à chaque itération), nous obtenons la condition (3.6). En particulier, l'inter-distance courante, $\Delta X_0 [k] = \widetilde{\Delta X}_0 (t_k)$ peut être mesurée par un radar ou une caméra (encore une fois, nous supposerons une mesure parfaite).

$$\begin{aligned} \Delta X_f^* = & \left[\Delta X_0 [k] - \frac{\Delta V_0 [k] a_0 [k]}{J_1^*} - \frac{(a_0 [k])^3}{3J_1^{*2}} \right] + \left(\frac{J_1^* + J_3^*}{J_1^* J_3^*} \right) \left[\Delta V_0 [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right] a_{ex} \\ & + \left[\Delta V_0 [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right] \tau_2 - \left[\frac{1}{2} \right] a_{ex} \tau_2^2 - \left[\frac{J_3^* + 2J_1^*}{2J_1^* J_3^*} \right] a_{ex}^2 \tau_2 - \left[\frac{(J_1^* + J_3^*)^2 + J_1^* (J_1^* + J_3^*)}{6J_1^{*2} J_3^{*2}} \right] a_{ex}^3 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Cette condition peut être reformulée, en notation condensée, comme présenté ci-dessous. Notez bien que seuls les paramètres β_0 , β_1 et β_2 dépendent des mesures des capteurs, et doivent donc être recalculés à chaque itération.

$$\beta_0 [k] + \beta_1 [k] a_{ex} + \beta_2 [k] \tau_2 + \beta_3 a_{ex} \tau_2^2 + \beta_4 a_{ex}^2 \tau_2 + \beta_5 a_{ex}^3 = 0 \quad (3.7)$$

$$\text{Où :} \quad \beta_0 [k] = \left[\Delta X_0 [k] - \Delta X_f^* - \frac{\Delta V_0 [k] a_0 [k]}{J_1^*} - \frac{(a_0 [k])^3}{3J_1^{*2}} \right] \quad (3.8)$$

$$\beta_1 [k] = \left(\frac{J_1^* + J_3^*}{J_1^* J_3^*} \right) \beta_2 [k] \quad (3.9)$$

$$\beta_2 [k] = \left[\Delta V_0 [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right] \quad (3.10)$$

$$\beta_3 = -\frac{1}{2} \quad (3.11)$$

$$\beta_4 = -\left[\frac{2J_1^* + J_3^*}{2J_1^* J_3^*} \right] \quad (3.12)$$

$$\beta_5 = -\left[\frac{(J_1^* + J_3^*)^2 + J_1^* (J_1^* + J_3^*)}{6J_1^{*2} J_3^{*2}} \right] \quad (3.13)$$

3.2.1.3 Condition globale du respect des objectifs de la manœuvre

En combinant les équations (3.3) et (3.7), nous obtenons une *condition globale*, garantissant le respect de la vitesse et de l'inter-distance finales. Celle-ci est donnée, en notation condensée, par (3.14). Il s'agit d'un polynôme en a_{ex} de quatrième ordre, dont le coefficient associé à a_{ex}^3 est nul.

$$\delta_0 [k] + \delta_1 [k] a_{ex} + \delta_2 [k] a_{ex}^2 + \delta_4 a_{ex}^4 = 0 \quad (3.14)$$

Les différents coefficients du polynôme peuvent être exprimés en fonctions des α_i et β_j , comme présenté sur (3.15)-(3.18). Ceux-ci varient à chaque itération, à l'exception de δ_4 , qui reste constant tout au long des calculs.

$$\delta_0 [k] = \alpha_1 [k] \beta_2 [k] + (\alpha_1 [k])^2 \beta_3 [k] \quad (3.15)$$

$$\delta_1 [k] = \beta_0 [k] \quad (3.16)$$

$$\delta_2 [k] = \beta_1 [k] + \alpha_2 \beta_2 [k] + 2 \alpha_1 [k] \alpha_2 \beta_3 + \alpha_1 [k] \beta_4 \quad (3.17)$$

$$\delta_4 = \alpha_2^2 \beta_3 + \alpha_2 \beta_4 + \beta_5 \quad (3.18)$$

* * *

Nous allons désormais exprimer chaque coefficient en termes des paramètres du scénario. Pour ce faire, nous considérerons dans un premier temps le cas général, où la

cible peut être un objet *générique* de l'infrastructure ou du trafic. Ensuite, nous nous intéresserons au cas particulier des scénarios d'accostage derrière un véhicule roulant à vitesse constante. Dans ce dernier, l'objectif est de finir à la même vitesse que le véhicule cible, donc $V_f^h = V_f^c$; de même, l'hypothèse de vitesse constante de la cible nous dit que $V_f^c = V_0^c$. A partir de ces informations, ce n'est pas difficile de montrer que $\Delta V^h = \Delta V_0$, ce qui permettra de simplifier les équations associées aux coefficients.

Le coefficient δ_0 est donnée dans le cas général par (3.19) et sa valeur varie à chaque itération.

$$\delta_0 [k] = \left[\Delta V^h [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right] \left(\Delta V_0 [k] - \frac{\Delta V^h [k]}{2} + \frac{(a_0 [k])^2}{4J_1^*} \right) \quad (3.19)$$

Si nous devons exécuter un accostage derrière un véhicule, δ_0 est quelque peu simplifié, devenant :

$$\delta_0 [k] = \frac{1}{2} \left[\Delta V_0 [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right]^2 \quad (3.20)$$

Le coefficient δ_1 a la même valeur que $\beta_0 [k]$, indépendamment du type de scénario. Il est donné par (3.21), où nous essayons de mettre à l'évidence la similarité avec les autres coefficients, ce qui peut être exploité pour simplifier les calculs dans une application embarquée.

$$\delta_1 [k] = \Delta X_0 [k] - \Delta X_f^* - \frac{a_0 [k]}{J_1^*} \left[\left(\Delta V_0 [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right) - \frac{(a_0 [k])^2}{6J_1^*} \right] \quad (3.21)$$

L'équation (3.22) permet de calculer δ_2 dans le cas général, à chaque itération.

$$\delta_2 [k] = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{J_1^*} + \frac{1}{J_3^*} \right) \left[\Delta V_0 [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right] - \frac{1}{2J_3^*} \left[\Delta V^h [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right] \quad (3.22)$$

Lors des scénarios d'accostages, l'expression est simplifiée, et devient :

$$\delta_2 [k] = \frac{1}{2J_1^*} \left[\Delta V_0 [k] + \frac{(a_0 [k])^2}{2J_1^*} \right] \quad (3.23)$$

Finalement, le paramètre δ_4 peut être calculé en utilisant (3.24). Étant donné que cette expression dépend uniquement des résultats de l'optimisation, la valeur de δ_4 reste constante entre les différentes opérations, et on peut donc la calculer une fois pour toutes au début de la *phase 1*.

$$\delta_4 = \frac{(J_1^*)^2 - (J_3^*)^2}{24 (J_1^*)^2 (J_3^*)^2} \quad (3.24)$$

3.2.1.4 Mise à jour des paramètres de la manœuvre : cas général

Grâce à la condition généralisée (3.14), mettre à jour la valeur d'accélération stabilisée, a_{ex} revient à trouver *une* racine d'un polynôme d'ordre 4. Le *méthode de Newton* est particulièrement bien adaptée à la résolution de ce type de problème. Pour cela, nous pouvons définir, avec les coefficients associés à chaque itération, la fonction $f(a_{ex})$ comme suit :

$$f(a_{ex}) = \delta_0 + \delta_1 a_{ex} + \delta_2 a_{ex}^2 + \delta_4 a_{ex}^4 \quad (3.25)$$

Et nous pouvons également calculer son gradient :

$$f'(a_{ex}) = \delta_1 + 2\delta_2 a_{ex} + 4\delta_4 a_{ex}^3 \quad (3.26)$$

En utilisant ces deux fonctions, il est possible de définir une *itération de la méthode de Newton* [22], par récurrence, de la forme suivante :

$$a_{ex}^n = a_{ex}^{n-1} + t \Delta a_{ex}^{n-1} \quad (3.27)$$

Où Δa_{ex}^{n-1} correspond au *pas de Newton*, défini par (3.28). Le paramètre t , permet ajuster la variation de la variable à chaque itération et devrait être choisie de manière à renforcer (voire garantir) la convergence ; on pourrait, par exemple, utiliser la règle d'Armijo pour déterminer la valeur de t [11].

$$\Delta a_{ex}^{n-1} = \frac{f(a_{ex}^{n-1})}{f'(a_{ex}^{n-1})} = \frac{\delta_4 a_{ex}^{n-14} + \delta_2 a_{ex}^{n-12} + \delta_1 a_{ex}^{n-1} + \delta_0}{4\delta_4 a_{ex}^{n-13} + 2\delta_2 a_{ex}^{n-1} + \delta_1} \quad (3.28)$$

Pour déterminer une racine de $f(a_{ex})$, il suffit d'appliquer des itérations de Newton jusqu'à se rapprocher suffisamment d'un zéro de la fonction, ce qui peut être vérifié, par exemple, en utilisant le critère (3.29), où ε_a définit la tolérance sur la racine de la fonction.

$$|f(a_{ex})| \leq \varepsilon_a \quad (3.29)$$

3.2.1.5 Mise à jour des paramètres de la manœuvre : cas des manœuvres symétriques

Si l'on décide de privilégier l'exécution des manœuvres symétriques, c-à-d, où $J_1^* = J_3^* = J_s^*$, alors il est possible de déterminer les zéros de $f(a_{ex})$, de manière analytique, donc en une seule itération⁵. En effet, si l'à-coup de la phase initiale est identique à celui de la phase finale, alors, le coefficient du terme à la puissance 4 s'annule, $\delta_4 = 0$. Ainsi, nous aurons juste à déterminer les racines d'un polynôme de deuxième ordre.

En utilisant (3.30) il est donc possible de calculer les valeurs de a_{ex} permettant de respecter simultanément les objectifs de vitesse et d'inter-distance de la manœuvre. En reprenant la notation de la section IV.1.3.3, nous désignerons ce paramètre a_{ex}^\diamond .

$$a_{ex[1,2]}^\diamond [k] = \frac{-\delta_1 [k] \pm \sqrt{(\delta_1 [k])^2 - 4\delta_2 [k] \delta_0 [k]}}{2\delta_2 [k]} \quad (3.30)$$

A partir de ce résultat, nous pouvons déterminer la durée de la phase stabilisée en appliquant (3.31).

$$\tau_{2[1,2]}^\diamond = \alpha_1 [k] \frac{1}{a_{ex[1,2]}^\diamond} + \alpha_2 a_{ex[1,2]}^\diamond \quad (3.31)$$

5. A proprement parler, il est également possible de trouver une solution analytique à un polynôme d'ordre 4 ; en revanche, la procédure est longue et compliqué, rendant probablement plus raisonnable d'utiliser la méthode de Newton.

Nous retiendrons la valeur de a_{ex}^\diamond permettant de respecter les contraintes sur la durée de la manœuvre ou, à défaut, celle qui permettra de s'approcher *au mieux* de ces conditions. Si les deux solutions respectaient les contraintes, alors on pourrait garder celle se rapprochant le plus du résultat précédent.

Il existe deux cas particuliers à considérer, mais ils ne seront pas traités dans ce document, et nous les réserverons aux perspectives de ces travaux. D'une part, il se peut qu'il n'y ait pas de solution réelle positive à τ_2^\diamond ; il est également possible qu'aucune des solutions à a_{ex}^\diamond ne respecte pas les contraintes sur l'accélération. Dans ce cas, un levier à utiliser consiste à modifier la cible d'inter-distance finale, tout en restant à l'intérieur des contraintes (2.26).

3.2.2 Phase 2 : déclenchement de la phase finale

Une fois que les valeurs de $a_{veh}(t_k)$ et celle de a_{ex}^\diamond convergeront, la *Phase 2* de la manœuvre démarrera. A partir de cet instant, la valeur d'accélération sera figée, et nous n'aurons plus qu'un seul levier pour adapter la manœuvre, à savoir, la durée de la phase stabilisée, τ_2 . De ce fait, désormais, nous pourrons garantir le respect d'une seule condition cinématique; en vue de la criticité du respect de chaque objectif, nous privilégierons la condition sur la variation de vitesse. En revanche, nous proposerons un mécanisme de supervision permettant de détecter des écarts trop importants par rapport à la cible d'inter-distance finale.

La Figure 3.5 illustre comment la valeur de τ_2 doit évoluer entre deux itérations pour garantir le respect de la vitesse finale. A chaque pas de temps, nous évaluerons une condition indiquant si, en déclenchant à l'instant la *Phase 3*, on finirait à la vitesse désirée.

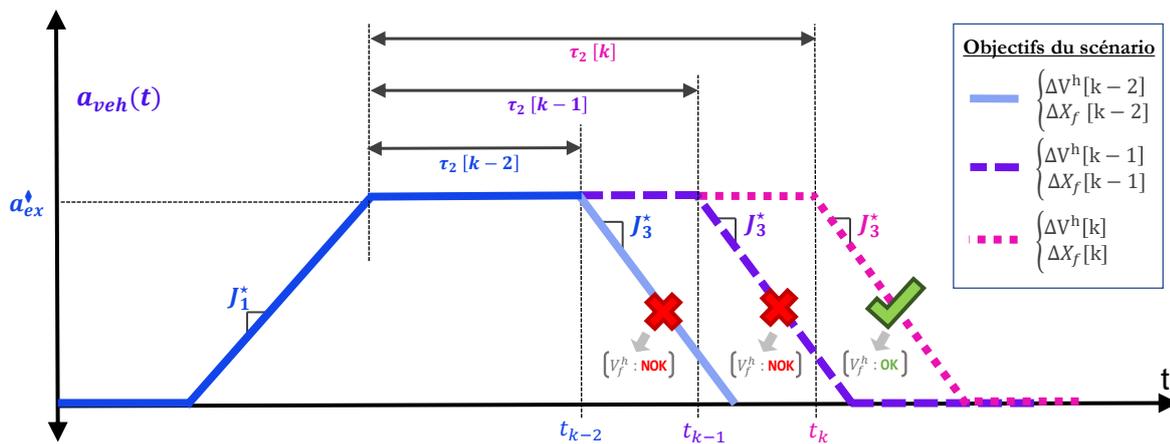


FIG. 3.5 – Phase 2 : évolution de la durée de la phase, τ_2 , pour respecter l'objectif de vitesse, ΔV^h .

Dans un premier temps, nous présenterons une approche simplifiée, qui présuppose un parfait suivi du profil trapézoïdal d'accélération. Ensuite, nous considérerons la prise en compte de l'effet de l'échantillonnage, propre à une application embarquée.

3.2.2.1 Condition de passage à la Phase 3 : approche simplifiée

En supposant que le profil d'accélération sera parfaitement respecté, décider si c'est le moment de déclencher le transitoire final est assez simple. Pour ce faire, nous partirons de la vitesse à l'itération courante, $V_0^h [k]$, et nous déterminerons si, en démarrant *tout de suite* la Phase 3, dont l'à-coup vaut $-J_3^*$ (ou potentiellement $-J_s^*$), on finirait la manœuvre à la vitesse souhaitée. Nous supposons que l'accélération diminuera avec un à-coup constant, $-J_3^*$, jusqu'à devenir nulle. Cela est représenté sur la Figure 3.6.

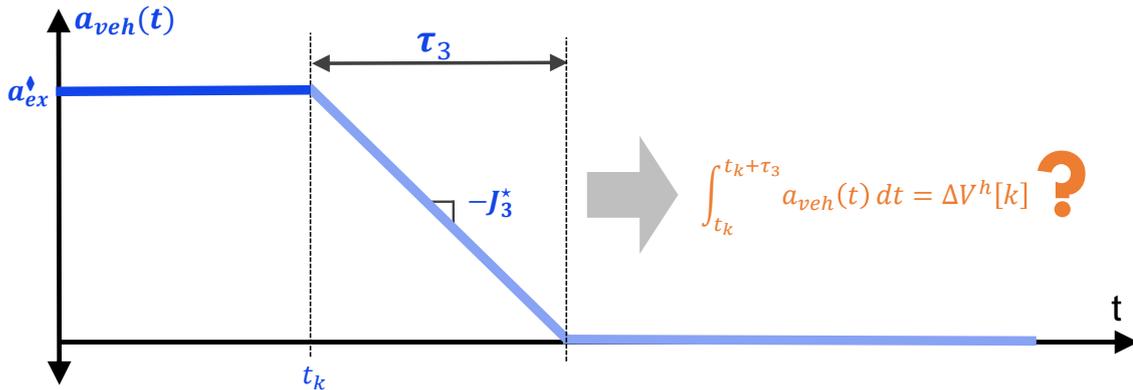


FIG. 3.6 – Notation fin phase 2 - approche simplifiée : évolution continue de l'accélération.

Si la Phase 3 démarrerait à l'itération k , donc à $t = t_k$, alors la vitesse du véhicule hôte, à un instant arbitraire $t = t_k + \tau$, est donnée par (3.32), où $\tau \geq 0$. Afin de simplifier les calculs, l'intégrale est calculé par rapport à la variable $t' = t - t_k$.

$$V^h(t_k + \tau) = V_0^h + \int_0^\tau [a_{ex}^\diamond - J_3^* t'] dt' = V_0^h + a_{ex}^\diamond \tau - \frac{J_3^*}{2} \tau^2 \quad (3.32)$$

En intégrant ce résultat, nous pouvons également déterminer la position instantanée du véhicule hôte :

$$X^h(t_k + \tau) = X_0^h + \int_0^\tau V^h(t') dt' = X_0^h + V_0^h \tau + \frac{a_{ex}^\diamond}{2} \tau^2 - \frac{J_3^*}{6} \tau^3 \quad (3.33)$$

* * *

Nous allons à présent définir une condition permettant de décider si c'est le moment d'amorcer le transitoire final de la manœuvre. Pour ce faire, nous calculerons d'abord la vitesse qu'aurait le véhicule hôte à l'instant final de la manœuvre, $t = t_k + \tau_3$, en déclenchant instantanément la Phase 3. Cela est présenté sur (3.34). La durée nécessaire pour annuler d'accélération vaut $\tau_3 = \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^*}$.

$$V^h(t_k + \tau_3) = V_0^h + a_{ex}^\diamond \tau_3 - \frac{J_3^*}{2} \tau_3^2 = V_0^h + \frac{(a_{ex}^\diamond)^2}{2J_3^*} \quad (3.34)$$

La phase finale devrait commencer au moment où $V^h(t_k + \tau_3) \approx V_f^h$, c'est-à-dire, quand la vitesse finale du véhicule serait *suffisamment proche* de la cible de vitesse définie pour le scénario étudié, V_f^h . Dans le cas général, cela peut se faire en comparant la mesure courante de vitesse du véhicule hôte avec un calcul basé sur des paramètres du scénario ou de la manœuvre, comme montré sur (3.35).

$$V_0^h [k] \approx V_f^h - \frac{(a_{ex}^\diamond)^2}{2J_3^*} \quad (3.35)$$

Si nous avons à faire à un scénario d'accostage derrière un véhicule à vitesse constante, et que nous avons donc $\Delta V^h = \Delta V_0$, alors nous pouvons utiliser la condition (3.36), basée sur la mesure de vitesse relative.

$$\Delta V_0 [k] \approx \frac{(a_{ex}^\diamond)^2}{2J_3^*} \quad (3.36)$$

Ainsi, la *condition de transition* vers la Phase 3 présentée sur la Figure 3.3, b_{ph2} , peut être définie par (3.37), où ε_3 représente une tolérance sur la vitesse finale.

$$b_{ph2} = \left[\left[\Delta V_0 [k] - \frac{(a_{ex}^\diamond)^2}{2J_3^*} \right] \leq \varepsilon_3 \right] \quad (3.37)$$

* * *

Afin de déterminer une condition permettant de contrôler le respect d'une distance acceptable en fin de manœuvre nous pouvons, en partant de (3.33), déterminer la potentielle position finale du *véhicule hôte*, comme suit :

$$X^h (t_k + \tau_3) = X_0^h + V_0^h \tau_3 + \frac{a_{ex}^\diamond}{2} \tau_3^2 - \frac{J_3^*}{6} \tau_3^3 = X_0^h + \frac{V_0^h a_{ex}^\diamond}{J_3^*} + \frac{(a_{ex}^\diamond)^3}{3 (J_3^*)^2} \quad (3.38)$$

La position de la cible, qui roule à vitesse constante, est donnée par (3.39). Si la cible fait partie de l'infrastructure (p.ex. un feu tricolore), alors il suffit de prendre $V_0^c = 0$.

$$X^c (t_k + \tau_3) = X_0^c + V_0^c \tau_3 = X_0^c + \frac{V_0^c a_{ex}^\diamond}{J_3^*} \quad (3.39)$$

Ainsi, si on amorçait la phase finale à $t = t_k$, l'inter-distance à la fin de la manœuvre, $\Delta X (t_k + \tau_3)$, vaudrait :

$$\begin{aligned} \Delta X (t_k + \tau_3) &= X^c (t_k + \tau_3) - X^h (t_k + \tau_3) \\ &= \Delta X_0 [k] + \Delta V_0 [k] \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^*} - \frac{(a_{ex}^\diamond)^3}{3 (J_3^*)^2} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Ainsi, nous pouvons définir des limites supérieure et inférieure d'inter-distance, $\Delta \check{X}_{crit}$ et $\Delta \hat{X}_{crit}$, comme montré sur (3.41), pour le cas d'un accostage⁶. Tant que la position *prédite* du véhicule restera à l'intérieur de ces valeurs, nous pourrons considérer que le fait de déclencher la phase finale est sécurisé. En revanche, si la condition n'était pas respectée, alors il faudrait prendre une action différente comme, par exemple, démarrer une nouvelle manœuvre trapézoïdale en partant de l'accélération courante. C'est probablement ce qu'un conducteur humain ferait.

$$\Delta \check{X}_{crit} \leq \Delta X_0 [k] + \Delta V_0 [k] \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^*} - \frac{(a_{ex}^\diamond)^3}{3 (J_3^*)^2} \leq \Delta \hat{X}_{crit} \quad (3.41)$$

6. Pour adapter la condition à d'autres types de scénario, il suffit de modifier la provenance des variables, en utilisant les informations qui seraient disponibles.

Pour le choix des limites d'inter-distance, on pourrait prendre simplement les mêmes valeurs que pour le problème d'optimisation, $\Delta\check{X}_{mnv}$ et $\Delta\hat{X}_{mnv}$. En revanche, il peut être intéressant de prendre des valeurs plus contraignantes (c-à-d, avoir moins de *marge de manœuvre*) lors du calcul de l'optimisation, afin d'avoir une certaine *marge de tolérance* sur l'adaptation du profil en temps réel. Cette approche permettrait notamment d'améliorer la robustesse de l'algorithme.

3.2.2.2 Condition de passage à la Phase 3 : prise en compte de l'échantillonnage

Comme mentionné précédemment, dans un système embarqué les signaux n'évoluent pas de manière continue, mais à des intervalles réguliers, ayant donc un effet d'échantillonnage. De ce fait, il peut y avoir un écart entre l'accélération issue du *profil théorique* et la consigne pouvant être effectivement générée par un ordinateur. Cela engendre une certaine imprécision dans la variation de vitesse du véhicule hôte. Nous pouvons espérer que, si la valeur du pas de temps, Δt , est suffisamment petite, alors ce phénomène aura peu d'impact. Toutefois, vu l'enjeu associé au respect de la vitesse ciblée, nous proposons sur l'Annexe VIII un mécanisme permettant d'améliorer la précision dans la décision de déclencher la fin de la manœuvre.

Les résultats de l'annexe montrent que, lors d'un scénario d'accostage derrière un véhicule à vitesse constante, la nouvelle *condition de transition* vers la Phase 3, b_{ph2} , est celle donnée par (3.42), où ε_3 représente une tolérance sur la vitesse finale.

$$b_{ph2} = \left[\left| \Delta V_0 [k] - \left[\frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right] \Delta t \left(a_{ex}^\diamond - \frac{J_3^* \Delta t}{2} \right) + \left(\left[\frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^2 \frac{J_3^* \Delta t^2}{2} \right| \leq \varepsilon_3 \right] \quad (3.42)$$

De même, concernant le maintien d'une inter-distance acceptable, il faudrait veiller au respect de la condition (3.43). Si celle-ci ne pouvait pas être respectée, alors il serait nécessaire, d'appliquer une action corrective. Cela sort du périmètre de notre étude.

$$\Delta\check{X}_{crit} \leq \Delta X_0 [k] + \left[\frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right] \left[\Delta V_0 [k] + \frac{J_3^* \Delta t^2}{12} \right] \Delta t - \left(\left[\frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^2 \left[\frac{a_{ex}^\diamond}{2} - \frac{J_3^* \Delta t}{3} \right] \Delta t^2 + \left(\left[\frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^3 \left[\frac{J_3^*}{6} \right] \Delta t^3 \leq \Delta\hat{X}_{crit} \quad (3.43)$$

Dans des cas où il ne serait pas possible d'atteindre la vitesse cible tout en respectant une distance de sécurité acceptable, une première possibilité consisterait à enlever la contrainte de symétrie des trapèzes, et donc d'utiliser une valeur de J_3 permettant de respecter la condition d'inter-distance. Cet aspect sera réservé aux perspectives de nos travaux.

3.2.3 Phases 3 et 0 : fin de la manœuvre et maintien de la vitesse stabilisée

Une fois la phase finale de la manœuvre trapézoïdale entamée, il ne restera plus de degré de liberté permettant d'adapter le comportement du véhicule. Celui-ci subira ce qui aura été préalablement décidé. Cependant, du fait de la faible durée de ce dernier transitoire, ainsi que de la *parcimonie* propre aux environnements de conduite, ce phénomène

devrait avoir un impact moindre sur la *qualité* des manœuvres. Le mot « parcimonie » indique le fait que, sauf exceptions, le comportement des autres véhicules est plutôt prévisible et leurs accélérations sont relativement modérées la plupart du temps.

Il est tout de même important de contrôler les écarts par rapport aux objectifs de la manœuvre. Pour ce faire, nous pouvons utiliser les conditions (3.41) où (1.84), en remplaçant a_{ex}^\diamond par la valeur courante d'accélération. Dans le cas d'un non respect d'une distance acceptable, il sera possible de déclencher un nouveau trapèze d'accélération (ce qui rappelle le comportement des conducteurs humains).

* * *

Une fois qu'on sera *suffisamment proche* d'une accélération nulle ($|a_{veh}(t)| \leq \varepsilon_0$), une nouvelle *Phase 0* commencera. Tant qu'on restera sur dans cette phase, un système de commande doit être activé afin de maintenir le véhicule au voisinage de la vitesse voulue, tout en respectant la distance par rapport à la cible. Cela correspond au comportement classique des RVA lors des *situations stabilisées de conduite*. Il n'est donc pas nécessaire de développer davantage cette partie.

Cette dernière phase de régulation permet de rendre robuste le comportement du véhicule face à des écarts dus aux imprécisions résiduelles dans le suivi du profil d'accélération où aux variations du contexte de conduite. Les actions du véhicule dans ce mode de fonctionnement ne seraient pas perçues comme des *événements*, mais plutôt comme des variations « continues »; c'est pourquoi on peut considérer que le véhicule aura un comportement *relativement stabilisé*. Ainsi, la discussion de la section II.2.1 peut nous renseigner sur le respect de l'agrément de conduite tout au long de cette phase.

Si on détectait un nouvel événement de conduite, dû au trafic ou à l'infrastructure, ou si l'écart de vitesse ou de distance avec le véhicule cible devenait trop important, alors nous pourrions démarrer une nouvelle manœuvre de conduite. Pour cela, il suffirait de déterminer le trapèze optimal permettant de répondre au nouveau scénario et, ensuite, d'activer le fanion⁷ de démarrage des manœuvres, $b_{mnv} = \text{vrai}$ (cf. Fig. 3.3).

3.3 RÉSULTATS SUR UN SCÉNARIO RÉEL

Objectif de la section

Appliquer l'algorithme que nous venons de décrire à des données issues d'un scénario réel de conduite.

A présent nous allons tester l'algorithme de gestion cinématique des manœuvres sur des données issues d'un scénario réel. Nous allons utiliser, bien sûr, le même scénario qui a été présenté sur la section IV.2.3. En revanche, nous n'appliquerons pas la correction propre au cas idéal (cf. section IV.2.3), mais nous optimiserons plutôt à partir des informations qui auraient été disponibles *en début du scénario*. Cette approche nous permettra

7. En anglais : *flag*.

donc d'avoir une idée de la perte de potentiel de gain associée aux imprécisions dans l'estimation du futur.

Le Tableau 3.1 reprend les informations fournies par les capteurs du véhicule, présentées sur la section IV.2.3. Néanmoins, cette fois-ci, le tableau de droite présente les paramètres de la *manœuvre symétrique optimale*, obtenus en utilisant le modèle physique et les données brutes qui étaient à disposition du véhicule en début de la manœuvre. Ce sont donc des résultats de nature *causale*, ne dépendant pas des informations futures, et donc compatibles avec une implémentation de type *temps-réel*.

Début Mnv.		Fin Mnv.		Paramètre Mnv Opt	
t_0	35.96 s	t_f	44.16 s	τ_1^*	0.2679 s
V_0^h	27.8056 m/s	V_f^h	26.1306 m/s	τ_2^*	6.5841 s
V_0^c	25.7500 m/s	V_f^c	25.5056 m/s	τ_3^*	0.2679 s
ΔX_0	26.63 m	ΔX_f	19.63 m	J_s^*	-1.1200 m/s ³
ΔV_0	-2.063 m/s	ΔV_f	-0.625 m/s	a_{ex}^*	-0.30 m/s ²
				ΔX_f^*	19.3194 m

TAB. 3.1 – Mesures des paramètres au début et à la fin du scénario, et paramètres de la manœuvre optimale, basés sur les informations au début de la manœuvre (système causal).

La Figure 3.7 présente les résultats de l'optimisation, basée sur le *modèle physique* (cf. section III.1.2.2), en utilisant la formulation du problème avec des manœuvres symétriques (cf. section IV.2.2.2). Nous pouvons voir que, tout comme dans le *cas idéal*, on privilégie une faible décélération et une forte valeur d'à-coup ; en revanche, dans le cas présent ce n'est plus la limite basse d'inter-distance qui a été le facteur le plus contraignant, mais c'est la contrainte d'accélération maximale (2.38) qui a été activée. L'accélération stabilisée optimale correspond donc à la limite haute d'accélération, $a_{ex}^* = \hat{a}_{mnv} = -0.3m/s^2$. Une situation analogue s'est produite concernant l'à-coup, où le paramètre optimal de la manœuvre prend la valeur de la limite basse, $J_s^* = \check{J}_{mnv} = -1.12m/s^3$.

La Figure 3.8 présente les résultats du gestionnaire de manœuvres adaptant « en temps réel » le trapèze aux évolutions du scénario de conduite. Nous pouvons voir sur la Figure 3.8a que le trapèze effectivement appliqué possède une décélération stabilisée légèrement plus importante que celui issu de *l'optimisation causale*, dont on disposait tout au début de la manœuvre. Nous voyons également que la durée de la phase stabilisée du trapèze a été considérablement allongée pour compenser une légère décélération du véhicule cible (ayant lieu un peu après $t = 3s$).

La Figure 3.8b montre que, même si le trapèze initial (*causal*) n'aurait pas permis de finir à la même vitesse que la cible, celui-ci a été pertinemment adapté grâce au *gestionnaire de manœuvres*. La Figure 3.8c met en évidence le fait que l'inter-distance finale issue du gestionnaire est légèrement plus importante que celle supposée lors de l'optimisation causale. Dans le cas présent, cela n'est pas un problème car l'inter-distance n'est pas le facteur limitant de ce scénario. En revanche, dans des cas où elle le serait, il existe le risque

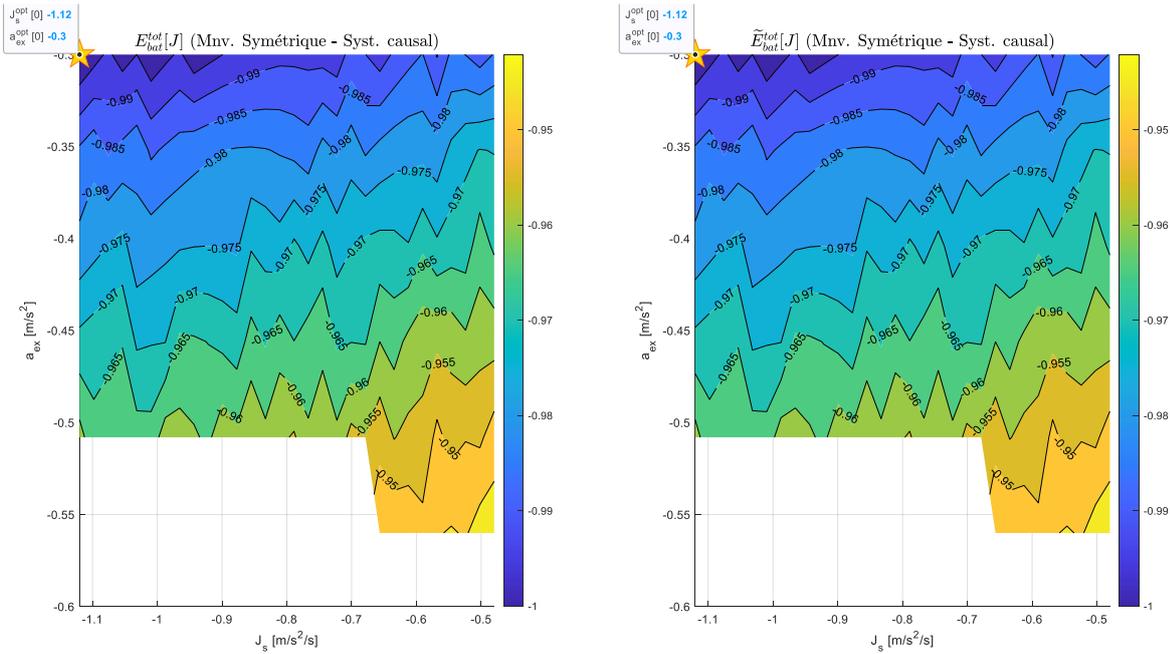


FIG. 3.7 – Résultats de l’algorithme d’optimisation pour des manœuvres symétriques, en utilisant le modèle physique, en se basant uniquement sur les mesures d’un scénario réel au début de la manœuvre (système causal). (a) Résultats sans la contrainte sur la durée de la manœuvre, E_{mnv}^{corr} ; (b) Résultats après l’application de la contrainte sur la durée de la manœuvre, \tilde{E}_{mnv}^{corr} .

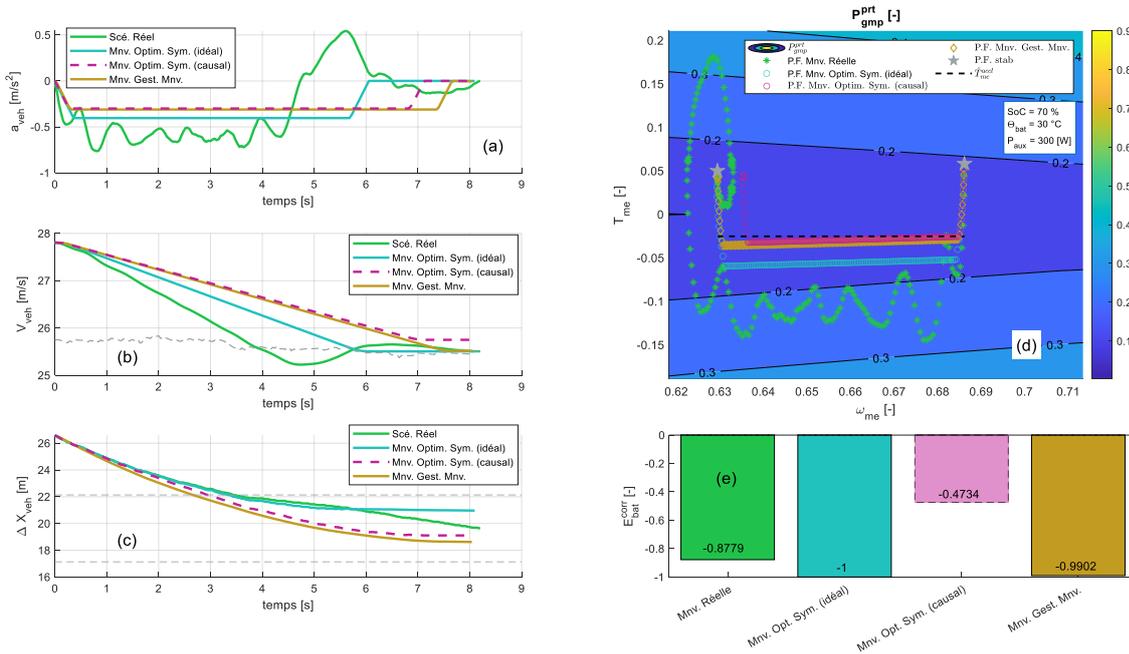


FIG. 3.8 – Évaluation des résultats : application du gestionnaire des manœuvres. (a) Accélération du véhicule; (b) vitesse; (c) inter-distance; (d) points de fonctionnement sur la cartographie du GMP (en unités normalisées); (e) consommation globale normalisée à iso-distance. Le carré en pointillé du graphique (e) indique que cette consommation n’est pas comparable avec les autres dans la mesure où l’état final du véhicule n’est pas le même que pour les autres manœuvres; en effet, cette manœuvre ne tient pas compte de l’évolution du scénario.

de finir *plus près* ou *plus loin* de la cible que prévu ; dans ces situations, il serait pertinent de *prendre de la marge*, en utilisant de limites d'inter-distance pour le problème d'optimisation, $\Delta\check{X}_{mno}$ et $\Delta\hat{X}_{mno}$, plus contraignantes que celles du gestionnaire des manœuvres, $\Delta\check{X}_{crit}$ et $\Delta\hat{X}_{crit}$, comme il a été discuté dans la section IV.3.2.2.

Le lecteur aura peut-être constaté également, sur la Figure 3.8c, que l'inter-distance finale issue de la manœuvre optimale du cas *idéal* n'est pas la même que celle obtenue lors de l'optimisation. En effet, sur la Figure 2.10c, associée au *cas idéal*, le véhicule hôte finissait à la limite basse du *couloir d'inter-distance*, alors que dans le *cas réel*, on finit avec une séparation bien plus importante entre les deux véhicules. Cela est dû au fait que l'hypothèse de vitesse constante du véhicule cible n'est plus valable ; comme la cible roulait plus vite que prévu en début de manœuvre, la distance entre les deux véhicules a diminué moins vite que prévu. Si l'algorithme d'optimisation *l'avait su*, alors il aurait pu choisir une décélération plus faible pour diminuer d'avantage les pertes, tout *en sachant* que la distance serait respectée à la fin. Cet exemple met en évidence que **la manœuvre optimale pour le cas idéal, n'est pas forcément optimale dans le cas réel.**

La Figure 2.10d suggère que les points de fonctionnement associés au gestionnaire de manœuvres, produisent moins de pertes que ceux de la solution au problème optimal, dans le cas idéal. Ceci semble être confirmé par la Figure 2.10e qui indique une plus faible consommation pour le trapèze issu de la gestion cinématique. Ainsi, la méthode d'adaptation des manœuvres proposée semble avoir indirectement un effet bénéfique de point de vue énergétique, du moins dans le cas où le véhicule cible réduit sa vitesse pendant le scénario.

En outre, la manœuvre résultante de *l'optimisation causale*, se traduit par une bien plus faible quantité d'énergie régénérée dans la batterie que pour toutes les autres manœuvres. Toutefois, cette valeur ne peut pas être comparée aux autres, dans la mesure où la vitesse finale correspondante est plus importante que dans les autres manœuvres ; la condition d'iso-variation de l'énergie cinétique n'est donc pas respectée dans ce cas. Nous rappelons que cette manœuvre résulte des informations qui étaient disponibles *en début de manœuvre*, et ne tient donc pas compte des évolutions du scénario de conduite.

3.4 GÉNÉRATION DES CONSIGNES AUX ACTIONNEURS : ACTION PROCÉDURALISÉE

Objectif de la section

En appliquant des principes propres à la procéduralisation, proposer une structure de commande bas niveau capable de générer une consigne pour les actionneurs du véhicule, permettant d'exécuter un trapèze d'accélération, en temps réel.

Jusqu'à présent, nous avons présenté une méthodologie permettant de générer une consigne d'accélération capable de réduire la consommation du véhicule, tout en adaptant, en temps-réel, le comportement de celui-ci aux évolutions de l'environnement de conduite. Cette manœuvre devrait de même garantir le respect de l'agrément de conduite. Cependant, pour pouvoir avoir les effets bénéfiques, tant sur le plan énergétique que sur les aspects ergonomiques, il est nécessaire de pouvoir exécuter le trapèze d'accélération sur le véhicule, *sans le déformer de manière significative*. Dans cette section, nous proposerons une méthodologie de commande permettant de le faire ; comme dans les autres parties de l'algorithme, celle-ci s'inspire d'un aspect de la cognition humaine : dans ce cas, la *procéduralisation*.

Tel qu'il a été présenté sur les sections I.1.5.2.2 et IV.1.1, au fur et à mesure qu'un humain acquière de l'expérience dans l'exécution d'une tâche, il fera de moins en moins appel à de la *connaissance déclarative* (lui permettant de décrire avec du langage ses actions) et il adoptera plutôt une *connaissance procédurale* (ne lui permettant d'expliquer ses actions que par le biais de la démonstration). Ce phénomène est connu sur le nom de *procéduralisation*.

Grâce à ce phénomène, l'exécution de la tâche devient *automatique*, et elle demandera donc beaucoup moins d'effort. Aussi, les informations exploitées par l'humain, seront moins facilement associables à des concepts abstraits, et elles seront plus exploitées dans leurs aspects spatio-temporels. Certains chercheurs ne se sont pas abstenus d'associer ce phénomène à la notion des *signaux*⁸ [174].

3.4.1 Structure de la commande d'accélération

En reprenant ces idées, nous pouvons imaginer un système de commande exploitant une connaissance préalable du système, sous forme d'équations physiques, pour déterminer la consigne à solliciter aux actionneurs afin d'obtenir l'accélération souhaitée. Ce principe a déjà été proposé par d'autres chercheurs et a même été associé à la cognition [17, 27].

Pour notre application, concernant la propulsion d'une automobile, l'actionneur, une machine électrique, peut produire un couple demandé (traduit par une force à la roue). Il est donc possible d'inverser les équations dynamiques du système, afin de déterminer la force à appliquer pour obtenir l'accélération souhaitée. Cette notion a déjà été introduite dans la section IV.1.3.3, et décrite dans le cas général par (1.24). Cette équation peut être reformulée comme montré sur (3.44), pour l'adapter à la commande d'un véhicule, grâce aux modèles des sections III.1.1.1.1 et III.1.1.1.2. Sur l'équation, $a_{veh}^{\diamond}(t) = a_{veh}^{sp}(\theta^{\diamond}(t), t)$ est la sortie du *gestionnaire des manœuvres*, $\tilde{V}_{veh}(t)$ est une mesure instantanée de la vitesse du véhicule et $\tilde{\alpha}_r$ est une estimation de la pente, supposée constante tout au long de la manœuvre. Nous avons fait aussi l'hypothèse que la vitesse de l'air est nulle, $V_{air} = 0$ et

8. Il faut indiquer que la manière de représenter l'information dans le cerveau fait l'objet d'un fort débat au sein des sciences cognitives [9].

avons pris $F_{aut} = 18\text{N}$ pour représenter le phénomène de léchage dans les freins et les coussinets.

$$u\left(\underline{\theta}^\diamond(t), \underline{\mathbf{x}}^\diamond(t), t\right) = \beta^{-1}\left(\underline{\dot{\mathbf{x}}}^\diamond(t) - \alpha\left(\underline{\mathbf{x}}^\diamond(t)\right)\right)$$

$$T_{me}^{bo}\left(\underline{\theta}^\diamond(t), \tilde{V}_{veh}(t), \tilde{\alpha}_r, t\right) = \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} \begin{bmatrix} M_{veh}^{eq} a_{veh}^\diamond(t) + M_{veh} g \left[\sin \tilde{\alpha}_r + c_r \left(\tilde{V}_{veh}(t) \right) \cos \tilde{\alpha}_r \right] \\ + \frac{1}{2} SCx \rho_{air} \tilde{V}_{veh}(t)^2 + F_{aut} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

* * *

Pour revenir aux aspects cognitifs, lorsqu'un *expert* dans une certaine tâche doit l'exécuter dans un contexte *légèrement perturbé* par rapport à celui auquel il est habitué, il lui suffit en général de faire juste un effort supplémentaire, de se concentrer un peu plus, et il arrivera à le faire de manière *presque* aussi bonne que dans des conditions normales. Par exemple, un guitariste serait un peu perturbé s'il devait jouer avec une guitare d'emprunt : la distance entre les frettes⁹ ne sera pas la même, ni la tension des cordes ; toutefois, en se concentrant, il ne devrait pas avoir de problème à jouer des morceaux qu'il connaît déjà. Aussi, lorsqu'on doit conduire un véhicule de location, il y a une période d'adaptation à la nouvelle boîte de vitesse et au moteur, pendant laquelle il faudra *tendre l'oreille* et faire plus d'attention à la route. Ces exemples mettent en évidence la capacité chez les êtres humains, de tirer partie de leurs retours sensoriels pour *s'adapter aux perturbations* lors de l'exécution d'une tâche. Il ne faut pas un grand effort pour faire l'analogie entre ce qui se passe chez les êtres humains, et les systèmes de commande en boucle fermée.

Dans notre cas d'étude, l'utilisation d'une action de commande en boucle fermée pourrait compenser des imprécisions du modèle et dans les mesures, et permettrait de rendre robuste le système face à des perturbations, comme des variations de la pente non-mesurées. Au total, notre système de commande combinerait une partie en boucle ouverte¹⁰ (que nous venons de présenter) et une partie en boucle fermée.

D'autres chercheurs ont déjà proposé des systèmes de commande intégrant des parties en boucle ouverte et en boucle fermée pour la commande cinématique longitudinale des véhicules électriques [213]. Toutefois, compte tenu des spécificités de notre problème, en particulier la prise en compte des contraintes sur l'à-coup, il nous semble nécessaire de proposer une architecture de commande adaptée. Pour ce faire, nous reprendrons le formalisme qui a été présenté, de manière générique, sur la section IV.1.3.4.

Étant donné que nous avons un commande en couple, $T_{me}\left(\underline{\theta}^\diamond(t), t\right)$, si sa valeur présentait des variations trop brusques, cela se traduirait par des niveaux d'à-coup importants ; il faut donc un correcteur générant uniquement des variations progressives à sa sortie. En outre, ce serait souhaitable d'avoir un mécanisme de *mémoire*, permettant de s'adapter aux imperfections du modèle. Ces deux caractéristiques sont bien représentatives de l'une des structures de commandes les plus classiques : *le correcteur intégral*. En effet, du fait que celui intègre l'erreur courante, sa valeur ne peut changer que de manière continue ; de même, lorsque la consigne est nulle, c'est-à-dire, pendant les phases stabili-

9. C-à-d, les petites barres métalliques dans le manche.

10. Paradoxalement, l'anglicisme est plus parlant, lorsqu'il s'agit de ce type de commande : *feedforward*.

sées de la conduite, elle pourrait garder une valeur permettant de compenser les erreurs de modèle de la partie en boucle ouverte.

En partant des équations (1.25) et (1.26), nous pouvons donc définir le terme en boucle fermée comme montré sur (3.45), où \tilde{a}_{veh} est une mesure de l'accélération courante, et k_I est une constante qui sert de levier de calibration et a pour vocation de garantir le respect des contraintes sur le couple.

$$u^{bf}(\dot{\mathbf{x}}^\diamond(t), \dot{\mathbf{x}}_m(t), t) = T_{me}^{bf}(a_{veh}^\diamond(t), \tilde{a}_{veh}(t), t) = k_I \int_{t_0}^t (a_{veh}^\diamond(t) - \tilde{a}_{veh}(t)) dt \quad (3.45)$$

Ainsi, rassemblant les deux termes, la consigne totale de couple aux actionneurs, T_{me}^{act} serait :

$$\begin{aligned} T_{me}^{act}(a_{veh}^\diamond(t), \tilde{a}_{veh}(t), t) &= T_{me}^{bo}(a_{veh}^\diamond(t), \tilde{V}_{veh}(t), \tilde{\alpha}_r, t) + T_{me}^{bf}(a_{veh}^\diamond(t), \tilde{a}_{veh}(t), t) \\ &= \frac{R_{roue}}{r_{trsm}} \left[M_{veh}^{eq} a_{veh}^\diamond(t) + M_{veh} g \left[\sin \tilde{\alpha}_r + c_r \left(\tilde{V}_{veh}(t) \right) \cos \tilde{\alpha}_r \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} SCx \rho_{air} \tilde{V}_{veh}(t)^2 + F_{aut} \right] \\ &\quad + k_I \int_{t_0}^t (a_{veh}^\diamond(t) - \tilde{a}_{veh}(t)) dt \\ &\quad * * * \end{aligned} \quad (3.46)$$

La Figure 3.9 représente la structure de commande que nous venons de proposer. Sur le diagramme, certains choix d'architecture fonctionnelle ont été faits, en particulier que l'accélération et la vitesse soient obtenues avec des capteurs *potentiellement* indépendants, et que l'estimation de la pente soit obtenue à partir de la navigation du véhicule. Cependant, ces choix ne sont point imposés, et d'autres sources d'informations sont parfaitement compatibles avec notre algorithme.

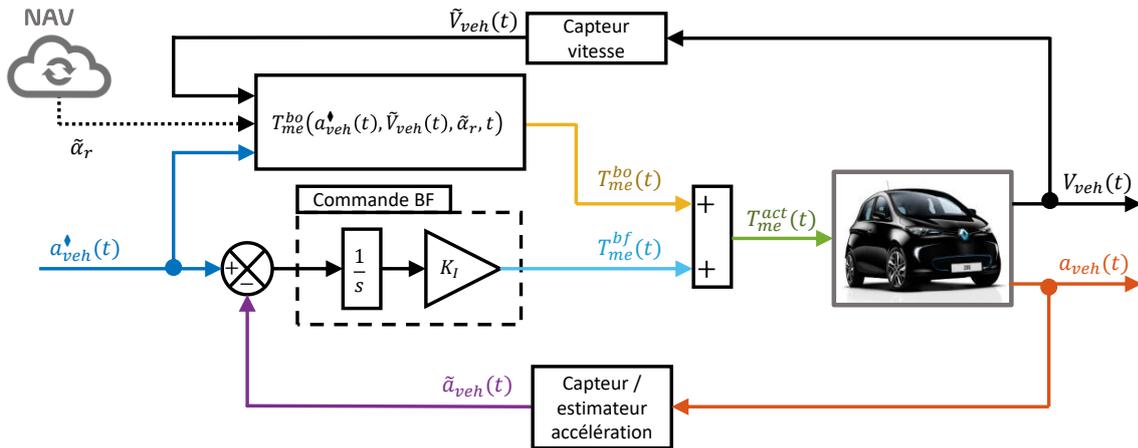


FIG. 3.9 – Génération des consignes aux actionneurs : structure de commande compatible avec le respect de l'agrément de conduite.

3.4.2 Performance de la commande en simulation

Nous allons à présent étudier le comportement du mécanisme de génération des consignes aux actionneurs, sur notre scénario issu d'un roulage réel. Pour ce faire, il a

été nécessaire de prendre en considération le fait que notre système ne peut pas répondre instantanément à une demande de couple. En effet, il existe deux phénomènes associés à cette limitation : d'une part, la physique de la machine électrique se traduit par une certaine latence dans la génération du couple, mais celle-ci est assez faible, en général. D'autre part, il existe un *filtre logiciel* à l'intérieur du calculateur du véhicule, visant à favoriser l'agrément de conduite et protéger les différents organes, en évitant des variations de couple trop brutales. En représentant chacun de ces phénomènes par un système de premier ordre, il est possible de modéliser la dynamique de couple du véhicule grâce à un *système linéaire de deuxième ordre*, comme montré sur (3.47), en utilisant le formalisme de Laplace. Sur l'équation, T_{me}^{act} correspond à la *consigne de couple* généré par le système de commande, et T_{me}^{eff} au *couple effectif* généré par la motorisation ; τ_{me} représente la constante de temps de la motorisation électrique, et τ_{log} celle du filtre logiciel. En général, la dynamique de la motorisation est suffisamment rapide pour pouvoir être négligée.

$$G(s) = \frac{T_{me}^{eff}(s)}{T_{me}^{act}(s)} = \left(\frac{1}{(1 + \tau_{me}s)} \right) \cdot \left(\frac{1}{(1 + \tau_{log}s)} \right) \quad (3.47)$$

La Figure 3.10 présente les résultats de l'application de notre algorithme complet, sous l'hypothèse que les différents capteurs (ou sources d'informations) restituent parfaitement les valeurs des grandeurs physiques. Les résultats sont assez satisfaisants : la Figure 3.10a montre que la vitesse suit de manière presque parfaite la valeur souhaitée¹¹ ; de même, mise à part un léger retard dû à la dynamique du système, la consigne d'accélération en provenance du gestionnaire des manœuvres est adéquatement respectée (Figure 3.10b). L'accélération positive après $t = 8s$, résulte du fonctionnement de type RVA associé à la *Phase 0*. Sur la Figure 3.10c, nous constatons que la valeur d'à-coup reste dans des limites acceptables tout au long du scénario. Nous pouvons donc être assez optimistes sur le fait que la manœuvre respecte l'agrément de conduite.

La Figure 3.10d présente les consignes de couple et sa valeur effectivement appliquée. Nous pouvons voir que la consigne de couple envoyée à l'actionneur, T_{me}^{act} , dépend principalement de la composante en boucle ouverte, T_{me}^{bo} . Cependant, l'apport du terme propre à la boucle fermée, T_{me}^{bf} , n'est pas négligeable : il semble améliorer le suivi de l'*à-coup théorique*, en compensant la dynamique du couple ; en revanche, il induit aussi un léger dépassement de la *valeur théorique d'accélération*, mais celui-ci ne devrait pas poser problème dans la mesure où son amplitude et sa durée sont assez faibles.

La Figure 3.11 présente les résultats de l'algorithme complet, en les comparant aux sorties d'autres parties de l'algorithme, appliquées de manière indépendante, et au roulage réel. Nous pouvons voir sur la Figure 3.11a que le profil d'accélération exécuté est assez proche de celui que le gestionnaire de manœuvres aurait généré si l'accélération avait été parfaitement appliquée. Il existe une petite accélération supplémentaire, après la fin du trapèze, permettant de compenser un écart dans la vitesse. Cette ré-accélération se traduira par une légère sur-consommation ; en revanche, son amplitude est assez faible en

11. Dans ce cas, la légende « Consigne » indique qu'il s'agit de l'intégrale de la consigne d'accélération.

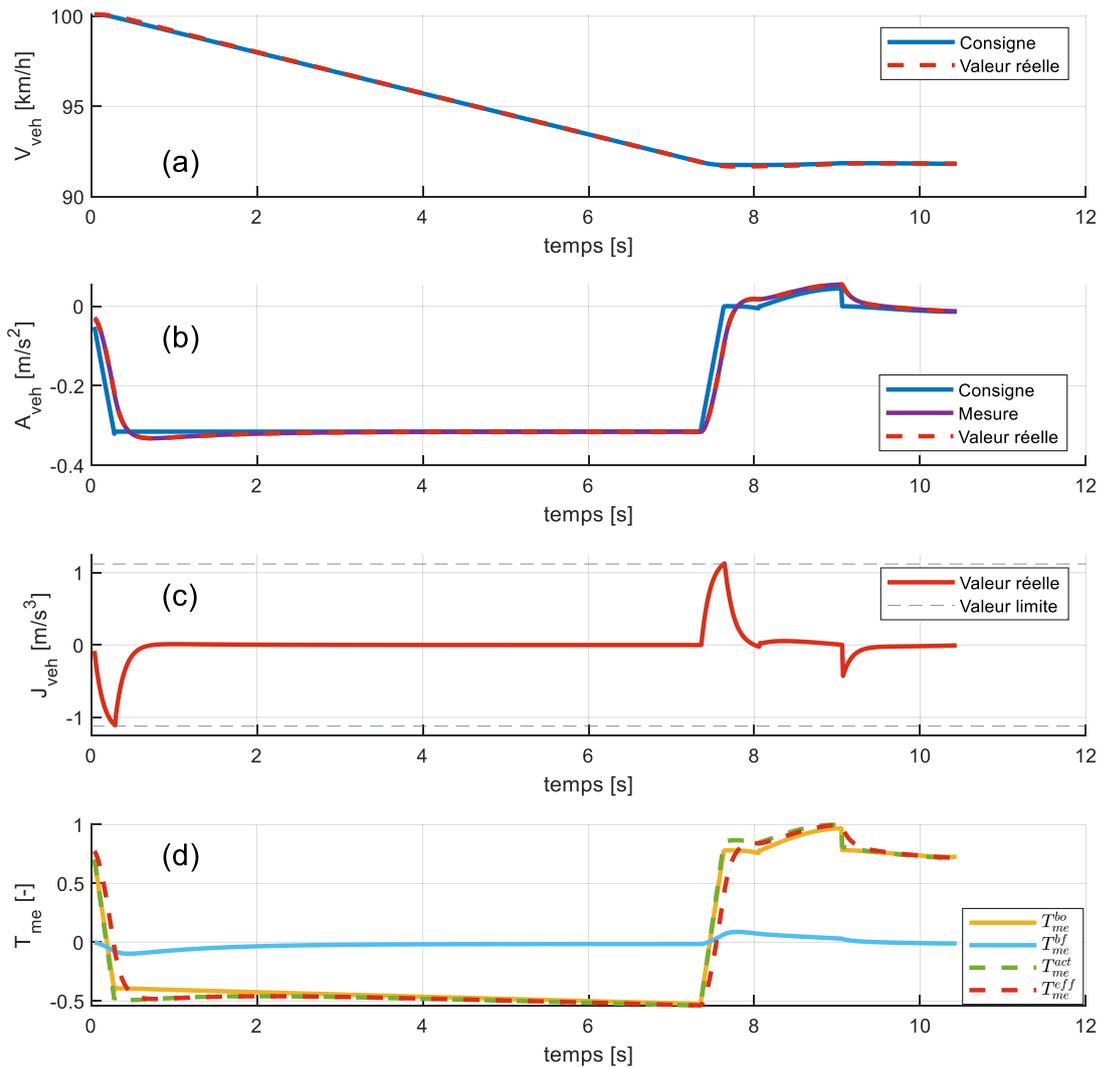


FIG. 3.10 – Signaux résultant de l’algorithme complet d’exécution de manœuvres (écologiques), en supposant des mesures parfaites. (a) Vitesse du véhicule ; (b) Accélération ; (c) A-coup ; (d) Couple de la motorisation (en valeurs normalisées pour que l’amplitude de la valeur maximale soit de 1)

comparaison à l’accélération supplémentaire qui a eu lieu lors du roulage réel. Cela est mis encore plus en évidence sur les points de fonctionnement de la Figure 3.11d, où nous voyons que, à différence du scénario réel, la manœuvre issue de notre algorithme a fait travailler la motorisation sur des points de fonctionnement à très faibles pertes.

Les Figures 3.11b et 3.11c indiquent le respects des objectifs de distance et inter-distance en fin de manœuvre.

Concernant la consommation d’énergie, le diagramme de la Figure 3.11e met en évidence une consommation supplémentaire de la manœuvre exécutée en appliquant l’algorithme complet, par rapport aux trapèzes issus de l’optimisation (+9,52%) ou du Gestionnaire des manœuvres (+18,80%). Elle est due au léger dépassement du niveau d’accélération au début de la phase stabilisée, et à l’accélération supplémentaire après la fin du trapèze. Cependant, et malgré ces phénomènes, nos résultats montrent une réduction de la consommation par rapport au roulage réel (−42,80%).

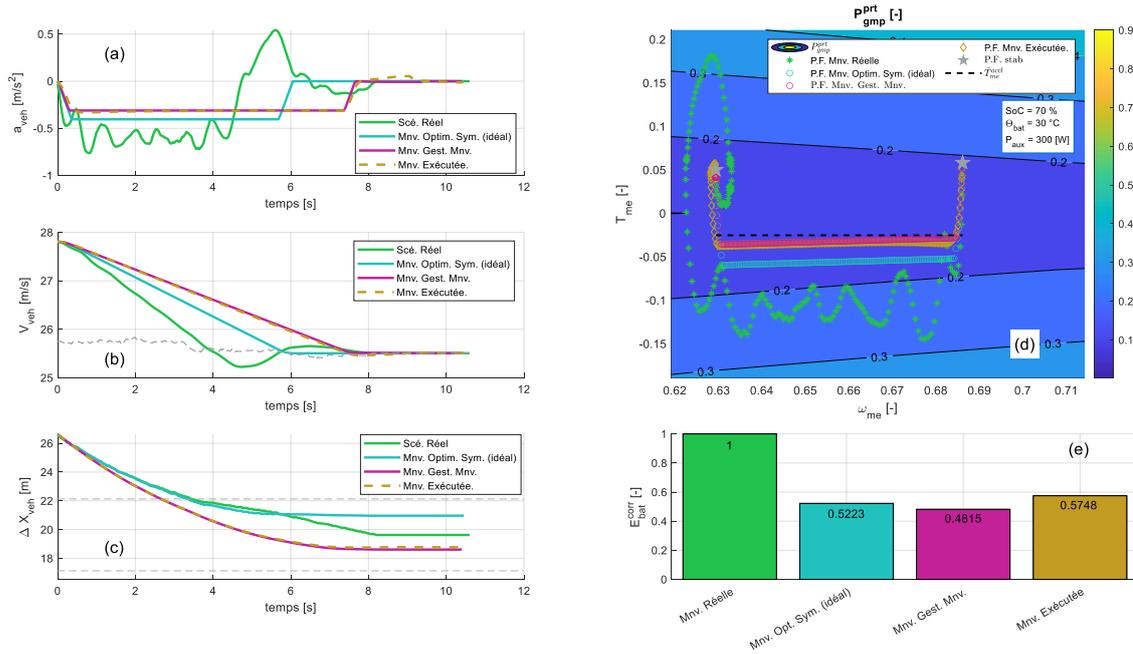


FIG. 3.11 – Évaluation des résultats : exécution de la manoeuvre (en générant une consigne de couple). (a) Accélération du véhicule ; (b) vitesse ; (c) inter-distance ; (d) points de fonctionnement sur la cartographie du GMP (en unités normalisées) ; (e) consommation globale normalisée à iso-distance.

Le lecteur n'aura pas manqué de remarquer que les consommations totales sont positives sur cette dernière figure, alors qu'elles étaient négatives dans tous les autres cas. Cela s'explique par la prolongation de la phase stabilisée à la fin, dont le temps final n'est plus choisi par rapport au moment où la manoeuvre réelle est finie, mais par rapport au moment où la vitesse du véhicule hôte, issue de l'algorithme complet, est *suffisamment proche* de celle du véhicule cible. Toutes les autres manoeuvres, y compris celle associée au roulage réel, ont été prolongées pour respecter la condition d'iso-distance parcourue. De ce fait, le niveau final d'énergie dans la batterie final a été inférieur à celui du début, et ce pour chacun des profils étudiés ; cela ne surprend pas dans la mesure où il s'agit d'un scénario à haute vitesse, et impliquant des niveaux d'accélération assez faibles.

3.5 RÉPONSE DE L'ALGORITHME AUX IMPRÉCISIONS DES CAPTEURS

Objectif de la section

Évaluer la robustesse de l'algorithme à de la latence dans la mesure de l'accélération.

Nous avons jusqu'à présent considéré que les grandeurs physiques associées au véhicule étaient parfaitement connues¹². Cependant, dans une application réelle, où il est nécessaire d'utiliser des capteurs industriels, ces conditions sont loin d'être vraies. Plusieurs phénomènes peuvent affecter les mesures des signaux physiques, parmi lesquels nous

avons la présence de bruit, la perte de résolution, des imprécisions et des latences dans le capteurs, pour ne mentionner que quelques-uns. Dans cette section nous étudierons uniquement le *retard dans la mesure d'accélération*, pouvant avoir lieu lors du traitement du signal pour enlever le bruit, ou lors de son estimation à partir du signal de vitesse. Il s'agit d'un phénomène dont les effets sur la stabilité et la qualité d'un asservissement peuvent être néfastes. Il est donc nécessaire de s'assurer que notre algorithme présente un minimum de robustesse aux retards dans le signal d'accélération.

Nous représenterons la latence dans la mesure d'accélération par le biais d'un retard pur entre la valeur réel, a_{veh} , et la valeur issue du capteur, \tilde{a}_{veh} , selon qu'il est montré sur (3.48), τ_r étant le retard de mesure. Nous avons utilisé pour notre étude, $\tau_r = 80\text{ms}$, correspondant à une latence de mesure plutôt importante.

$$\tilde{a}_{veh}(t) = a_{veh}(t - \tau_r) \quad (3.48)$$

Les signaux résultant de l'application de l'algorithme complet, en présence du retard dans la mesure d'accélération, sont présentés sur la Figure 3.12. Même si l'impact sur le signal de vitesse est relativement faible (Figure 3.12a), nous constatons une déformation visible sur le profil d'accélération, dont le dépassement est devenu plus important (Figure 3.12b). Toutefois, nous pouvons espérer que ce phénomène soit masqué par le bruit et vibrations présents sur un véhicule réel et qu'il n'ait donc pas d'effet sur l'agrément de conduite. En revanche, les valeurs plus importantes d'accélération pourraient se traduire par une légère réduction du potentiel de gain d'énergie.

En nous intéressant à l'à-coup pendant les phases transitoires, nous observons sur la Figure 3.12c que la forme du profil est assez similaire, mais que les valeurs pic ont légèrement augmenté et elles dépassent désormais les limites propres à l'agrément. Toutefois, selon il a été discuté dans les sections II.1.4 et II.3.5, la perception de l'à-coup est associé à sa durée d'application. Vu que les dépassements des seuils d'agrément ont lieu sur des intervalles extrêmement brefs, il est assez probable que le conducteur ne soit pas en capacité de faire la différence par rapport au profil ayant des mesures parfaites.

La Figure 3.12d présente les valeurs de couple. Nous constatons que, dans l'ensemble, le retard de mesure semble avoir un effet plutôt modéré sur le couple appliqué par la motorisation. En revanche, nous constatons que le terme de couple associé à la commande en boucle fermée, T_{me}^{bf} , représente désormais une part plus importante de la consigne total de couple, T_{me}^{act} . Cela laisse penser que la commande en boucle fermée a permis de compenser en partie les défauts du capteur, ce qui suggère que notre algorithme est robuste face au retard dans la mesure d'accélération.

La Figure 3.13 compare les résultats de l'algorithme complet en utilisant des capteurs imparfaits, et les résultats des parties précédentes appliquées indépendamment, ainsi que les signaux issus du roulage réel. L'utilisation des mesures imparfaites semble avoir un faible impact sur la vitesse et l'inter-distance, même si le véhicule hôte a pris plus de temps à atteindre la même vitesse que la cible. Cela explique, d'ailleurs, la « réduction »

12. Hormis les effets de quantification et d'échantillonnage traités dans la section IV.3.1.

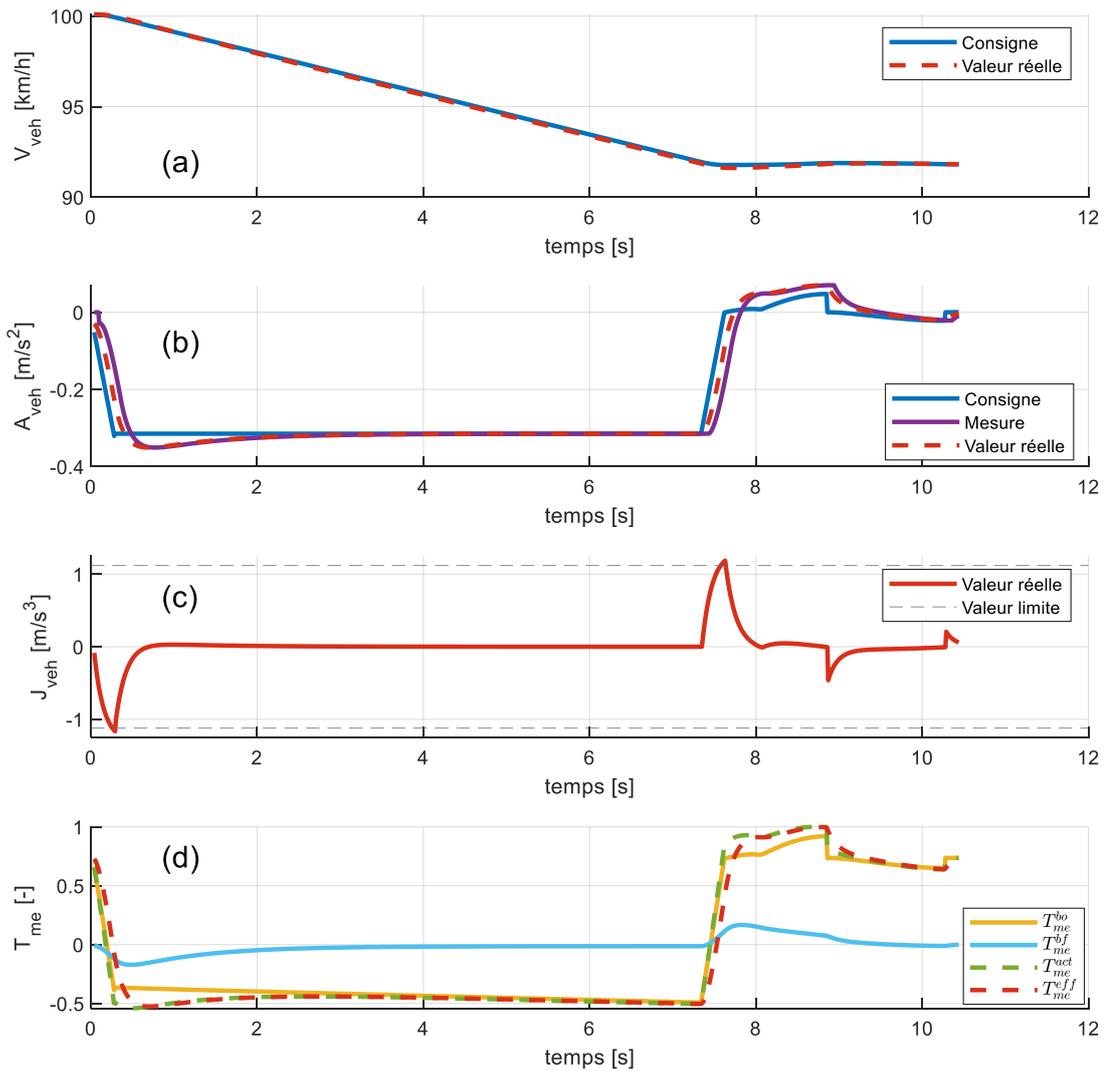


FIG. 3.12 – Signaux résultant de l'algorithme complet d'exécution de manœuvres écologiques, avec du retard dans la mesure d'accélération. (a) Vitesse du véhicule; (b) Accélération; (c) A-coup; (d) Couple de la motorisation (en valeurs normalisées pour que l'amplitude de la valeur maximale soit de 1)

du potentiel de gain de la Figure 3.13e. En effet, la durée de la phase finale s'est allongé pour tous les profils et, comme le comportement de tous les *véhicules* est assez similaire pendant cette phase, cela *cache* la différence de comportement entre les profils pendant le transitoire de vitesse.

La Figure 3.13d, montre des points de fonctionnement de la motorisation, légèrement moins bons que dans le cas avec des mesures parfaites. Aussi, l'espèce de « spirale » autour du point de fonctionnement final semble plus prononcée. Même si cela peut avoir des conséquences négatives sur la consommation, l'ampleur de ces phénomènes est bien en-deçà de ce que nous observons sur le scénario réel.

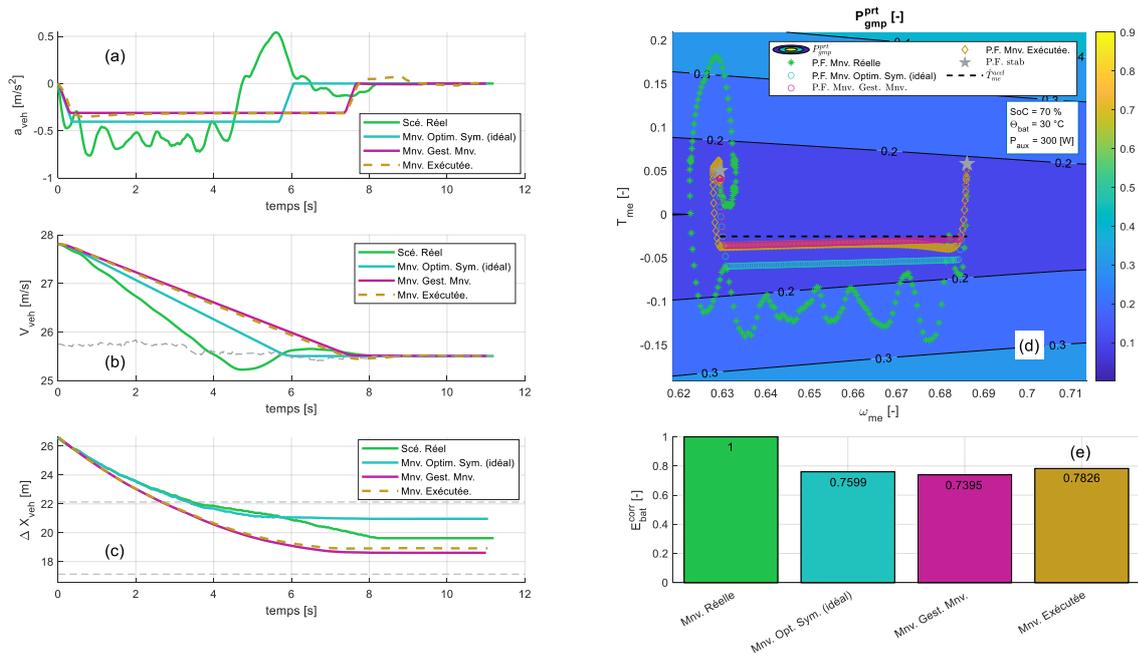


FIG. 3.13 – Évaluation des résultats : exécution de la manœuvre (en générant une consigne de couple) avec du retard dans la mesure d'accélération. (a) Accélération du véhicule; (b) vitesse; (c) inter-distance; (d) points de fonctionnement sur la cartographie du GMP (en unités normalisées); (e) consommation globale normalisée à iso-distance.

3.6 OBSERVATIONS GÉNÉRALES

Objectif de la section

Synthétiser les résultats du chapitre.

A cause du temps limité, nous avons dû laisser de côté certaines problématiques. Elles ne semblent pas insurmontables, mais il est nécessaire de les traiter afin de pouvoir envisager le déploiement de notre fonction sur un produit industriel. Les principales sont :

- **Déclenchement des nouvelles manœuvres en cours d'action** : lors de la première phase du trapèze, notre *Gestionnaire de manœuvres* est capable d'adapter la hauteur du trapèze grâce en trouvant les racines d'un polynôme. En revanche, il existe la possibilité qu'il n'y ait pas de racines réelles, ce qui veut dire que les objectifs de distance et de vitesse finales ne pourront pas être respectés avec le trapèze courant. De même il est possible de découvrir lors des phases postérieures que le profil envisagé ne permettrait pas de finir à une distance acceptable. Dans ce cas, il est nécessaire de déterminer et déclencher une nouvelle manœuvre afin de répondre au scénario de conduite.

Un tel comportement est compatible avec ce que les conducteurs font habituellement sur des scénarios réels. En revanche, notre algorithme pourrait limiter l'occurrence de ces opérations à des situations où le contexte de conduite aurait subit

des évolution trop importantes pour être gérer avec le fonctionnement *normal* du gestionnaire de manœuvres. Cela devrait se traduire par des gains d'énergie par rapports uax conducteurs humains car, tel que nous l'avons vu, ces oscillations et « micro-manœuvres » induisent des pertes énergétiques.

- **Robustesse au bruit:** Nous avons vérifié que notre algorithme de génération de consignes aux actionneurs est robuste face à un type de bruit: le retard dans le capteur. Il s'agit de l'une des sources de bruit pouvant avoir le plus fort impact sur un système de commande. Cependant, il est important d'évaluer si notre algorithme répondrait de manière robuste d'autres types de bruit. A priori, il devrait l'être, mais des tests pour le confirmer sont nécessaires, ce qui peut s'inscrire dans les perspectives de ces travaux.

* * *

Dans ce chapitre, nous avons proposé un algorithme *temps-réel* permettant d'exécuter des manœuvres trapézoïdales d'accélération, tout en les adaptant aux évolutions du contexte de roulage. Cet algorithme s'inspire des phénomènes cognitifs propres à l'être humain et son principal atout est la possibilité d'adaptation aux changements de scénario, tout en respectant l'agrément de conduite. Son implémentation est relativement simple et nos tests montrent qu'il a du potentiel a répondre correctement à des situations propres à des scénarios réels. Nous avons vu aussi qu'il semble robuste à des latences associées à des capteurs ou estimateurs industriels.

L'acceptabilité des conducteurs à ce type d'algorithmes constitue une question de recherche ayant un fort intérêt. La considération de l'ergonomie de conduite, en ce qui concerne l'interaction entre le conducteur et le système d'aide de conduite, est clé a l'acceptation de tells fonctions. Les aspects cognitifs considérés dans la section I.1.5 pourraient enrichir les réflexions sur le sujet.

Un autre aspect qui mérite d'être considéré pour l'implémentation industrielle de notre algorithme est le coût du matériel associé. Outre les capteurs d'environnement, comme des radars ou des caméras, il est nécessaire d'avoir une mesure où une estimation suffisamment robuste de la vitesse et l'accélération du véhicule; concernant la détermination de l'accélération, cela pourrait se traduire par le besoin d'améliorer la qualité de l'accéléromètre du véhicule. De même, l'optimisation de la manœuvre exigerait une capacité de calcul conséquente. Dans ces conditions, le gain apporté par l'écoconduite pourrait ne pas suffire à justifier un tel investissement. Toutefois, le déploiement des fonctions des *Systèmes d'Aide à la Conduite* se traduit par un nombre de plus en plus conséquent de véhicules possédant déjà les capacités de mesure et de calcul nécessaires à la mise en place d'algorithmes d'écoconduite. Ainsi, l'automatisation de l'écoconduite offrirait un moyen de valoriser, auprès du conducteur et du Législateur, l'investissement conséquent exigé par les SAC.

Tel que nous l'avons mentionné précédemment, le scénario étudié n'est pas forcément le plus adapté à l'étude du potentiel des gain d'énergie de l'algorithme, compte

tenu du faible niveau d'accélération en jeu. Cela explique la sensibilité des consommations à la durée du scénario, visible sur les diagrammes à barres des différentes figures. Le but de cette partie n'était pas d'étudier le potentiel de gain, mais de montrer la *fiabilité de l'algorithme*¹³. Toutefois, le fait d'avoir obtenu de gains dans un scénario où le conducteur semble avoir correctement anticipé sa décélération, et donc avoir utilisé un style de conduite *écologique*, suggère que notre algorithme aurait un potentiel d'économie d'énergie même en comparaison avec un écoconducteur. Cela serait principalement dû à la capacité de l'algorithme d'atteindre la vitesse souhaitée *d'une manière plus directe*, c'est-à-dire, en évitant d'avoir des légères oscillations avant d'atteindre la vitesse cible, ce qui peut être assez difficile à réaliser par un être humain.

13. Le lecteur est invité à se référer au chapitre III.2 pour consulter des analyses énergétiques.

V

Discussion, conclusions et perspectives

DISCUSSIONS, CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

1.1 CONCLUSIONS

L'*écoconduite* est une problématique complexe qui fait appel à plusieurs domaines du savoir. Ainsi, lors de cette thèse, nous nous sommes appuyés sur la recherche propre à des domaines différents pour mieux appréhender les aspects ergonomiques, énergétique et de commande associés à la conduite écologique. La cible de nos travaux a été l'**automatisation de l'écoconduite sur des véhicules électriques**.

D'une part, grâce à la *Psychologie Cognitive* nous avons une meilleure idée de la représentation dans l'esprit d'un être humain des différentes tâches associées à la conduite. En analysant la capacité humaine à décomposer des objectifs en sous-problèmes, nous avons défini des horizons temporels et spatiaux pertinents pour des problèmes d'écoconduite. Nous avons constaté que les problématiques traitées par l'état de l'art en *Optimisation Énergétique*, peuvent être grossièrement associées avec le découpage issu de la cognition humaine. Nous avons décidé pour ces travaux de nous focaliser sur la problématique d'**optimisation de manœuvres de conduite, avec prise en compte de l'agrément de conduite**. Cela a fait l'objet de la discussion de la Partie I.

L'étude de la *Physiologie* humaine, en particulier de l'oreille interne, ainsi que de l'*Ergonomie Automobile* nous a permis de mieux comprendre l'agrément de conduite. Nous avons vu l'**importance de l'accélération et de l'à-coup sur le ressenti associé à la conduite**, ainsi que l'**importance de la topologie d'une manœuvre sur la perception d'agrément**. Nous avons formalisé ces informations sous forme d'un *profil trapézoïdal d'accélération, pour lequel des critères d'agrément de conduite peuvent être facilement définis*. De même, en analysant des signaux issus de roulages en situation réelle, nous avons pu vérifier que notre modèle et nos hypothèses sont pertinentes, ainsi que proposer des méthodologies et des outils pour mieux renseigner nos modèles. La Partie II concerne ces études.

Ensuite, dans la partie III.1, le domaine de l'*Énergétique automobile* nous a servi de socle pour modéliser la consommation d'un véhicule électrique. Deux approches de modélisation ont été proposées : d'une part, nous avons généré un Modèle Physique du véhicule, nous permettant de quantifier le potentiel de gain associé à l'automatisation de l'écoconduite ; d'autre part, un Modèle Analytique, à coût de calcul moindre, a été proposé comme un pas vers une implémentation temps-réel de l'optimisation des manœuvres de conduite.

Nous proposons également une représentation graphique des *pertes globales* de la motorisation, ayant pour vocation d'améliorer notre compréhension des aspects énergétiques des différentes stratégies de conduite.

A partir du modèle physique, dans la Partie III, nous avons quantifié et comparé le potentiel de gain des principales stratégies d'écoconduite utilisées par des conducteurs en situation réelle. Les mêmes études ont été reproduites sur des scénarios urbain et extra-urbain, ainsi qu'en considérant l'utilisation intensive des auxiliaires. Nos études montrent un potentiel de gain relativement important pour les différentes stratégies ; selon le contexte de conduite, la stratégie ayant le plus d'impact ne sera plus la même : **la réduction du niveau d'accélération semble être prépondérante sur des scénarios urbains, alors que la réduction de la vitesse stabilisée le serait lors d'une conduite sur autoroute**. Aussi, l'influence de l'utilisation des consommateurs électriques est beaucoup plus marquée sur des scénarios urbains que sur les extra-urbains.

Enfin, sur la Partie IV nous avons proposé un algorithme appliquant les connaissances acquises sur les sections précédentes afin d'**appliquer, en temps-réel et de manière automatisée, des manœuvres de conduite écologiques**. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés sur différents aspects de la *Cognition humaine* ; de même nous avons formalisé cette algorithme en utilisant le langage et des techniques propres à l'*Automatique*, dans le sous-domaine de l'*Automatisation de la Conduite*.

A partir de la *Compétence Cognitive Stratégique*, nous avons proposé un algorithme capable d'optimiser les manœuvres trapézoïdales de conduite ; le même algorithme peut être utilisé sur des scénarios liés à l'infrastructure et au trafic. La formulation du problème d'optimisation a permis de définir explicitement des contraintes associées au respect de l'agrément de conduite, basées sur nos résultats précédents. Le problème d'optimisation serait difficile à implémenter *en l'état* en temps-réel ; cependant, dans la section suivante, nous proposons des solutions mieux adaptées pour une implémentation embarquée. La *Compétence Tactique* a servi de base pour la conception d'un mécanisme d'adaptation des manœuvres aux évolutions du contexte de conduite. Enfin, en nous inspirant du phénomène cognitif nommé *Procéduralisation*, nous avons proposé une structure de commande permettant d'appliquer sur un véhicule des profils trapézoïdaux d'accélération ; celui-ci est compatible avec le respect des contraintes d'agrément de conduite.

Ainsi, nous avons abouti à une **vision plus large de ce que l'écoconduite représente et de comment elle peut être implémentée sur une application industrielle**. Cette thèse traduit des résultats de recherche de terrain, théorique, et même fondamentale pour aboutir à une application compatible avec les enjeux industriels. Ces travaux s'inscrivent dans le grand effort sociétal, et plus particulièrement celui du domaine Automobile, vers une mobilité plus respectueuse de notre planète.

D'autres sujets de réflexion

Ces travaux ont mis en évidence des facteurs importants associés à l'écoconduite. De même, notre discussion peut éclairer des décideurs sur des stratégies à utiliser pour un déploiement réussi de l'écoconduite. Voici une liste non-exhaustive de sujets de réflexion.

Prise en compte de l'agrément de conduite

L'un des aspects centraux de notre travail a été la **prise en compte de l'agrément de conduite**. Il s'agit d'un aspect parfois relayé à un second plan lors des études en optimisation énergétique. Pourtant, sa considération est essentielle à un déploiement réussi de ces fonctions : en effet, si le comportement d'un système de conduite automatique générerait un inconfort pour l'utilisateur, celui-ci finirait par l'éteindre la plupart du temps, quand bien même il lui ferait réduire considérablement sa consommation d'énergie. Non seulement cela amoindrirait l'intérêt commercial de la fonction, mais réduirait également les gains d'énergie sur la durée de vie du produit, et donc ses bénéfices environnementaux.

Facteurs affectant la conduite écologique

L'écoconduite a un potentiel relativement important de réduction de la consommation d'énergie ; en revanche, **les sources de gains et le type de stratégie à appliquer en priorité changent en fonction du scénario de conduite**, comme le montrent nos résultats. En effet, sur des scénarios urbains, la *réduction de l'agressivité de conduite*, c'est-à-dire, modérer ses accélérations et ses décélérations, semble la stratégie à appliquer en priorité, alors que la réduction de la vitesse des phases stabilisées offrirait assez peu de gains (elle peut même augmenter la consommation, si la climatisation est allumée !). D'autre part, sur des scénarios extra-urbains, la *réduction de la vitesse des phases stabilisées* est la meilleure stratégie à appliquer, pourvu que le conducteur soit prêt à accepter une variation considérable de son temps de parcours ; cependant, la *réduction de l'agressivité* garde un intérêt et elle pourrait être utilisée en complément de la réduction de vitesse. Aussi, la modulation des accélérations peut s'avérer plus acceptable, et elle pourrait être appliquée même chez des conducteurs qui ne seraient pas prêts à rouler moins vite.

L'enjeu de la formation à l'écoconduite

Pour que l'écoconduite puisse avoir un impact conséquent sur l'environnement, il est nécessaire qu'un nombre suffisant de personnes adopte cette pratique. En revanche, promouvoir les pratiques d'écoconduite de façon durable peut s'avérer un défi. D'une part, de présenter les consignes aux conducteurs peuvent influencer leur motivation pour adopter une conduite écologique [2] ; d'autre part, des études avec des conducteurs professionnels montrent que, même lorsque les consignes sont correctement appliquées suites aux sessions de formation et produisent des économies d'énergie importantes, l'applica-

tion des bonnes pratiques baisse de manière significative au bout de quelques mois, ce qui se traduit par des consommations plus importantes [3, 16].

Ces phénomènes peuvent être expliqués en considérant les aspects cognitifs de l'acquisition de compétences (cf. section I.1.5). En effet, tel que nous l'avons vu, l'apprentissage est un phénomène progressive associé à la création de connections neuronales ; cela ne se produit pas d'un seul coup : grâce au phénomène de *procéduralisation*, au fur et à mesure que l'expertise se développe, les connaissances vont être de moins en moins déclaratives, et vont devenir des *automatismes*, réalisables en forme naturelle et avec peu d'effort [8].

Lors de la formation de conducteurs expérimentés, ayant déjà conduit des milliers d'heures de conduite, on peut difficilement espérer que quelques heures d'entraînement suffisent à *désapprendre* des pratiques fortement ancrées dans leurs cerveaux sur plusieurs années. Ce n'est donc pas étonnant qu'une poignée de mois suffisent pour que les conducteurs retournent à leurs vieilles habitudes, leur demandant *beaucoup moins d'effort intellectuel*.

Il existe, *toutefois*, des stratégies ayant le potentiel d'améliorer l'efficacité des formations à l'écoconduite. D'une part, il a été montré que des personnes retiennent plus facilement des informations si les contextes d'apprentissage et de tests sont congruents [8, 73, 205]. Ainsi, les séances de formations ne devraient surtout pas se limiter à l'apprentissage conceptuel, ni à l'exécution des stratégies *sur des pistes* ; **il est nécessaire, autant que possible, de former les conducteurs dans des situations très proches de la situation réelle**. Si c'était faisable, une partie de l'entraînement devrait avoir lieu dans le même véhicule est sur les mêmes routes que le conducteur devra utiliser. L'effort supplémentaire dans la formation devrait être compensé par la pérennisation des économies d'énergie.

Une deuxième stratégie pédagogique, indépendante des compétences à acquérir mais présentant un fort intérêt dans le cadre de la formation d'écoconducteurs, consiste à ne pas essayer de créer des nouvelles catégories et concepts chez l'individu, mais plutôt de **faire évoluer des connaissances et des concepts qu'il aurait déjà, pour les adapter à la conduite écologique**. Cela permet de renforcer des connexions neuronales déjà établies et ancrées dans le cerveau du conducteur, plutôt que d'essayer d'en créer des nouvelles, ce qui demanderait plus de temps et d'effort et pourrait conduire à des idées contradictoires chez le conducteur. L'application concrète de ce principe doit faire appel aux talents et à l'expérience des instructeurs. Ayant appliqué ce principe dans d'autres contextes, je constate son efficacité et grand potentiel.

Un autre phénomène à considérer est le fait que, au fil du temps, il devient plus difficile pour un individu de retrouver des informations préalablement apprises ; ce phénomène d'oubli semble suivre une loi grossièrement exponentielle [8, 227], et être associée à des phénomènes d'interférence avec des nouvelles informations apprises. Cela pourrait expliquer la dégradation des performances des conducteurs formés à l'écoconduite au bout de quelques mois. Toutefois, des expériences montrent que ce phénomène de pertes de connaissances semble être réversible, en renforçant les connaissances par des nouvelles séances d'entraînement [151]. Ainsi, **il est recommandable de renforcer l'apprentissage de**

L'écoconduite en planifiant des séances de renfort, dans les mois suivant la première formation à l'écoconduite.

* * *

Une extension de ce raisonnement consiste en *s'attaquer à la racine du problème*, en **apprenant l'écoconduite aux auto-écoles, afin que les nouveaux conducteurs acquièrent les bonnes pratiques dès le début**. Pour cela, il semblerait pertinent d'inclure un système de bonification lors des examens de conduite aux candidats qui feraient appel à des stratégies d'écoconduite pertinentes.

Stratégies de déploiement de l'écoconduite

En dehors de la difficulté à apprendre de manière durable à une personne comment écoconduire, une deuxième difficulté se présente : *que doit-on apprendre aux gens ?* En effet, **la stratégie d'écoconduite à appliquer dépend du type de groupe moto-propulseur** [195]. De plus, nos résultats du Chapitre III.2 montrent que, pour un même véhicule, **la pertinence de certaines stratégies peut varier en fonction d'autres facteurs**, comme l'utilisation de la climatisation. Ainsi, il est difficile d'apprendre à un individu la meilleure stratégie à adopter pour chaque véhicule et dans toutes situations ; **il semble plus pertinent de faire des compromis, en donnant au conducteur des consignes faciles à comprendre et appliquer**, adaptées au type de véhicule qu'il devrait utiliser.

En vue de ces circonstances, **les Systèmes d'aide à la conduite peuvent s'avérer clé pour l'application à grande échelle de l'écoconduite**. En effet, de tels systèmes délesteraient le conducteur d'une bonne partie, voire de tout l'effort nécessaire à une conduite écologique. De plus, ils pourraient être adaptés à chaque technologie de groupe motopropulseur, sans devoir faire des compromis pour faciliter la compréhension des différentes stratégies. Un système automatisé pourrait également avoir une meilleure efficacité dans l'application des stratégies d'écoconduite, même par rapport à un conducteur écologique averti (ce qui est supporté par nos résultats du Chapitre IV.3). Ces deux facteurs font donc de l'automatisation de l'écoconduite un levier pertinent pour élargir le potentiel de gain effectif de la conduite écologique.

* * *

En vue des discussions précédentes, il existe plusieurs méthodologies pour stimuler la pratique de l'écoconduite en situation réelle. En voici quelques possibilités :

- **Renfort de la motivation des conducteurs professionnels à écoconduire sur la durée :** Tel que nous l'avons dit précédemment, l'efficacité des formations à l'écoconduite est conditionnée à l'applications par les conducteurs des bonnes pratiques, sur une durée et à une fréquence suffisamment importantes pour que le processus de *procéduralisation* puisse avoir lieu. Un levier pour y contribuer est la création d'un *système de primes* pour le conducteur, en fonction des gains sur la consommation ; celles-ci devraient s'appliquer sur une durée suffisamment importante pour que l'acquisition d'expertise soit pérennisée, de sorte que l'écoconduite devienne *la*

nouvelle pratique naturelle chez les conducteurs. D'autres types d'incitation pourraient s'ajouter en complément - des distinctions et des félicitations pour ses bonnes performances, par exemple ; cela lui permettrait de garder la motivation pour continuer d'appliquer les stratégies apprises.

Des séances de rappel de l'application de la conduite écologique pourraient s'avérer des outils puissants pour renforcer l'acquisition de cette compétence chez les professionnels.

- **Systèmes d'aide à l'écoconduite :** dans le cas des conducteurs particuliers, dont l'utilisation de leur véhicule est bien moins conséquente, le gain économique associé à l'écoconduite serait beaucoup moindre. Ainsi, la seule incitation monétaire pourrait s'avérer insuffisante comme motivation à la pratique habituelle de l'écoconduite. En revanche, des systèmes d'assistance pourraient simplifier la tâche au conducteur, en lui permettant d'appliquer quotidiennement un style de conduite plus respectueux de l'environnement. Ce type de fonctions pourraient aussi augmenter le potentiel d'économies chez les professionnels. Deux familles de Systèmes d'aide à l'écoconduite sont envisageables :

- **Fonctions d'incitation à l'écoconduite :** celles-ci sont moins chères et plus faciles à implémenter. L'enjeu sécurité associé est également moindre. Cependant, de telles fonctions demanderaient en permanence au conducteur un niveau d'attention plus important ; celui-ci risque donc de se lasser au bout d'un moment, et d'ignorer les consignes, voire d'éteindre la fonction. Ainsi, l'ergonomie des interfaces d'utilisateur est un aspect clé de l'efficacité de ce type de fonctions.

De plus, il y aurait une perte du potentiel du gain associée à l'incapacité du conducteur à suivre parfaitement les consignes de la fonction.

- **Fonctions actives d'aide à l'écoconduite :** développer ce type de système demande des efforts plus importants et la part de responsabilité engagée par le constructeur l'est aussi. En revanche, il y a des bonnes raisons pour la conception et l'introduction de telles fonctions : elles seraient plus facilement acceptées et utilisées par le conducteur ; elles augmenteraient le potentiel du gain d'énergie, et diminueraient la dispersion de la consommations chez des conducteurs différentes¹. Il y aurait également une valorisation auprès des acheteurs potentiels des véhicules proposant ce type de *Système d'aide à la conduite*.

1.2 PERSPECTIVES

Même si nos travaux ont conduit à la proposition d'un algorithme compatible avec une exécution temps-réel, il existe encore de questions à traiter pour qu'il se traduise sous la forme d'une application industrielle. De même, le temps limité pour la préparation d'une

1. Cela pourrait rendre robuste des fonctions faisant des prédictions sur l'état de charge futur de la batterie.

thèse nous a empêché de creuser certaines voies de recherche assez prometteuses. Cette section a pour vocation d'offrir quelques idées pour la suite de cette recherche.

1.2.1 Résolution temps-réel du problème d'optimisation

Le principal verrou à lever pour que notre algorithme d'écoconduite soit embarquable est la question de la résolution du problème d'écoconduite dans les quelques microsecondes dont un système automatisé disposerait. La question n'est pas facile à résoudre ; cependant, nous proposerons deux pistes de réflexion qui offrent un vrai potentiel pour déterminer en situation réel le profil d'accélération qu'un véhicule devrait suivre afin de réduire sa consommation d'énergie.

1.2.1.1 Apprentissage des solutions optimales

La première possibilité est la plus directe, et celle permettant d'utiliser le plus facilement les résultats de nos travaux. Elle consiste à traduire les manœuvres optimales associées à un panel de scénarios *suffisamment représentatif* de la conduite sous la forme d'un modèle compatible avec une implémentation de type *temps-réel*. Des modèles différents sont envisageables.

* * *

Un premier type de modèle, dont l'implémentation est la plus directe, est l'utilisation de cartographies pour stocker les valeurs des paramètres optimaux des manœuvres : J_1^* , a_{ex}^* , τ_2^* et J_3^* . Par ailleurs, l'un de ces paramètres, pourrait être déterminé à partir de la condition sur la vitesse finale, tel qu'il a été fait lors de la résolution des problèmes d'optimisation (cf. section IV.2.4). De plus, en appliquant la condition des manœuvres symétriques, $J_1^* = J_3^* = J_s^*$, on aurait encore un paramètre en moins à déterminer. Il serait donc possible d'obtenir les paramètres « optimaux » des manœuvres à partir uniquement de deux cartographies.

En revanche, un inconvénient avec cette méthode porte sur les paramètres d'entrée des cartographies. En effet, afin de limiter la taille, il est nécessaire d'avoir un nombre réduit d'entrées. Ces entrées peuvent être issues, entre autres, des capteurs d'environnement, des états du véhicule, des propriétés de l'infrastructure. Toutefois, il peut être assez difficile de représenter la diversité des situations de conduite en utilisant juste une poignée de ces paramètres.

Une possibilité permettant de palier à ce problème consiste à déterminer un nombre restreint des combinaisons des paramètres disponibles, grâce à une analyse statistique (par exemple, une Analyse en Composantes Principales). Cela permet d'obtenir un nombre réduit de paramètres d'entrée pour les cartographies, tout en restant représentatif d'une grosse partie de la dispersion associées aux données d'entrée. Cette approche a été utilisée sur [162] pour estimer la consommation d'un véhicule hybride rechargeable.

* * *

Une autre approche consiste à utiliser les résultats de l'optimisation comme des données d'entrée d'un algorithme d'*Apprentissage Automatique*. L'algorithme d'entraînement pourrait identifier des régularités dans les solutions permettant d'arriver à un modèle relativement simple, pouvant tourner dans un ordinateur industriel. Cette méthode a été proposée sur [234] pour l'écoconduite de véhicules hybrides.

Un problème associée aux algorithmes d'apprentissage se nomme le *Fléau de la dimension*. Ce terme désigne le fait que la quantité de données nécessaire à représenter un problème *explose* avec le nombre de ses dimensions. Cela limiterait aussi le nombre d'entrées du modèle d'apprentissage. En revanche, en utilisant le modèle analytique que nous avons proposé (cf. section IV.2.5.1.2, par exemple), pour résoudre le problème d'optimisation, il est possible de générer des quantités importantes de données en peu de temps, ce qui peut palier un peu au problème.

De plus, il est possible d'utiliser en même temps la solution proposée dans le cas des cartographies pour réduire le nombre d'entrées.

* * *

Une dernière possibilité est la définition des *règles heuristiques* et des zones de fonctionnement auxquels on pourrait associer les paramètres des manœuvres optimales, un peu à la manière de ce qui est fait chez certains constructeurs pour définir les modes de fonctionnement des véhicules hybrides [193, 81]. En revanche, un inconvénient avec cette méthode, outre la perte d'optimalité, est la difficulté à trouver de telles règles.

1.2.1.2 Simplification de la fonction de coût

L'autre possibilité consiste à simplifier la fonction coût du problème d'optimisation. Même si cela demande un effort supplémentaire, il s'agit d'une approche présentant des avantages importants. En effet, un modèle de consommation simplifié permettrait non seulement de réduire le nombre d'opérations en virgule flottante nécessaires au calcul de l'énergie consommée, mais elle pourrait même changer la nature du problème d'optimisation.

Comme il a été montré sur la section IV.2.7, sous certaines hypothèses, compatibles avec des scénarios urbains, le problème de détermination de la manœuvre optimale reviendrait à trouver le meilleur compromis entre les pertes constantes, proportionnelles à la durée de la manœuvre τ_{mnv} , et le *coût du style de conduite*, proportionnel à l'intégral du carré de l'accélération au long de la manœuvre. Cette fonction coût est beaucoup plus simple que celle utilisée dans nos travaux, et rendrait envisageable l'utilisation d'un algorithme de descente pour la résolution du problème. En faisant des choix judicieux, de tels algorithmes peuvent être utilisés pour la commande en temps-réel de systèmes dynamiques [225].

1.2.2 D'autres pistes d'exploration

Au cours de ces travaux, nous avons d'autres idées qui mériteraient d'être explorées, et dont le temps ne nous l'a pas permis. En voici une liste non-exhaustive :

- **Effet de la durée de l'à-coup sur le ressenti :** Tel que nous l'avons vu sur les sections II.1.3, II.1.4 et II.3.5, il semble avoir une dépendance entre la durée d'une phase transitoire et la valeur d'à-coup acceptable. Un moyen pour tenir compte de ce phénomène est de définir d'abord une contrainte sur la durée des phases transitoires de la manœuvre, pour en suite définir les limites d'à-coup, \hat{J}_{mnv} et \check{J}_{mnv} , en accord avec cette durée.
- **Écoconduite lors des démarrages à froid :** lors d'un démarrage à froid, les pertes dans la batterie, et dans d'autres organes potentiellement, peuvent être assez importants. Il existe donc un enjeu pour la faire chauffer au plus vite. Étant donnée les constantes de temps importantes des systèmes thermiques, notre approche, basée sur l'échelle temporelle des manœuvres, n'est donc plus valable. Il faudrait donc proposer un cadre considérant l'ensemble du trajet pour pouvoir déterminer la stratégie optimale, qui pourrait évoluer pendant le trajet.

Il nous semble qu'il y aurait un potentiel à faire une *décomposition du problème en sous-objectifs*, en nous inspirant de la cognition humaine (cf. section I.1.5). En effet, nous pourrions découpler la tâche de faire chauffer la batterie en plusieurs sous-tâches où chaque manœuvre de conduite ferait une contribution. La *représentation d'un problème comme un espace d'états* peut s'avérer assez utile pour ce genre d'approches.

- **Des commandes plus avancées pour la génération des consignes aux actionneurs :** sur la section IV.3.4.1, nous avons proposé l'utilisation d'un *terme intégral* de commande pour contribuer à la génération des consignes de couple à envoyer aux actionneurs. Toutefois, d'autres stratégies de commande pourraient garantir un meilleur suivi. Par exemple, un *système anti-emballement*² de l'intégrale serait souhaitable pour éviter des problèmes en cas de saturation de la commande [183]. De même, en supposant une bonne connaissance de la nature du bruit, nous pourrions utiliser des contrôleurs adaptées ; ainsi, si le retard du capteur était correctement connu, il serait possible d'utiliser un *Prédicteur de Smith* [158]. En revanche, il est nécessaire de rester prudent vis-à-vis de l'utilisation de telles stratégies, dans la mesure où elles pourraient réduire la robustesse de l'algorithme par rapport aux imprécisions dans la modélisation.
- **Écoconduite d'un véhicule hybride :** les principes proposés lors de nos travaux pourraient trouver une extension sur la conduite écologique de véhicules hybrides. Une approche possible pour la définition de la fonction de coût, lorsqu'une approche optimale de gestion d'énergie est appliquée [142, 81], est de considérer le *facteur d'équivalence*, issu de la gestion d'énergie, et calculer un « coût global », en sommant la consommation de carburant et le produit du facteur d'équivalence et de la consommation d'électricité. Une approche similaire est proposée sur [195].

- **Écoconduite coopérative**: lors de ces travaux, nous avons considéré l’optimisation d’un seul véhicule. Toutefois, avec l’avènement des *véhicules connectés*, pouvant échanger des informations entre eux et avec l’infrastructure, il devient envisageable d’optimiser simultanément le comportement d’un peloton de véhicule afin de minimiser la consommation d’énergie de l’ensemble. *L’écoconduite appliquée à de pelotons de véhicules*, que l’on pourrait nommer *éco-platooning*, offre donc un potentiel de gain élargi [221]. La décomposition de l’écoconduite en sous problèmes, présentée dans la section I.1.6, peut offrir de leviers pour simplifier ce problème.
- **Compromis entre efficacité énergétique et ergonomie**: tel que nous l’avons vu, la prise en compte de l’agrément de conduite peut engendrer une limitation dans le potentiel de gain associé à l’écoconduite. Toutefois, l’importance de l’ergonomie peut varier en fonction de l’application: transport de passagers, de marchandises, déplacement autonome d’un véhicule non-piloté, etc. Ainsi, pour certaines applications, il serait possible d’alléger les contraintes d’agrément afin d’augmenter le potentiel de gain d’énergie.
- **Implémentation dans un véhicule**: avec l’algorithme que nous avons proposé, *en l’état*, il devrait être possible de faire une implémentation et des tests préliminaires de la fonction sur un véhicule. Pour ce faire, on devrait pré-calculer les résultats de l’optimisation, puis reproduire le scénario sur des conditions contrôlées. Cela devrait permettre d’évaluer en situation réelle les performances de l’algorithme.

1.2.3 Déclinaison des résultats sur des produits industriels

Un bon nombre des choix réalisés au cours de nos recherches, s’avèrent assez **pertinents concernant une implémentation industrielle**. A titre d’exemple, en nous inspirant de la compétence cognitive humaine, nous sommes arrivés à une formulation du problème d’optimisation capable de représenter en même temps des scénarios de conduite associées au trafic, et d’autres associés à l’infrastructure routière. De ce fait, la même fonction pourrait être utilisée pour gérer des scénarios d’accostage et de dépassement, des changements de vitesse règlementaires, des passages de feux tricolores, entre autres; pour cela, il suffirait juste d’ajouter une fonction capable de traduire les spécificités de ces scénarios sous la *représentation stratégique du problème de changement de vitesse*. Cela se traduirait par une réduction importante de la mémoire nécessaire pour stocker ces fonctions dans un calculateur. En plus, cela permettrait de faire baisser de manière assez considérable les coûts des développements; en effet, il serait possible d’utiliser les mêmes fonctionnalités de base pour la conception de fonctions assez différentes en apparence. La réduction de coûts associée à cette approche présente un fort intérêt pour les constructeurs, permettant de **faciliter le déploiement et améliorer la rentabilité des systèmes d’écoconduite automatisée**.

2. En anglais: *anti-windup*.

Les résultats de nos travaux pourraient **renseigner la formulation des stratégies à transmettre lors des séances de formation à l'écoconduite de véhicules électriques**. En particulier, nos analyses du Chapitre III.2 peuvent servir de socle à la définition des *bonnes pratiques d'écoconduite*.

De même, l'algorithme que nous avons proposé pourrait être **décliné sur plusieurs type de fonction d'aide à l'écoconduite** : d'une part, une version simplifiée de notre algorithme pourrait transmettre des informations à une Interface Utilisateur donnant des conseils au conducteur sur le niveau d'accélération à appliquer. D'autre part, l'application la plus naturelle de notre algorithme est une *fonction d'automatisation des manœuvres écologiques*. Celle-ci pourrait être appliquée sur un *système de délégation partielle*, qui agirait uniquement lors des transitoires de conduite, laissant au conducteur la commande pendant les phases stabilisées. Aussi, en couplant notre algorithme avec un régulateur adaptatifs, on pourrait obtenir un système qui se chargerait de l'ensemble de *la commande longitudinale du véhicule*.

Notre travail s'inscrit donc pertinemment sur les feuilles de route des constructeurs en matières d'automatisation de la conduite, leur permettant d'intégrer l'écoconduite sur des véhicules électriques de gammes et des niveaux d'équipement différents.

1.3 DISCUSSIONS

Nos travaux ont abouti à la proposition d'un algorithme, permettant d'**optimiser des manœuvres de conduite d'un véhicule électrique, et de les exécuter sur un système temps-réel, tout en prenant compte de l'agrément de conduite**. Cela s'inscrit dans l'air du temps ; en effet, les objectifs gouvernementaux en termes d'amélioration de l'efficacité énergétique, demandent à grands cris l'apparition de telles technologies. De plus, l'émergence de la conduite automatisée et la démocratisation des véhicules électrifiés, offrent les **conditions propices pour que ce type de fonctions voient le jour**.

Cette discussion a donc permis d'élargir notre compréhension de l'écoconduite dans la diversité d'aspects qu'elle recouvre. Elle met en évidence le grand potentiel à faire communiquer des domaines scientifiques qui sont séparés habituellement.

* * *

Ainsi, la dernière réflexion de ce document portera sur un autre aspect que la conduite écologique : dans un contexte où les domaines de recherche deviennent de plus en plus spécialisés, il existe un énorme intérêt à élargir nos horizons et chercher à interagir avec d'autres champs d'exploration scientifique, qui peuvent paraître complètement dissociés, en surface. Établir ce type d'échanges, voire coopérations, demande des efforts importants. En revanche, un enrichissement de notre compréhension de la réalité, de notre champ de vision, s'offre à nous lorsque nous prenons le courage de sortir de nos zones de confort, de nous poser les bonnes questions, et d'explorer le monde à nouveau avec la curiosité d'un enfant...

LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR

Ci-dessous, la liste des publications académiques et industrielles issues de ces travaux, à la date de soumission de ce manuscrit.

ARTICLES

- E. Solano-Araque, G. Colin, G.-M. Cloarec, A. Ketfi-Cherif, et Y. Chamaillard. **Energy analysis of eco-driving maneuvers on electric vehicles**. *IFAC-PapersOnLine*, 51(31):195-200, 2018.
- E. Solano-Araque, G. Colin, G.-M. Cloarec, A. Ketfi-Cherif, et Y. Chamaillard. **Determining vehicle acceleration from noisy non-uniformly sampled speed data for control purposes**. *IFAC-PapersOnLine*, 52(5):66-71, 2019.

BREVETS DÉPOSÉS

- G.-M. Cloarec, G. Colin, E. Solano-Araque. **Procédé d'élaboration d'une consigne de pilotage d'un organe d'un véhicule automobile**. *Numéro de dépôt*: FR1908973; *Date de dépôt*: 05/08/2019.
- G.-M. Cloarec, A.-D. Ourabah, G. Colin, E. Solano-Araque. **Procédé de détermination de consignes d'accélération longitudinale**. *PJ*: PJ-19-0882; *Date de dépôt*: 02/11/2020.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic*, 2008. IEEE Std 754-2008.
- [2] A. Af Wåhlberg. Short-term effects of training in economical driving: Passenger comfort and driver acceleration behavior. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(2):151–163, 2006.
- [3] A. E. af Wåhlberg. Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback. *International journal of industrial ergonomics*, 37(4):333–343, 2007.
- [4] I. E. Agency. Energy efficiency 2017. *Market Report Series*, 2017.
- [5] I. E. Agency. Global ev outlook 2018–towards cross-modal electrification. *IEA Publications*, 2018.
- [6] K. Ahn and H. A. Rakha. Network-wide impacts of eco-routing strategies: A large-scale case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25:119–130, 2013.
- [7] M. Alexander-Kearns, M. Peterson, and A. Cassady. The impact of vehicle automation on carbon emissions. *Center for American Progress*. Retrieved from <https://www.americanprogress.org/issues/green/reports/2016/11/18/292588/theimpact-of-vehicle-automation-on-carbon-emissions-where-uncertainty-lies>, 2016.
- [8] J. R. Anderson. *Cognitive psychology and its implications*. 2005.
- [9] J. R. Anderson. *How can the human mind occur in the physical universe?* Oxford University Press, 2007.
- [10] P. J. Antsaklis. A brief introduction to the theory and applications of hybrid systems. In *Proc IEEE, Special Issue on Hybrid Systems: Theory and Applications*. Citeseer, 2000.
- [11] L. Armijo. Minimization of functions having lipschitz continuous first partial derivatives. *Pacific Journal of mathematics*, 16(1):1–3, 1966.
- [12] B. Asadi and A. Vahidi. Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time. *IEEE transactions on control systems technology*, 19(3):707–714, 2010.
- [13] L. Autret. *Rôle de l'activité dépendante du calcium au cours du développement et de la maturation des neurones ganglionnaires vestibulaires de souris*. PhD thesis, Université Montpellier II, 2005.
- [14] F. Badin. *Les véhicules hybrides: Des composants au système*. Editions Technip, 2013.
- [15] J. N. Barkenbus. Eco-driving: An overlooked climate change initiative. *Energy Policy*, 38(2):762–769, 2010.

- [16] P. Barla, M. Gilbert-Gonthier, M. A. L. Castro, and L. Miranda-Moreno. Eco-driving training and fuel consumption: Impact, heterogeneity and sustainability. *Energy Economics*, 62:187–194, 2017.
- [17] P. Barrre, A. Bouscayrol, P. Delarue, E. Dumetz, F. Giraud, J.-P. Hautier, X. Kestelyn, B. Lemaire-Semail, and E. Semail. Inversion-based control of electromechanical systems using causal graphical descriptions. In *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pages 5276–5281. IEEE, 2006.
- [18] H. Bellem, T. Schöenberg, J. F. Krems, and M. Schrauf. Objective metrics of comfort: developing a driving style for highly automated vehicles. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 41:45–54, 2016.
- [19] H. Bellem, B. Thiel, M. Schrauf, and J. F. Krems. Comfort in automated driving: An analysis of preferences for different automated driving styles and their dependence on personality traits. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 55:90–100, 2018.
- [20] R. Bellman and S. Dreyfus. Functional approximations and dynamic programming. *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, pages 247–251, 1959.
- [21] N. H. Bingham and J. M. Fry. *Regression: Linear models in statistics*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [22] S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [23] A. Browning. Human engineering studies of high speed pedestrian conveyors. Technical report, HM Stationery Office, 1972.
- [24] S. Butterworth et al. On the theory of filter amplifiers. *Wireless Engineer*, 7(6):536–541, 1930.
- [25] R. Cal and F. Bahmad Jr. Vestibular evoked myogenic potentials: an overview. *Brazilian journal of otorhinolaryngology*, 75(3):456–462, 2009.
- [26] C. Chabbert. Anatomie et physiologie du vestibule. *EMC*, 11(2):1–9, 2015.
- [27] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. *IEEE transactions on vehicular technology*, 59(2):589–598, 2009.
- [28] D. Chen, J. Laval, Z. Zheng, and S. Ahn. A behavioral car-following model that captures traffic oscillations. *Transportation research part B: methodological*, 46(6):744–761, 2012.
- [29] J. X. Chen. The evolution of computing: Alphago. *Computing in Science & Engineering*, 18(4):4, 2016.
- [30] N. Chen, M. Zhou, X. Dong, J. Qu, F. Gong, Y. Han, Y. Qiu, J. Wang, Y. Liu, Y. Wei, et al. Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in wuhan, china: a descriptive study. *The Lancet*, 395(10223):507–513, 2020.

- [31] C. Chen-Huang, R. A. McCrea, and J. M. Goldberg. Contributions of regularly and irregularly discharging vestibular-nerve inputs to the discharge of central vestibular neurons in the alert squirrel monkey. *Experimental brain research*, 114(3):405–422, 1997.
- [32] M. Chéron, A. Gilbert-d’Halluin, and A. Schuller. Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France. *Fondation pour la nature et l’homme*, 2017.
- [33] Y. Chihara, V. Wang, and D. J. Brown. Evidence for the utricular origin of the vestibular short-latency-evoked potential (vsep) to bone-conducted vibration in guinea pig. *Experimental brain research*, 229(2):157–170, 2013.
- [34] G. Clément, S. T. Moore, T. Raphan, and B. Cohen. Perception of tilt (somatogravic illusion) in response to sustained linear acceleration during space flight. *Experimental Brain Research*, 138(4):410–418, 2001.
- [35] G. Colin, Y. Chamaillard, A. Charlet, and D. Nelson-Gruel. Towards a friendly energy management strategy for hybrid electric vehicles with respect to pollution, battery and drivability. *Energies*, 7(9):6013–6030, 2014.
- [36] Collège de terminologie de l’automobile. Ecoconduite. www.culture.fr/franceterme/; critère de recherche: “écoconduite”. Date de consultation: 2020-01-20.
- [37] E. Commission et al. Un cadre pour les politiques en matière de climat et d’énergie à l’horizon 2030. *COM (2013)*, 169, 2013.
- [38] E. Commission et al. Un cadre d’action en matière de climat et d’énergie pour la période comprise entre 2020 et 2030. *COM (2014)*, 15, 2014.
- [39] E. Commission et al. The paris protocol—a blueprint for tackling global climate change beyond 2020. *COM (2015)*, 81, 2015.
- [40] E. E. Commission) et al. A european strategy for low-emission mobility. *Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions*, 2016.
- [41] Council of European Union. Règlement (EU) no 631/2019 du parlement européen et du conseil, 2019.
- [42] F. Courchamp and Y. Chavance. Peut-on encore espérer éviter une extinction de masse. *GEO Collection*, pages 6–9, 2018.
- [43] I. Curthoys and J. Grant. How does high-frequency sound or vibration activate vestibular receptors? *Experimental brain research*, 233(3):691–699, 2015.
- [44] I. S. Curthoys, J. W. Grant, A. M. Burgess, C. J. Pastras, D. J. Brown, and L. Manzari. Otolithic receptor mechanisms for vestibular-evoked myogenic potentials: A review. *Frontiers in neurology*, 9, 2018.
- [45] I. S. Curthoys, H. G. MacDougall, P.-P. Vidal, and C. de Waele. Sustained and transient vestibular systems: a physiological basis for interpreting vestibular function. *Frontiers in neurology*, 8:117, 2017.

- [46] I. S. Curthoys, V. Vulovic, L. Sokolic, J. Pogson, and A. M. Burgess. Irregular primary otolith afferents from the guinea pig utricular and saccular maculae respond to both bone conducted vibration and to air conducted sound. *Brain research bulletin*, 89(1-2):16–21, 2012.
- [47] J. Davis, J. Xue, E. Peterson, and J. Grant. Layer thickness and curvature effects on otoconial membrane deformation in the utricle of the red-ear slider turtle: static and modal analysis. *Journal of Vestibular Research*, 17(4):145–162, 2007.
- [48] M. de Lourdes Arredondo, Y. Tang, A. L. Rodríguez, S. Santillán, and R. Chávez. Estimation of indicated torque for performance monitoring in a diesel engine. In *International Symposium on Neural Networks*, pages 489–499. Springer, 2013.
- [49] G. De Nunzio, A. Sciarretta, I. B. Gharbia, and L. L. Ojeda. A constrained eco-routing strategy for hybrid electric vehicles based on semi-analytical energy management. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 355–361. IEEE, 2018.
- [50] G. De Nunzio, L. Thibault, and A. Sciarretta. Model-based eco-routing strategy for electric vehicles in large urban networks. In *Comprehensive energy management—eco routing & velocity profiles*, pages 81–99. Springer, 2017.
- [51] M. Debert. *Stratégies optimales multi-critères, prédictives, temps réel de gestion des flux d'énergie thermique et électrique dans un véhicule hybride*. PhD thesis, 2011.
- [52] M. Debert, G. Colin, G. Bloch, and Y. Chamailard. An observer looks at the cell temperature in automotive battery packs. *Control Engineering Practice*, 21(8):1035–1042, 2013.
- [53] M. Degironde. *Les cinétoses et leur prise en charge à l'officine*. PhD thesis, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2016.
- [54] P. Delhomme, M. Cristea, and F. Paran. Self-reported frequency and perceived difficulty of adopting eco-friendly driving behavior according to gender, age, and environmental concern. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 20:55–58, 2013.
- [55] W. Dib, A. Chasse, P. Moulin, A. Sciarretta, and G. Corde. Optimal energy management for an electric vehicle in eco-driving applications. *Control Engineering Practice*, 29:299–307, 2014.
- [56] W. Dib, A. Chasse, A. Sciarretta, and P. Moulin. Optimal energy management compliant with online requirements for an electric vehicle in eco-driving applications. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(30):334–340, 2012.
- [57] M. Dimiccoli, B. Girard, A. Berthoz, and D. Bennequin. Striola magica. a functional explanation of otolith geometry. *Journal of computational neuroscience*, 35(2):125–154, 2013.
- [58] I. El-Shawarby, K. Ahn, and H. Rakha. Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(1):13–30, 2005.

- [59] E. Ericsson. Variability in urban driving patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 5(5):337–354, 2000.
- [60] K. A. Ericsson and W. G. Chase. Exceptional memory. Technical report, CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA DEPT OF PSYCHOLOGY, 1982.
- [61] European Union. Emissions in the automotive sector.
- [62] M. W. Fagerland and L. Sandvik. The wilcoxon–mann–whitney test under scrutiny. *Statistics in medicine*, 28(10):1487–1497, 2009.
- [63] N. Feltovich. Nonparametric tests of differences in medians: Comparison of the wilcoxon–mann–whitney and robust rank-order tests. *Experimental Economics*, 6(3):273–297, Nov 2003.
- [64] C. Fernandez and J. M. Goldberg. Physiology of peripheral neurons innervating otolith organs of the squirrel monkey. i. response to static tilts and to long-duration centrifugal force. *Journal of neurophysiology*, 39(5):970–984, 1976.
- [65] C. Fernandez and J. M. Goldberg. Physiology of peripheral neurons innervating otolith organs of the squirrel monkey. iii. response dynamics. *Journal of neurophysiology*, 39(5):996–1008, 1976.
- [66] R. Feynman. Lumière et matière. *Une étrange histoire*. Ed du Seuil. Points Sciences, 1987.
- [67] D. L. Fisher, M. Rizzo, J. Caird, and J. D. Lee. *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. CRC Press, 2011.
- [68] P. M. Fitts and M. I. Posner. Human performance. 1967.
- [69] A. A. Franco. Multiscale modelling and numerical simulation of rechargeable lithium ion batteries: concepts, methods and challenges. *Rsc Advances*, 3(32):13027–13058, 2013.
- [70] D. Freedman and P. Diaconis. On the histogram as a density estimator: L₂ theory. *Probability theory and related fields*, 57(4):453–476, 1981.
- [71] C. Gianna, S. Heimbrand, and M. Gresty. Thresholds for detection of motion direction during passive lateral whole-body acceleration in normal subjects and patients with bilateral loss of labyrinthine function. *Brain research bulletin*, 40(5-6):443–447, 1996.
- [72] P. G. Gillespie and D. P. Corey. Myosin and adaptation by hair cells. *Neuron*, 19(5):955–958, 1997.
- [73] D. R. Godden and A. D. Baddeley. Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater. *British Journal of psychology*, 66(3):325–331, 1975.
- [74] J. M. Goldberg. Afferent diversity and the organization of central vestibular pathways. *Experimental brain research*, 130(3):277–297, 2000.
- [75] J. M. Goldberg and C. Fernandez. Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey: Iii. variations among units in their discharge properties. *Journal of neurophysiology*, 34(4):676–684, 1971.

- [76] M. E. Goldberg, M. F. Walker, and A. J. Hudspeth. The vestibular system. In E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell, S. Siegelbaum, A. J. Hudspeth, and S. Mack, editors, *Principles of Neural Science*, chapter 40, pages 917–934. McGraw-Hill Medical, New York, 2013.
- [77] L. Gonzales-Fuentes, K. Barbe, L. Barford, L. Lauwers, and L. Philips. A qualitative study of probability density visualization techniques in measurements. *Measurement*, 65:94–111, 2015.
- [78] W. Grant and I. Curthoys. Otoliths-accelerometer and seismometer; implications in vestibular evoked myogenic potential (vemp). *Hearing research*, 353:26–35, 2017.
- [79] M. Günther, N. Rauh, and J. F. Krems. Conducting a study to investigate eco-driving strategies with battery electric vehicles—a multiple method approach. *Transportation Research Procedia*, 25:2242–2256, 2017.
- [80] C. Guo, B. Yang, O. Andersen, C. S. Jensen, and K. Torp. Ecosky: Reducing vehicular environmental impact through eco-routing. In *2015 IEEE 31st International Conference on Data Engineering*, pages 1412–1415. IEEE, 2015.
- [81] L. Guzzella, A. Sciarretta, et al. *Vehicle propulsion systems*, volume 1. Springer, 2007.
- [82] S. Hadj-Saïd. *Optimisation énergétique Convexe pour véhicule Hybride électrique: vers une solution analytique*. PhD thesis, Université d’Orléans, 2018.
- [83] S. Hamdar. Driver behavior modeling. *Handbook of Intelligent Vehicles*, pages 537–558, 2012.
- [84] Y. N. Harari. *Sapiens: A brief history of humankind*. Random House, 2014.
- [85] F. He. *Nonparametric MANOVA Approaches for Non-Normal Multivariate Outcomes*. PhD thesis, University of Pittsburgh, 2013.
- [86] F. He, S. Mazumdar, G. Tang, T. Bhatia, S. J. Anderson, M. A. Dew, R. Krafty, V. Nimgaonkar, S. Deshpande, M. Hall, et al. Non-parametric manova approaches for non-normal multivariate outcomes with missing values. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 46(14):7188–7200, 2017.
- [87] J. Hecht. Meeting people’s expectations. *Nature*.
- [88] E. Helmers and P. Marx. Electric cars: technical characteristics and environmental impacts. *Environmental Sciences Europe*, 24(1):14, 2012.
- [89] U. Heyder and P. M. I. Delso. Objectivising drivability. *ATZ worldwide*, 116(6):28–31, 2014.
- [90] C. Hirshfeld. Disturbing effects of horizontal acceleration. Electric Railway Presidents’ Conference Committee, 1932.
- [91] F. Hlavacka, T. Mergner, and B. Bolha. Human self-motion perception during translatory vestibular and proprioceptive stimulation. *Neuroscience letters*, 210(2):83–86, 1996.
- [92] L. L. Hoberock. A survey of longitudinal acceleration comfort studies in ground transportation vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 99(2):76–84, 1977.

- [93] A. Houshmand and C. G. Cassandras. Eco-routing of plug-in hybrid electric vehicles in transportation networks. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1508–1513. IEEE, 2018.
- [94] Y. Huang, E. C. Ng, J. L. Zhou, N. C. Surawski, E. F. Chan, and G. Hong. Eco-driving technology for sustainable road transport: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93:596–609, 2018.
- [95] H. Inagaki, T. Taguchi, E. Yasuda, and Y. Iizuka. Evaluation of riding comfort: From the viewpoint of interaction of human body and seat for static, dynamic, long time driving. Technical report, SAE Technical Paper, 2000.
- [96] S. Internationa. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. *Standard J3016–201806*, 2018.
- [97] T. H. Itkonen, J. Pekkanen, O. Lappi, I. Kosonen, T. Luttinen, and H. Summala. Trade-off between jerk and time headway as an indicator of driving style. *PloS one*, 12(10):e0185856, 2017.
- [98] V. G. Ivancevic and T. T. Ivancevic. *Neuro-fuzzy associative machinery for comprehensive brain and cognition modelling*, volume 45. Springer, 2007.
- [99] M. M. Iversen and R. D. Rabbitt. Wave mechanics of the vestibular semicircular canals. *Biophysical journal*, 113(5):1133–1149, 2017.
- [100] R. Jaeger, A. Takagi, and T. Haslwanter. Modeling the relation between head orientations and otolith responses in humans. *Hearing research*, 173(1-2):29–42, 2002.
- [101] R. Jäger and T. Haslwanter. Otolith responses to dynamical stimuli: results of a numerical investigation. *Biological cybernetics*, 90(3):165–175, 2004.
- [102] T. Jansen. Introduction to the theory of complexity and approximation algorithms. In *Lectures on Proof Verification and Approximation Algorithms*, pages 5–28. Springer, 1998.
- [103] S. Javanmardi, E. Bideaux, J.-F. Trégouët, R. Trigui, H. Tattetrain, and E. N. Bourles. Driving style modelling for eco-driving applications. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):13866–13871, 2017.
- [104] D. M. Johnson. Introduction to and review of simulator sickness research. Technical report, ARMY RESEARCH INST FIELD UNIT FORT RUCKER AL, 2005.
- [105] T. A. Jones, S. M. Jones, S. Vijayakumar, A. Brugeaud, M. Bothwell, and C. Chabbert. The adequate stimulus for mammalian linear vestibular evoked potentials (vseps). *Hearing research*, 280(1-2):133–140, 2011.
- [106] T. A. Jones, C. Lee, G. C. Gaines, et al. On the high frequency transfer of mechanical stimuli from the surface of the head to the macular neuroepithelium of the mouse. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 16(2):189–204, 2015.
- [107] M. A. S. Kamal, M. Mukai, J. Murata, and T. Kawabe. Ecological driving based on preceding vehicle prediction using mpc. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1):3843–3848, 2011.

- [108] S. Khan and R. Chang. Anatomy of the vestibular system: a review. *NeuroRehabilitation*, 32(3):437–443, 2013.
- [109] V. Khorevin. The lagena (the third otolith endorgan in vertebrates). *Neurophysiology*, 40(2):142–159, 2008.
- [110] P. King. Aa member eco-driver survey. *AA Research Foundation*, 2011.
- [111] W. Köhler and E. T. Winter. The mentality of apes, 2nd rev. 1927.
- [112] M. Kuriyama, S. Yamamoto, and M. Miyatake. Theoretical study on eco-driving technique for an electric vehicle with dynamic programming. In *2010 International Conference on Electrical Machines and Systems*, pages 2026–2030. IEEE, 2010.
- [113] G. Leitmann. *The calculus of variations and optimal control: an introduction*, volume 24. Springer Science & Business Media, 2013.
- [114] F. Lenoir. *Lettre ouverte aux animaux (et à ceux qui les aiment)*. Fayard, 2017.
- [115] C. Leys, C. Ley, O. Klein, P. Bernard, and L. Licata. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, 49(4):764–766, 2013.
- [116] A. Li. *Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages: application aux véhicules électriques et hybrides*. PhD thesis, Université de Lyon, 2013.
- [117] L. Li, X. Wang, and J. Song. Fuel consumption optimization for smart hybrid electric vehicle during a car-following process. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87:17–29, 2017.
- [118] H. W. Lilliefors. On the kolmogorov-smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American statistical Association*, 62(318):399–402, 1967.
- [119] G. D. Logan and S. T. Klapp. Automatizing alphabet arithmetic: I. is extended practice necessary to produce automaticity? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17(2):179, 1991.
- [120] G. Lucas, A. Kemeny, D. Paillot, and F. Colombet. A simulation sickness study on a driving simulator equipped with a vibration platform. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 68:15–22, 2020.
- [121] L.-h. Luo, H. Liu, P. Li, and H. Wang. Model predictive control for adaptive cruise control with multi-objectives: comfort, fuel-economy, safety and car-following. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 11(3):191–201, 2010.
- [122] H. Luu. *Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d'un véhicule dans un contexte de sécurité et de confort: un compromis entre économie et écologie*. PhD thesis, Thèse doct. Université d'Evry Val d'Essonne, 2011.
- [123] A. Lysakowski and J. M. Goldberg. Morphophysiology of the vestibular periphery. In *The vestibular system*, pages 57–152. Springer, 2004.
- [124] C. Maag, C. Mark, and H.-P. Krüger. Development of a cognitive-emotional model for driver behavior. In *KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*, pages 242–251. Springer, 2010.

- [125] D. Maamria, K. Gillet, G. Colin, Y. Chamaillard, and C. Nouillant. On the use of dynamic programming in eco-driving cycle computation for electric vehicles. In *2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, pages 1288–1293. IEEE, 2016.
- [126] D. Maamria, K. Gillet, G. Colin, Y. Chamaillard, and C. Nouillant. Optimal eco-driving for conventional vehicles: Simulation and experiment. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):12557–12562, 2017.
- [127] D. Maamria, K. Gillet, G. Colin, Y. Chamaillard, and C. Nouillant. Computation of eco-driving cycles for hybrid electric vehicles: Comparative analysis. *Control Engineering Practice*, 71:44–52, 2018.
- [128] H. G. MacDougall, S. T. Moore, R. A. Black, N. Jolly, and I. S. Curthoys. On-road assessment of driving performance in bilateral vestibular-deficient patients. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1164(1):413–418, 2009.
- [129] C. M. Martinez, M. Heucke, F.-Y. Wang, B. Gao, and D. Cao. Driving style recognition for intelligent vehicle control and advanced driver assistance: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(3):666–676, 2017.
- [130] F. J. Massey Jr. The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, 46(253):68–78, 1951.
- [131] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, et al. Global warming of 1.5 c. *An IPCC Special Report on the impacts of global warming of, 1*, 2018.
- [132] MATLAB. *version 9.1.0 (R2016b)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2016.
- [133] S. Matsumoto, T. Park, and H. Kawashima. A comparative study on fuel consumption reduction effects of eco-driving instructions strategies. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 12(1):1–8, 2014.
- [134] R. C. McIlroy and N. A. Stanton. What do people know about eco-driving? *Ergonomics*, 60(6):754–769, 2017.
- [135] F. Mensing. *Optimal energy utilization in conventional, electric and hybrid vehicles and its application to eco-driving*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2013.
- [136] F. Mensing, E. Bideaux, R. Trigui, J. Ribet, and B. Jeanneret. Eco-driving: An economic or ecologic driving style? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38:110–121, 2014.
- [137] F. Mensing, E. Bideaux, R. Trigui, and H. Tattegrain. Trajectory optimization for eco-driving taking into account traffic constraints. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 18:55–61, 2013.
- [138] A. L. Mescher. The eye and ear: special sense organs. In A. L. Mescher and S. Junqueira, editors, *Basic histology text and atlas*, chapter 23. McGraw-Hill Medical, Philadelphia, 2010.
- [139] M. A. Meyer and G. D. Padfield. First steps in the development of handling qualities criteria for a civil tilt rotor. *Journal of the American helicopter society*, 50(1):33–45, 2005.

- [140] J. A. Michon. A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In *Human behavior and traffic safety*, pages 485–524. Springer, 1985.
- [141] J. Miller. Reaction time analysis with outlier exclusion: Bias varies with sample size. *The quarterly journal of experimental psychology*, 43(4):907–912, 1991.
- [142] T. Miro-Padovani. *Loi de gestion d'énergie embarquée pour véhicules hybrides: approche multi-objectif et modulaire*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2015.
- [143] M. Miyatake, M. Kuriyama, and Y. Takeda. Theoretical study on eco-driving technique for an electric vehicle considering traffic signals. In *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pages 733–738. IEEE, 2011.
- [144] M. Mruzek, I. Gajdác, L. Kučera, and D. Barta. Analysis of parameters influencing electric vehicle range. *Procedia Engineering*, 134:165–174, 2016.
- [145] M. Mruzek, I. Gajdác, L. Kučera, and T. Gajdošík. The possibilities of increasing the electric vehicle range. *Procedia engineering*, 192:621–625, 2017.
- [146] T. Müller, C. Gold, A. Eichinger, and K. Bengler. Identifying customer-oriented key aspects of perception with focus on longitudinal vehicle dynamics. *Advances in human aspects of road and rail transportation*, pages 205–215, 2012.
- [147] T. Müller, H. Hajek, L. Radić-Weißenfeld, and K. Bengler. Can you feel the difference? the just noticeable difference of longitudinal acceleration. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 57, pages 1219–1223. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2013.
- [148] T. Murofushi. Clinical application of vestibular evoked myogenic potential (vemp). *Auris Nasus Larynx*, 43(4):367–376, 2016.
- [149] E. Nault, G. Colin, K. Gillet, Y. Chamaillard, M. Zerar, N. Dollinger, and C. Nouillant. Towards an analytical eco-driving cycle computation for conventional cars. *IFAC-PapersOnLine*, 52(5):550–555, 2019.
- [150] J. Nègre and P. Delhomme. Drivers' self-perceptions about being an eco-driver according to their concern for the environment, beliefs on eco-driving, and driving behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 105:95–105, 2017.
- [151] T. O. Nelson. Savings and forgetting from long-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 10(5):568–576, 1971.
- [152] M. Neuhäuser. *Wilcoxon–Mann–Whitney Test*, pages 1656–1658. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [153] I. Neumann, T. Franke, P. Cocron, F. Bühler, and J. F. Krems. Eco-driving strategies in battery electric vehicle use—how do drivers adapt over time? *IET Intelligent Transport Systems*, 9(7):746–753, 2015.
- [154] Neuro Oreille. Les macules otolithiques. [http\protect\relax\unskip\penalty\@M\protect\leavevmode@ifvmode\kern+.1667em\relax:\@beginparpenalty=\@M\relax//www.neuroreille.com/levestibule/chapb/b2/f_accueil-chapb2.htm](http://protect\relax\unskip\penalty\@M\protect\leavevmode@ifvmode\kern+.1667em\relax:\@beginparpenalty=\@M\relax//www.neuroreille.com/levestibule/chapb/b2/f_accueil-chapb2.htm). Date de consultation : 2019-04-02.

- [155] A. Newell. *Reasoning, problem solving, and decision processes: The problem space as a fundamental category*. MIT Press, 1993.
- [156] A. Newell and H. A. Simon. *The simulation of human thought*. Rand Corporation, 1959.
- [157] A. Newell, H. A. Simon, et al. *Human problem solving*, volume 104. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1972.
- [158] J. Normey-Rico and E. Camacho. Pid control of dead-time processes. *Control of Dead-time Processes*, pages 85–130, 2007.
- [159] K. Ogata. *Modern control engineering*. Prentice Hall, 5 edition, 2010.
- [160] L. L. Ojeda, J. Han, A. Sciarretta, G. De Nunzio, and L. Thibault. A real-time eco-driving strategy for automated electric vehicles. In *2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 2768–2774. IEEE, 2017.
- [161] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and I. Young. *Signals and systems. 1983*, volume 2. Prentice Hall, 1983.
- [162] A.-D. Ourabah, B. Quost, A. Gayed, and T. Denceux. Estimating energy consumption of a phev using vehicle and on-board navigation data. In *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 755–760. IEEE, 2015.
- [163] N. Ozay, M. Sznaier, C. M. Lagoa, and O. I. Camps. A sparsification approach to set membership identification of switched affine systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(3):634–648, 2011.
- [164] J. Pailhous. *La représentation de l'espace urbain: l'exemple du chauffeur de taxi*. FeniXX, 1970.
- [165] C. Pastras, I. Curthoys, and D. Brown. In vivo recording of the vestibular microphonic in mammals. *Hearing research*, 354:38–47, 2017.
- [166] C. J. Pastras. *Assessment of Utricular Nerve, Hair Cell and Mechanical Function, in vivo*. PhD thesis, University of Sydney, 2018.
- [167] C. J. Pastras, I. S. Curthoys, and D. J. Brown. Dynamic response to sound and vibration of the guinea pig utricular macula, measured in vivo using laser doppler vibrometry. *Hearing research*, 370:232–237, 2018.
- [168] C. J. Pastras, I. S. Curthoys, L. Sokolic, and D. J. Brown. Suppression of the vestibular short-latency evoked potential by electrical stimulation of the central vestibular system. *Hearing research*, 361:23–35, 2018.
- [169] S. Pfanzelt, C. Rössert, M. Rohregger, S. Glasauer, L. E. Moore, and H. Straka. Differential dynamic processing of afferent signals in frog tonic and phasic second-order vestibular neurons. *Journal of Neuroscience*, 28(41):10349–10362, 2008.
- [170] H. Poincaré. *Science et méthode (1908)*. 1914.
- [171] R. A. Poldrack and J. D. Gabrieli. Characterizing the neural mechanisms of skill learning and repetition priming: evidence from mirror reading. *Brain*, 124(1):67–82, 2001.

- [172] D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, L. Katz, A.-S. LaMantia, J. O. McNamara, and S. Williams. *Neuroscience*, vol. 3, 2001.
- [173] Y. Qin, M.-H. Sohn, J. R. Anderson, V. A. Stenger, K. Fissell, A. Goode, and C. S. Carter. Predicting the practice effects on the blood oxygenation level-dependent (bold) function of fmri in a symbolic manipulation task. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(8):4951–4956, 2003.
- [174] J. Rasmussen. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3):257–266, 1983.
- [175] J. T. Reason. Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11):819–829, 1978.
- [176] J.-B. Receveur, S. Victor, and P. Melchior. Multi-criteria trajectory optimization for autonomous vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):12520–12525, 2017.
- [177] W. J. Rey. *Introduction to robust and quasi-robust statistical methods*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [178] P. Riedinger. *Contribution à la commande des systèmes complexes*. PhD thesis, 2010.
- [179] P. Riedinger, F. Kratz, et al. An optimal control approach for hybrid systems. *European Journal of Control*, 9(5):449–458, 2003.
- [180] C. C. Rolim, G. N. Gonçalves, T. L. Farias, and Ó. Rodrigues. Impacts of electric vehicle adoption on driver behavior and environmental performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54:706–715, 2012.
- [181] S. M. Rosengren, J. G. Colebatch, A. S. Young, S. Govender, and M. S. Welgampola. Vestibular evoked myogenic potentials in practice: methods, pitfalls and clinical applications. *Clinical Neurophysiology Practice*, 2019.
- [182] S. M. Rosengren, N. P. Todd, and J. G. Colebatch. Vestibular evoked myogenic potentials evoked by brief interaural head acceleration: properties and possible origin. *Journal of Applied Physiology*, 107(3):841–852, 2009.
- [183] L. Rundqwist. Anti-reset windup for pid controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 23(8):453–458, 1990.
- [184] B. Saerens. *Optimal control based eco-driving. Theoretical Approach and Practical Applications*. PhD thesis, Heverlee: Katholieke Universiteit Leuven, 2012.
- [185] F. Sagberg, Selpi, G. F. Bianchi Piccinini, and J. Engström. A review of research on driving styles and road safety. *Human factors*, 57(7):1248–1275, 2015.
- [186] D. D. Salvucci. Modeling driver behavior in a cognitive architecture. *Human factors*, 48(2):362–380, 2006.
- [187] D. D. Salvucci, E. R. Boer, and A. Liu. Toward an integrated model of driver behavior in cognitive architecture. *Transportation Research Record*, 1779(1):9–16, 2001.
- [188] M. S. Santina and A. R. Stubberud. Basics of sampling and quantization. In *Handbook of networked and embedded control systems*, pages 45–69. Springer, 2005.

- [189] A. Savitzky and M. J. Golay. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, 36(8):1627–1639, 1964.
- [190] R. W. Schafer. What is a savitzky-golay filter?[lecture notes]. *IEEE Signal processing magazine*, 28(4):111–117, 2011.
- [191] G. Schay. *A concise introduction to linear algebra*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [192] R. Schmied, H. Waschl, R. Quirynen, M. Diehl, and L. del Re. Nonlinear mpc for emission efficient cooperative adaptive cruise control. *IFAC-papersonline*, 48(23):160–165, 2015.
- [193] A. Sciarretta. Supervision des véhicules hybrides. In F. Badin, editor, *Les véhicules hybrides: Des composants au système*, chapter 6, pages 381–426. Editions Technip, Paris, 2013.
- [194] A. Sciarretta, G. De Nunzio, and L. L. Ojeda. Optimal ecodriving control: Energy-efficient driving of road vehicles as an optimal control problem. *IEEE Control Systems Magazine*, 35(5):71–90, 2015.
- [195] A. Sciarretta and A. Vahidi. *Energy-Efficient Driving of Road Vehicles*. Springer, 2020.
- [196] D. Shen, D. Karbowski, J. Jeong, N. Kim, and A. Rousseau. Energy-efficient cruise control using optimal control for a hybrid electric vehicle. In *EVS30 Symposium*, 2017.
- [197] D. Shen, D. Karbowski, and A. Rousseau. Fuel efficient speed optimization for real-world highway cruising. Technical report, SAE Technical Paper, 2018.
- [198] X. Si, D. E. Angelaki, and J. D. Dickman. Response properties of pigeon otolith afferents to linear acceleration. *Experimental brain research*, 117(2):242–250, 1997.
- [199] X. Si, M. M. Zakir, and J. D. Dickman. Afferent innervation of the utricular macula in pigeons. *Journal of Neurophysiology*, 89(3):1660–1677, 2003.
- [200] D. Silver, A. Huang, C. J. Maddison, A. Guez, L. Sifre, G. Van Den Driessche, J. Schrittwieser, I. Antonoglou, V. Panneershelvam, M. Lanctot, et al. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search. *nature*, 529(7587):484, 2016.
- [201] H. A. Simon et al. The scientist as problem solver. *Complex information processing: The impact of Herbert A. Simon*, pages 375–398, 1989.
- [202] H. A. Simon and A. Newell. Human problem solving: The state of the theory in 1970. *American Psychologist*, 26(2):145, 1971.
- [203] M. Sivak and B. Schoettle. Eco-driving: strategic, tactical, and operational decisions of the driver that improve vehicle fuel economy. Technical report, University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute, 2011.
- [204] M. Sivak and B. Schoettle. Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. *Transport Policy*, 22:96–99, 2012.
- [205] S. M. Smith, A. Glenberg, and R. A. Bjork. Environmental context and human memory. *Memory & Cognition*, 6(4):342–353, 1978.

- [206] E. Solano-Araque, G. Colin, G.-M. Cloarec, A. Ketfi-Cherif, and Y. Chamaillard. Energy analysis of eco-driving maneuvers on electric vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 51(31):195–200, 2018.
- [207] E. Solano-Araque, G. Colin, G.-M. Cloarec, A. Ketfi-Cherif, and Y. Chamaillard. Determining vehicle acceleration from noisy non-uniformly sampled speed data for control purposes. *IFAC-PapersOnLine*, 52(5):66–71, 2019.
- [208] J. E. Songer and R. A. Eatock. Tuning and timing in mammalian type i hair cells and calyceal synapses. *Journal of Neuroscience*, 33(8):3706–3724, 2013.
- [209] T. Stanger and L. del Re. A model predictive cooperative adaptive cruise control approach. In *2013 American Control Conference*, pages 1374–1379. IEEE, 2013.
- [210] W. Steffen. The anthropocene, global change and sleeping giants: where on earth are we going? *Carbon Balance and Management*, 1(1):3, 2006.
- [211] H. Straka, M. Beranek, M. Rohregger, L. E. Moore, P.-P. Vidal, and N. Vibert. Second-order vestibular neurons form separate populations with different membrane and discharge properties. *Journal of neurophysiology*, 92(2):845–861, 2004.
- [212] H. Summala. Towards understanding motivational and emotional factors in driver behaviour: Comfort through satisficing. In *Modelling driver behaviour in automotive environments*, pages 189–207. Springer, 2007.
- [213] A. Taymans, P. Melchior, R. Malti, F. Aioun, F. Guillemard, and A. Serval. Cruise control of an electric vehicle through fractional linear feedforward & prefiltering of an acceleration reference signal. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):12569–12574, 2017.
- [214] A. Telpaz, M. Baltaxe, R. M. Hecht, G. Cohen-Lazry, A. Degani, and G. Kamhi. An approach for measurement of passenger comfort: real-time classification based on in-cabin and exterior data. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 223–229. IEEE, 2018.
- [215] The Boston Consulting Group and Ipsos. The expectations of europeans in terms of mobility. European Mobilities Observatory - First edition, 2017.
- [216] The MathWorks Inc. *MATLAB Optimization Toolbox*. Natick, Massachusetts, 2016. version 7.5 (R2016b).
- [217] M. C. Thompson and D. W. Massaro. Visual information and redundancy in reading. *Journal of Experimental Psychology*, 98(1):49, 1973.
- [218] R. Tu, L. Alfaseeh, S. Djavadian, B. Farooq, and M. Hatzopoulou. Quantifying the impacts of dynamic control in connected and automated vehicles on greenhouse gas emissions and urban no2 concentrations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73:142–151, 2019.
- [219] N. Unies. Accord de paris. *Paris, Nations Unies*, 12, 2015.
- [220] T. Vaa. Modelling driver behaviour on basis of emotions and feelings: intelligent transport systems and behavioural adaptations. In *Modelling driver behaviour in automotive environments*, pages 208–232. Springer, 2007.

- [221] A. Vahidi and A. Sciarretta. Energy saving potentials of connected and automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95:822–843, 2018.
- [222] Y. Valko, R. F. Lewis, A. J. Priesol, and D. M. Merfeld. Vestibular labyrinth contributions to human whole-body motion discrimination. *Journal of Neuroscience*, 32(39):13537–13542, 2012.
- [223] F. Vangraefschèpe. Usage des véhicules. In F. Badin, editor, *Les véhicules hybrides: Des composants au système*, chapter 1, pages 1–59. Editions Technip, Paris, 2013.
- [224] N. Wan, A. Vahidi, and A. Luckow. Optimal speed advisory for connected vehicles in arterial roads and the impact on mixed traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69:548–563, 2016.
- [225] Y. Wang and S. Boyd. Fast model predictive control using online optimization. *IEEE Transactions on control systems technology*, 18(2):267–278, 2009.
- [226] K. WATANUKI, K. KAWAMOTO, and S. KATAGIRI. Structure of the otolithic layers on the maculae sacculi and utriculi in the guinea pig. *Equilibrium Research*, 29(suppl-2):41–48, 1971.
- [227] W. A. Wickelgren. Alcoholic intoxication and memory storage dynamics. *Memory & Cognition*, 3(4):385–389, 1975.
- [228] R. Wiedemann. *Simulation des verkehrsflusses*. PhD thesis, Institut für Verkehrswesen, 1974.
- [229] G. Wiest. The origins of vestibular science. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1343(1):1–9, 2015.
- [230] S. Xiong, H. Xie, and Q. Tong. The effects of an eco-driving assistance system for a city bus on driving style. *IFAC-PapersOnLine*, 51(31):331–336, 2018.
- [231] J. Xue and E. Peterson. Hair bundle heights in the utricle: differences between macular locations and hair cell types. *Journal of neurophysiology*, 95(1):171–186, 2006.
- [232] Z. Yi and P. H. Bauer. Optimal stochastic eco-routing solutions for electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(12):3807–3817, 2018.
- [233] M. Zhou, H. Jin, and W. Wang. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49:203–218, 2016.
- [234] J. Zhu, C. Ngo, and A. Sciarretta. Real-time optimal eco-driving for hybrid-electric vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 52(5):562–567, 2019.

ANNEXE I : ANALYSE DES DONNÉES RÉELLES DE CONDUITE

Nous présentons ici, de manière graphique, les résultats de l'identification de chacune des manœuvres étudiées dans le chapitre II.3.

Chaque barre est associée à une manœuvre. Celles en rouges correspondent aux phases initiales *atypiques*, d'après l'algorithme présenté précédemment. Nous pouvons noter la présence d'un nombre conséquent de valeurs atypiques d'à-coup, ce qui met en évidence une forte variabilité dans la réalisation de manœuvres par le conducteur.

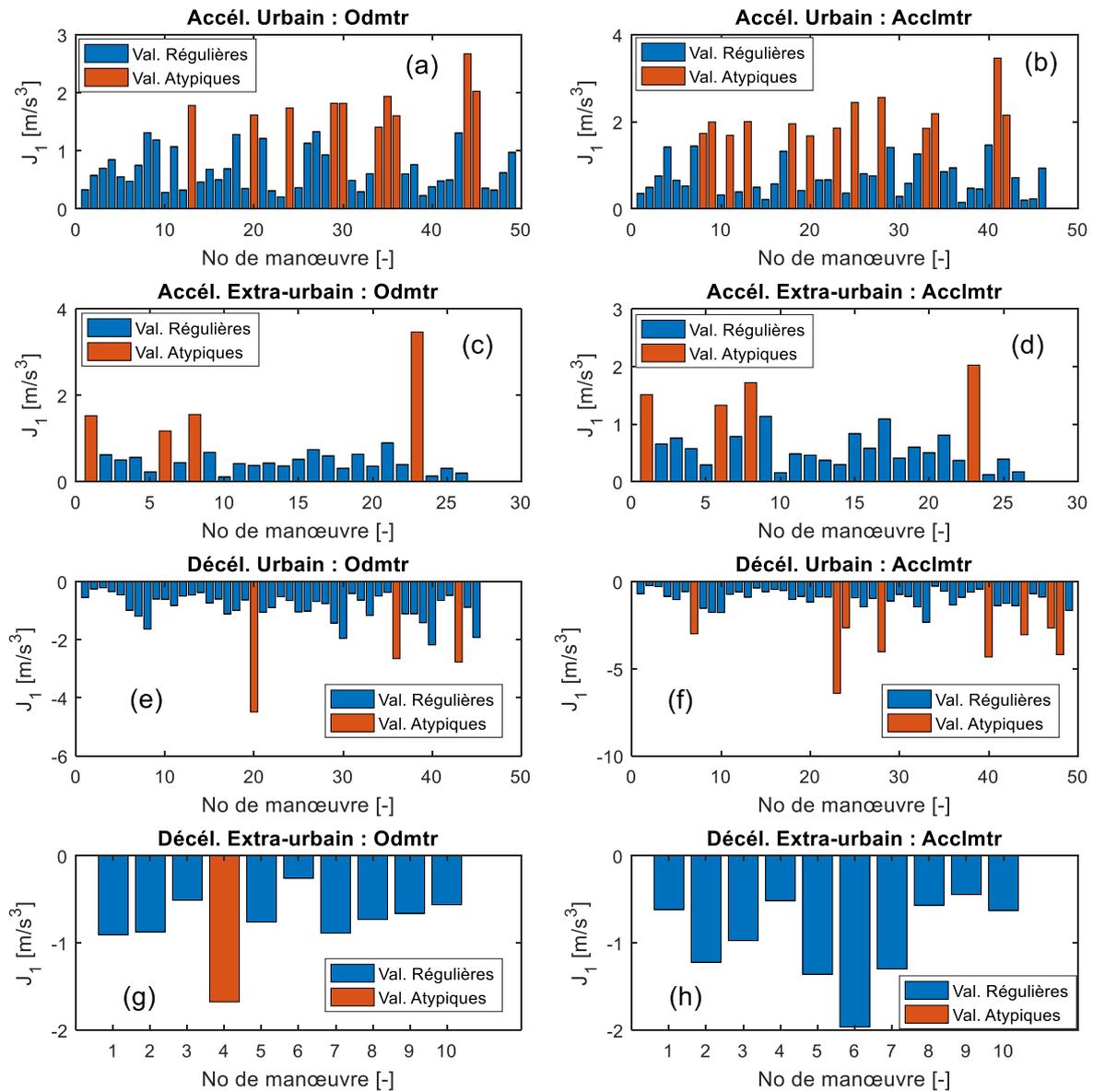


FIG. 1.1 – Valeurs d'à-coup de la phase initiale des manœuvres trapézoïdales issues des roulages réelles, J_1 . (a, c, e, g) référentiel véhicule, à partir des mesures issues de l'odométrie ; (b, d, f, h) référentiel du conducteur, à partir des mesures de l'accéléromètre. (a) et (b) Scénario urbain - manœuvres d'accélération, (c) et (d) Scénario urbain - manœuvres de décélération, (e) et (f) Scénario extra-urbain - manœuvres d'accélération, (g) et (h) Scénario extra-urbain - manœuvres de décélération

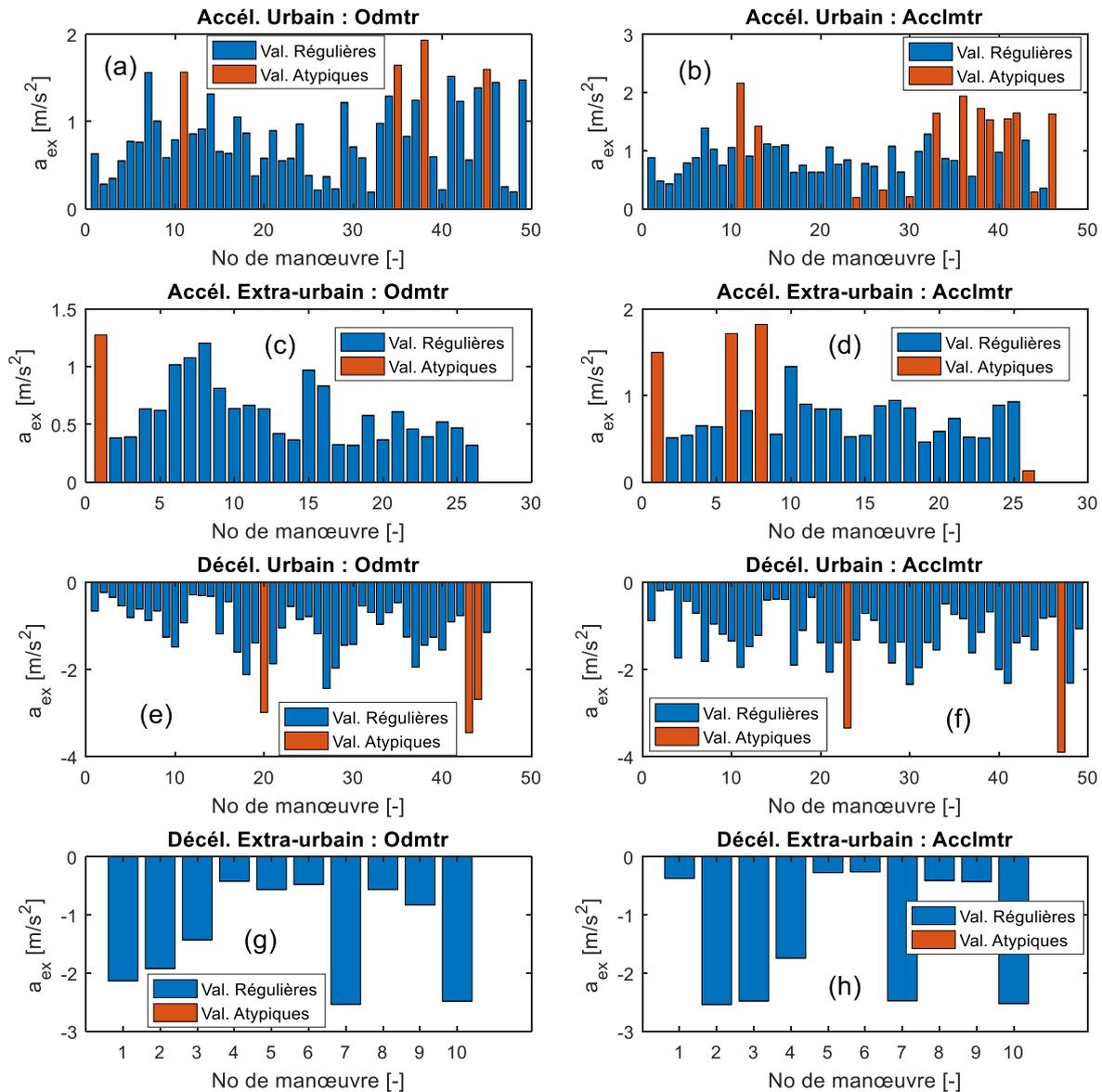


FIG. 1.3 – Valeurs d'accélération stabilisée des manœuvres trapézoïdales issues des roulages réelles, a_{ex} . (a, c, e, g) référentiel véhicule, à partir des mesures issues de l'odométrie; (b, d, f, h) référentiel du conducteur, à partir des mesures de l'accéléromètre. (a) et (b) Scénario urbain - manœuvres d'accélération, (c) et (d) Scénario urbain - manœuvres de décélération, (e) et (f) Scénario extra-urbain - manœuvres d'accélération, (g) et (h) Scénario extra-urbain - manœuvres de décélération

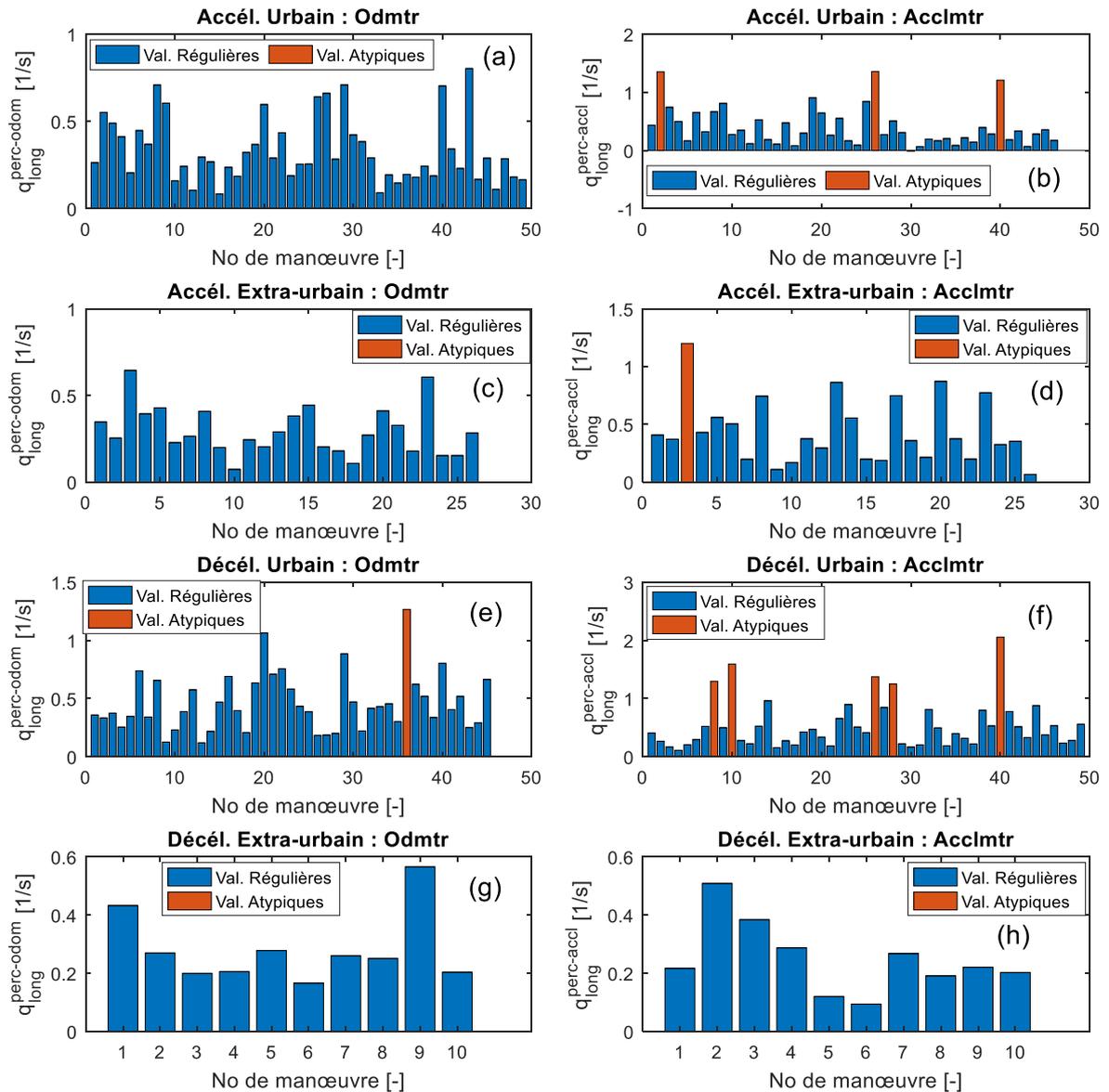


FIG. 1.4 – Valeurs de rapidité longitudinale des manœuvres trapézoïdales issues des roulages réelles, q_{long} . (a, c, e, g) référentiel véhicule, à partir des mesures issues de l'odométrie ; (b, d, f, h) référentiel du conducteur, à partir des mesures de l'accéléromètre. (a) et (b) Scénario urbain - manœuvres d'accélération, (c) et (d) Scénario urbain - manœuvres de décélération, (e) et (f) Scénario extra-urbain - manœuvres d'accélération, (g) et (h) Scénario extra-urbain - manœuvres de décélération

ANNEXE II : DÉMONSTRATIONS MATHÉMATIQUES

Dans cette section, nous présentons les démonstrations mathématiques des certaines des propositions qui ont été réalisées au cours de ce document.

THÉORÈMES DU CHAPITRE II.3

Théorème 1.1 Soient $\underline{\mathbf{a}}, \underline{\mathbf{t}} \in \mathbb{R}^n$ et la fonction

$$\begin{aligned} f_{tr} : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ \underline{\theta}, t &\rightarrow f_{tr}(\underline{\theta}, t) \end{aligned}$$

trouver la valeur $\underline{\theta}^*$, qui minimise la fonction $\|\underline{\nu}(\underline{\theta})\|_2$, permet de maximiser la valeur de la fonction de log-vraisemblance associée à une distribution gaussienne.

Démonstration. Etant donné que nous supposons que le bruit est gaussien, les résidus ν_i doivent suivre une distribution gaussienne, sous la forme de (1.1), avec $\nu \in \mathbb{R}$ et où σ est l'écart type de la distribution.

$$p_\nu(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{\nu^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1)$$

En supposant que les événements de bruit (pour un jeu de paramètres $\underline{\theta}$), $\underline{\nu}$, sont indépendants, la fonction de vraisemblance correspond au produit des probabilités d'occurrence de chaque événement :

$$\mathcal{P}_{\underline{\nu}}(\underline{\nu}) = \prod_{i=1}^n p_{\nu}(\nu_i) \quad (1.2)$$

Étant donné que ν_i dépend du choix des paramètres $\underline{\theta}$, $\mathcal{P}_{\underline{\nu}}$ est une fonction de $\underline{\theta}$:

$$\mathcal{P}_{\underline{\nu}}(\underline{\mathbf{a}}, \underline{\theta}) = \prod_{i=1}^n p_{\nu}(a_i - f_{tr}(\underline{\theta}, t_i)) \quad (1.3)$$

Il est plus convenable de travailler avec le logarithme de la fonction de vraisemblance, ce qui permet d'obtenir la fonction de log-vraisemblance :

$$l(\underline{\theta}) = \log(\mathcal{P}_{\underline{\nu}}(\underline{\mathbf{a}}, \underline{\theta})) = \log \left[\prod_{i=1}^n p_{\nu}(a_i - f_{tr}(\underline{\theta}, t_i)) \right] = \sum_{i=1}^n \log(p_{\nu}(a_i - f_{tr}(\underline{\theta}, t_i))) \quad (1.4)$$

Le vecteur de paramètres $\underline{\theta}^*$ qui maximise la log-vraisemblance (c-à-d, qui génèrent les résidus $\underline{\nu}(\underline{\theta}^*)$ qui ont le plus de probabilité de venir d'une distribution gaussienne), peut être retrouvé en résolvant le problème d'optimisation suivant :

$$\underset{\underline{\theta}}{\text{maximiser}} \quad l(\underline{\theta}) = \sum_{i=1}^n \log(p_v(a_i - f_{tr}(\underline{\theta}, t_i))) \quad (1.5)$$

Nous pouvons ré-écrire $l(\underline{\theta})$ comme :

$$\begin{aligned} l(\underline{\theta}) &= \sum_{i=1}^n \log\left((2\pi\sigma^2)^{-1/2} e^{-\frac{v_i(\underline{\theta})^2}{2\sigma^2}}\right) = \sum_{i=1}^n \log\left((2\pi\sigma^2)^{-1/2}\right) + \sum_{i=1}^n \left(-\frac{v_i^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= -\frac{n}{2} \log(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n v_i^2(\underline{\theta}) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Le premier terme étant constant par rapport à $\underline{\theta}$, le problème revient à :

$$\underset{\underline{\theta}}{\text{maximiser}} \quad -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n v_i^2(\underline{\theta}) \quad (1.7)$$

Le maximum d'une fonction est égal au minimum du produit de la fonction par -1 . De plus, le produit d'une fonction par une constante positive ne change pas le minimum de la fonction. Ainsi, un problème d'optimisation équivalent est :

$$\underset{\underline{\theta}}{\text{minimiser}} \quad \sum_{i=1}^n v_i^2(\underline{\theta}) = \underline{v}^T(\underline{\theta}) \cdot \underline{v}(\underline{\theta}) = (\|\underline{v}(\underline{\theta})\|_2)^2 \quad (1.8)$$

Finalement, optimiser la racine carrée d'une fonction dans \mathbb{R}_+ est un problème équivalent. Ainsi, la solution du problème (1.6) peut être trouvée en résolvant :

$$\underset{\underline{\theta}}{\text{minimiser}} \quad \|\underline{v}(\underline{\theta})\|_2 \quad (1.9)$$

□

Théorème 1.2 $f_0(\tau)$ est une fonction convexe en \mathbb{R}_{++} si la condition $\frac{(\tilde{J}_i - c_J)^4}{b_J^2} \leq 16$ est respectée.

Démonstration. Nous allons d'abord appliquer un changement de variable, en introduisant la variable $\gamma = \tau + d_J$. Prouver la convexité de $f_0(\gamma)$ démontre celle de $f_0(\tau)$ dans la mesure où la composition avec une fonction affine préserve la convexité [22]. Ainsi, $f_0(\gamma)$ est donnée par :

$$\begin{aligned} f_0(\gamma) &= \gamma^2 - 2(\tilde{\tau}_i + d_J)(\gamma - d_J) + \left[\tilde{\tau}_i^2 + (\tilde{J}_i - c_J)^2 - d_J^2\right] \\ &\quad - 2(\tilde{J}_i - c_J)b_J\gamma^{-1} + b_J^2\gamma^{-2} \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$f_0(\gamma) = b_J^2\gamma^{-2} - 2(\tilde{J}_i - c_J)b_J\gamma^{-1} + \left[(\tilde{\tau}_i + d_J)^2 + (\tilde{J}_i - c_J)^2\right] - 2(\tilde{\tau}_i + d_J)\gamma + \gamma^2$$

Pour analyser la convexité, nous devons calculer la dérivée seconde de $f_0(\gamma)$:

$$\frac{df_0}{d\gamma}(\gamma) = -2b_J^2\gamma^{-3} + 2(\tilde{J}_i - c_J)b_J\gamma^{-2} - 2(\tilde{\tau}_i + d_J) + 2\gamma \quad (1.11)$$

$$\frac{d^2f_0}{d\gamma^2}(\gamma) = [6b_J^2]\gamma^{-4} - [4(\tilde{J}_i - c_J)b_J]\gamma^{-3} + 2 \quad (1.12)$$

$f_0(\tau)$ est une fonction convexe en \mathbb{R}_{++} si

$$\frac{d^2f_0}{d\gamma^2}(\gamma) \geq 0 \quad , \quad \forall \gamma \in \mathbb{R}_{++} - d_J \quad (1.13)$$

Cela implique qu'il y a deux conditions pour que γ^* soit un minimum local de $\frac{d^2 f_0}{d\gamma^2}(\gamma)$ sur $\mathbb{R}_{++} - d_J$ (sur l'équation (1.14), nous supposons que r existe et qu'il est *suffisamment petit*):

$$\min_{\{\gamma: |\gamma - \gamma^*| \leq r\}} \frac{d^2 f_0}{d\gamma^2}(\gamma) \Rightarrow \frac{d^3 f_0}{d\gamma^3}(\gamma^*) = 0 \quad \wedge \quad \frac{d^4 f_0}{d\gamma^4}(\gamma^*) \geq 0 \quad (1.14)$$

Ainsi, la première condition peut-être exprimée comme suit :

$$\frac{d^3 f_0}{d\gamma^3}(\gamma^*) = - [24b_J^2] (\gamma^*)^{-5} + [12(\tilde{J}_i - c_J) b_J] (\gamma^*)^{-4} = 0 \quad (1.15)$$

A partir de (1.15), nous pouvons déterminer la valeur de γ^* à partir de (1.16). Étant donné que le polynôme considéré possède une seule racine finie, γ^* est un extremum global dans le domaine considéré.

$$\gamma^* = \frac{2b_J}{\tilde{J}_i - c_J} \quad (1.16)$$

Ce qui implique que la solution du problème original est :

$$\tau^* = \gamma^* - d_J = \frac{2b_J}{\tilde{J}_i - c_J} - d_J \quad (1.17)$$

γ^* correspond bien à un minimum car³:

$$\frac{d^4 f_0}{d\gamma^4}(\gamma^*) = \frac{3}{8} \frac{(\tilde{J}_i - c_J)^6}{b_J^4} \geq 0 \quad , \quad \forall \tilde{J}_i, c_J, b_J \in \mathbb{R} \quad (1.18)$$

Nous pouvons désormais calculer la valeur minimale de $\frac{d^2 f_0}{d\gamma^2}(\gamma)$:

$$\min_{\gamma \in \mathbb{R}_{++} - d_J} \frac{d^2 f_0}{d\gamma^2}(\gamma) = \frac{d^2 f_0}{d\gamma^2}(\gamma^*) = -\frac{1}{8} \frac{(\tilde{J}_i - c_J)^4}{b_J^2} + 2 \quad (1.19)$$

En appliquant la valeur minimale de $\frac{d^2 f_0}{d\gamma^2}$ à la condition de convexité (1.13), nous obtenons la condition (1.20), qui garantit la convexité du problème d'optimisation.

$$\frac{(\tilde{J}_i - c_J)^4}{b_J^2} \leq 16 \quad (1.20)$$

□

3. A titre d'information : $\frac{d^4 f_0}{d\gamma^4}(\gamma^*) = [2^3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot b_J^2] (\gamma^*)^{-6} - [2^4 \cdot 3 \cdot (\tilde{J}_i - c_J) b_J] (\gamma^*)^{-5}$

ANNEXE III : MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DES MANŒUVRES : CALCULS SUPPLÉMENTAIRES

Dans cette section, nous présentons certains de calculs intermédiaires qui ont permis d'obtenir les résultats présentés de la section III.1.2.3.

MODÉLISATION DU VÉHICULE

D'après (1.23), \tilde{F}_{res} est donné par :

$$\tilde{F}_{res} = b_2 V_{veh}^2 + b_1 V_{veh} + b_0$$

Ainsi, nous devons d'abord la valeur instantanée du carré de la vitesse, V_{veh}^2 , tel qu'il est montré ci-dessous :

$$V_{veh}^2(t) = \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} v_0^2 + (2a_0 v_0)t + (a_0^2 + J_1 v_0)t^2 \\ + (J_1 a_0)t^3 + \left(\frac{J_1^2}{4}\right)t^4 \end{array} \right] , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[\begin{array}{l} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 \right]^2 \\ 2a_{ex} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 \right] t + [a_{ex}^2] t^2 \end{array} \right] , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\begin{array}{l} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right]^2 \\ \left(\begin{array}{l} 2[a_{ex} + J_3(\tau_1 + \tau_2)] \\ \times \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \end{array} \right) t \\ \left[\begin{array}{l} [a_{ex} + J_3(\tau_1 + \tau_2)]^2 \\ - J_3 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex})\tau_1 + \frac{J_1}{2}\tau_1^2 - \frac{J_3}{2}(\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \end{array} \right] t^2 \\ - J_3 [a_{ex} + J_3(\tau_1 + \tau_2)] t^3 + \left[\frac{J_3^2}{4} \right] t^4 \end{array} \right] , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{array} \right. \quad (1.21)$$

Ensuite, il est possible de calculer l'estimation de \tilde{F}_{res} , comme suit :

$$\tilde{F}_{res}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} [b_2 v_0^2 + b_1 v_0 + b_0] + a_0 [2 b_2 v_0 + b_1] t \\ [b_2 a_0^2 + \frac{J_1}{2} (2 b_2 v_0 + b_1)] t^2 \\ + [b_2 J_1 a_0] t^3 + \left[\frac{b_2 J_1^2}{4} \right] t^4 \end{array} \right] , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[\begin{array}{l} b_2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right)^2 \\ + b_1 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right) + b_0 \\ + a_{ex} \left[2 b_2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right) + b_1 \right] t \\ + [b_2 a_{ex}^2] t^2 \end{array} \right] , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\begin{array}{l} b_2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right)^2 \\ + b_1 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right) + b_0 \\ + \left(\begin{array}{l} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \\ \times \left[2 b_2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right) + b_1 \right] \end{array} \right) t \\ + \left[b_2 [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)]^2 - \frac{J_3}{2} \left[2 b_2 \left(v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right) + b_1 \right] \right] t^2 \\ - b_2 J_3 [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] t^3 + \left[\frac{b_2 J_3^2}{4} \right] t^4 \end{array} \right] , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{array} \right. \quad (1.22)$$

MODÉLISATION DE LA MOTORISATION

Le calcul de la puissance instantanée en entrée de la motorisation demande de connaître les valeurs instantanées de ω_{me}^2 , \tilde{T}_{me}^2 et $\omega_{me} \tilde{T}_{me}$ (cf. section III.1.2.3.2). Nous présentons ici la formulation analytique de ces variables intermédiaires.

La valeur instantanée du carré du régime de la ME, $\omega_{me}^2(t)$, est donné par (1.23).

$$\omega_{me}^2(t) = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} k_t^2 v_0^2 + (2k_t^2 a_0 v_0) t + k_t^2 (a_0^2 + J_1 v_0) t^2 \\ + (k_t^2 J_1 a_0) t^3 + \left(\frac{k_t^2 J_1^2}{4} \right) t^4 \end{array} \right] & , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[\begin{array}{l} k_t^2 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right]^2 \\ 2k_t^2 a_{ex} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] t + [k_t^2 a_{ex}^2] t^2 \end{array} \right] & , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\begin{array}{l} k_t^2 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right]^2 \\ \left(\begin{array}{l} 2k_t^2 [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \\ \times \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \end{array} \right) t \\ [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)]^2 \\ - J_3 \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] t^2 \\ - J_3 k_t^2 [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] t^3 + \left[\frac{k_t^2 J_3^2}{4} \right] t^4 \end{array} \right] & , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.23)$$

La valeur instantanée du carré de l'estimation du couple de la ME, $\tilde{T}_{me}^2(t)$, est donnée par (1.24). Les coefficients $\varphi_{i,j}$ sont définis sur la section III.1.2.3.1.

$$\tilde{T}_{me}^2(t) = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\varphi_{1,0}^2}{k_t^2} \right) + \left(\frac{2\varphi_{1,0}\varphi_{1,1}}{k_t^2} \right) t + \left(\frac{\varphi_{1,1}^2 + 2\varphi_{1,0}\varphi_{1,2}}{k_t^2} \right) t^2 \\ + \left(\frac{2(\varphi_{1,0}\varphi_{1,3} + \varphi_{1,1}\varphi_{1,2})}{k_t^2} \right) t^3 \\ + \left(\frac{\varphi_{1,2}^2 + 2\varphi_{1,1}\varphi_{1,3} + 2\varphi_{1,0}\varphi_{1,4}}{k_t^2} \right) t^4 \\ + \left(\frac{2(\varphi_{1,1}\varphi_{1,4} + \varphi_{1,2}\varphi_{1,3})}{k_t^2} \right) t^5 \\ + \left(\frac{\varphi_{1,3}^2 + 2\varphi_{1,2}\varphi_{1,4}}{k_t^2} \right) t^6 + \left(\frac{2\varphi_{1,3}\varphi_{1,4}}{k_t^2} \right) t^7 + \left(\frac{\varphi_{1,4}^2}{k_t^2} \right) t^8 \end{array} \right] & , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\varphi_{2,0}^2}{k_t^2} \right) + \left(\frac{2\varphi_{2,0}\varphi_{2,1}}{k_t^2} \right) t \\ + \left(\frac{\varphi_{2,1}^2 + 2\varphi_{2,0}\varphi_{2,2}}{k_t^2} \right) t^2 \\ + \left(\frac{2\varphi_{2,1}\varphi_{2,2}}{k_t^2} \right) t^3 + \left(\frac{\varphi_{2,2}^2}{k_t^2} \right) t^4 \end{array} \right] & , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\varphi_{3,0}^2}{k_t^2} \right) + \left(\frac{2\varphi_{3,0}\varphi_{3,1}}{k_t^2} \right) t + \left(\frac{\varphi_{3,1}^2 + 2\varphi_{3,0}\varphi_{3,2}}{k_t^2} \right) t^2 \\ + \left(\frac{2(\varphi_{3,0}\varphi_{3,3} + \varphi_{3,1}\varphi_{3,2})}{k_t^2} \right) t^3 \\ + \left(\frac{\varphi_{3,2}^2 + 2\varphi_{3,1}\varphi_{3,3} + 2\varphi_{3,0}\varphi_{3,4}}{k_t^2} \right) t^4 \\ + \left(\frac{2(\varphi_{3,1}\varphi_{3,4} + \varphi_{3,2}\varphi_{3,3})}{k_t^2} \right) t^5 \\ + \left(\frac{\varphi_{3,3}^2 + 2\varphi_{3,2}\varphi_{3,4}}{k_t^2} \right) t^6 + \left(\frac{2\varphi_{3,3}\varphi_{3,4}}{k_t^2} \right) t^7 + \left(\frac{\varphi_{3,4}^2}{k_t^2} \right) t^8 \end{array} \right] & , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.24)$$

Finalement, la valeur instantanée du produit du régime et du couple de la ME, $\omega_{me} \tilde{T}_{me}(t)$,

est donné par (1.25). Cette valeur correspond à la puissance instantanée en sortie de la motorisation.

$$\omega_{me} \tilde{T}_{me}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} [v_0 \varphi_{1,0}] + [v_0 \varphi_{1,1} + a_0 \varphi_{1,0}] t \\ + \left[v_0 \varphi_{1,2} + a_0 \varphi_{1,1} + \frac{J_1 \varphi_{1,0}}{2} \right] t^2 \\ + \left[v_0 \varphi_{1,3} + a_0 \varphi_{1,2} + \frac{J_1 \varphi_{1,1}}{2} \right] t^3 \\ + \left[v_0 \varphi_{1,4} + a_0 \varphi_{1,3} + \frac{J_1 \varphi_{1,2}}{2} \right] t^4 \\ + \left[a_0 \varphi_{1,4} + \frac{J_1 \varphi_{1,3}}{2} \right] t^5 + \left[\frac{J_1 \varphi_{1,4}}{2} \right] t^6 \end{array} \right. \right. , \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ \left[\begin{array}{l} \varphi_{2,0} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] \\ + \left[\varphi_{2,0} a_{ex} + \varphi_{2,1} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] \right] t \\ + \left[\varphi_{2,1} a_{ex} + \varphi_{2,2} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 \right] \right] t^2 \\ + \left[\varphi_{2,2} a_{ex} \right] t^3 \end{array} \right. \right. , \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \left[\begin{array}{l} \varphi_{3,0} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \\ + \left[\begin{array}{l} \varphi_{3,0} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \\ + \varphi_{3,1} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \end{array} \right] t \\ + \left[\begin{array}{l} -\frac{\varphi_{3,0} J_3}{2} + \varphi_{3,1} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \\ + \varphi_{3,2} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \end{array} \right] t^2 \\ + \left[\begin{array}{l} -\frac{\varphi_{3,1} J_3}{2} + \varphi_{3,2} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \\ + \varphi_{3,3} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \end{array} \right] t^3 \\ + \left[\begin{array}{l} -\frac{\varphi_{3,2} J_3}{2} + \varphi_{3,3} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \\ + \varphi_{3,4} \left[v_0 + (a_0 - a_{ex}) \tau_1 + \frac{J_1}{2} \tau_1^2 - \frac{J_3}{2} (\tau_1 + \tau_2)^2 \right] \end{array} \right] t^4 \\ + \left[-\frac{\varphi_{3,3} J_3}{2} + \varphi_{3,4} [a_{ex} + J_3 (\tau_1 + \tau_2)] \right] t^5 + \left[\frac{\varphi_{3,4} J_3}{2} \right] t^6 \end{array} \right. \right. , \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{array} \right. \quad (1.25)$$

MODÉLISATION DE LA BATTERIE

La variation de l'énergie stockée dans la batterie est donnée par (cf. section III.1.1.2.3) :

$$\tilde{P}_{bat}(t) = \tilde{P}_{elec}(t) + \rho_{bat} \tilde{P}_{elec}^2(t)$$

Cela demande donc de connaître la valeur instantanée du carré de la puissance aux bornes de la batterie, $\tilde{P}_{elec}^2(t)$, qui peut être calculée en appliquant (1.26) :

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_{elec}^2(t) = & \left\{ \begin{aligned} & \left[(P_{aux} + \zeta_{1,0})^2 + 2[(P_{aux} + \zeta_{1,0}) \zeta_{1,1}] t + [\zeta_{1,1}^2 + 2(P_{aux} + \zeta_{1,0}) \zeta_{1,2}] t^2 \right. \\ & \quad + 2[\zeta_{1,1} \zeta_{1,2} + (P_{aux} + \zeta_{1,0}) \zeta_{1,3}] t^3 \\ & \quad + [\zeta_{1,2}^2 + 2\zeta_{1,1} \zeta_{1,3} + 2(P_{aux} + \zeta_{1,0}) \zeta_{1,4}] t^4 \\ & \quad + 2[\zeta_{1,2} \zeta_{1,3} + \zeta_{1,1} \zeta_{1,4} + (P_{aux} + \zeta_{1,0}) \zeta_{1,5}] t^5 \\ & \quad + [\zeta_{1,3}^2 + 2\zeta_{1,2} \zeta_{1,4} + 2\zeta_{1,1} \zeta_{1,5} + 2(P_{aux} + \zeta_{1,0}) \zeta_{1,6}] t^6 \\ & \quad + 2[\zeta_{1,3} \zeta_{1,4} + \zeta_{1,2} \zeta_{1,5} + \zeta_{1,1} \zeta_{1,6} + (P_{aux} + \zeta_{1,0}) \zeta_{1,7}] t^7 \\ & \quad + [\zeta_{1,4}^2 + 2\zeta_{1,3} \zeta_{1,5} + 2\zeta_{1,2} \zeta_{1,6} + 2\zeta_{1,1} \zeta_{1,7} + 2(P_{aux} + \zeta_{1,0}) \zeta_{1,8}] t^8 \\ & \quad + 2[\zeta_{1,4} \zeta_{1,5} + \zeta_{1,3} \zeta_{1,6} + \zeta_{1,2} \zeta_{1,7} + \zeta_{1,1} \zeta_{1,8}] t^9 \\ & \quad + [\zeta_{1,5}^2 + 2\zeta_{1,4} \zeta_{1,6} + 2\zeta_{1,3} \zeta_{1,7} + 2\zeta_{1,2} \zeta_{1,8}] t^{10} \\ & \quad + 2[\zeta_{1,5} \zeta_{1,6} + \zeta_{1,4} \zeta_{1,7} + \zeta_{1,3} \zeta_{1,8}] t^{11} \\ & \quad + [\zeta_{1,6}^2 + 2\zeta_{1,5} \zeta_{1,7} + 2\zeta_{1,4} \zeta_{1,8}] t^{12} \\ & \quad + 2[\zeta_{1,6} \zeta_{1,7} + \zeta_{1,5} \zeta_{1,8}] t^{13} \\ & \quad + [\zeta_{1,7}^2 + 2\zeta_{1,6} \zeta_{1,8}] t^{14} + 2[\zeta_{1,7} \zeta_{1,8}] t^{15} + [\zeta_{1,8}^2] t^{16} \end{aligned} \right. , & \quad 0 \leq t < \tau_1 \\ & \left[(P_{aux} + \zeta_{2,0})^2 + 2[(P_{aux} + \zeta_{2,0}) \zeta_{2,1}] t + [\zeta_{2,1}^2 + 2(P_{aux} + \zeta_{2,0}) \zeta_{2,2}] t^2 \right. \\ & \quad + 2[\zeta_{2,1} \zeta_{2,2} + (P_{aux} + \zeta_{2,0}) \zeta_{2,3}] t^3 \\ & \quad + [\zeta_{2,2}^2 + 2\zeta_{2,1} \zeta_{2,3} + 2(P_{aux} + \zeta_{2,0}) \zeta_{2,4}] t^4 \\ & \quad + 2[\zeta_{2,2} \zeta_{2,3} + \zeta_{2,1} \zeta_{2,4}] t^5 + [\zeta_{2,3}^2 + 2\zeta_{2,2} \zeta_{2,4}] t^6 \\ & \quad + 2[\zeta_{2,3} \zeta_{2,4}] t^7 + [\zeta_{2,4}^2] t^8 \end{aligned} \left. \right. , & \quad \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ & \left[(P_{aux} + \zeta_{3,0})^2 + 2[(P_{aux} + \zeta_{3,0}) \zeta_{3,1}] t + [\zeta_{3,1}^2 + 2(P_{aux} + \zeta_{3,0}) \zeta_{3,2}] t^2 \right. \\ & \quad + 2[\zeta_{3,1} \zeta_{3,2} + (P_{aux} + \zeta_{3,0}) \zeta_{3,3}] t^3 \\ & \quad + [\zeta_{3,2}^2 + 2\zeta_{3,1} \zeta_{3,3} + 2(P_{aux} + \zeta_{3,0}) \zeta_{3,4}] t^4 \\ & \quad + 2[\zeta_{3,2} \zeta_{3,3} + \zeta_{3,1} \zeta_{3,4} + (P_{aux} + \zeta_{3,0}) \zeta_{3,5}] t^5 \\ & \quad + [\zeta_{3,3}^2 + 2\zeta_{3,2} \zeta_{3,4} + 2\zeta_{3,1} \zeta_{3,5} + 2(P_{aux} + \zeta_{3,0}) \zeta_{3,6}] t^6 \\ & \quad + 2[\zeta_{3,3} \zeta_{3,4} + \zeta_{3,2} \zeta_{3,5} + \zeta_{3,1} \zeta_{3,6} + (P_{aux} + \zeta_{3,0}) \zeta_{3,7}] t^7 \\ & \quad + [\zeta_{3,4}^2 + 2\zeta_{3,3} \zeta_{3,5} + 2\zeta_{3,2} \zeta_{3,6} + 2\zeta_{3,1} \zeta_{3,7} + 2(P_{aux} + \zeta_{3,0}) \zeta_{3,8}] t^8 \\ & \quad + 2[\zeta_{3,4} \zeta_{3,5} + \zeta_{3,3} \zeta_{3,6} + \zeta_{3,2} \zeta_{3,7} + \zeta_{3,1} \zeta_{3,8}] t^9 \\ & \quad + [\zeta_{3,5}^2 + 2\zeta_{3,4} \zeta_{3,6} + 2\zeta_{3,3} \zeta_{3,7} + 2\zeta_{3,2} \zeta_{3,8}] t^{10} \\ & \quad + 2[\zeta_{3,5} \zeta_{3,6} + \zeta_{3,4} \zeta_{3,7} + \zeta_{3,3} \zeta_{3,8}] t^{11} \\ & \quad + [\zeta_{3,6}^2 + 2\zeta_{3,5} \zeta_{3,7} + 2\zeta_{3,4} \zeta_{3,8}] t^{12} \\ & \quad + 2[\zeta_{3,6} \zeta_{3,7} + \zeta_{3,5} \zeta_{3,8}] t^{13} \\ & \quad + [\zeta_{3,7}^2 + 2\zeta_{3,6} \zeta_{3,8}] t^{14} + 2[\zeta_{3,7} \zeta_{3,8}] t^{15} + [\zeta_{3,8}^2] t^{16} \end{aligned} \left. \right. , & \quad \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3
\end{aligned}
\right.
\end{aligned}
\tag{1.26}$$

ANNEXE IV : POTENTIEL DE GAIN DE L'ÉCOCONDUITE : ÉTUDES SUPPLÉMENTAIRES

Dans cette section, nous présentons les résultats des études paramétriques supplémentaires sur le potentiel de gain d'énergie associé à la Modulation de l'Accélération (MA) et à la Modulation de la Décélération (MD). Cette annexe vient en complément de la discussion du chapitre III.2.

SCÉNARIOS URBAINS

Ci-dessous nous présentons les effets sur la consommation d'énergie de Moduler l'intensité des accélérations et des décélérations sur des scénarios de conduite urbains.

Modulation de l'accélération (MA)

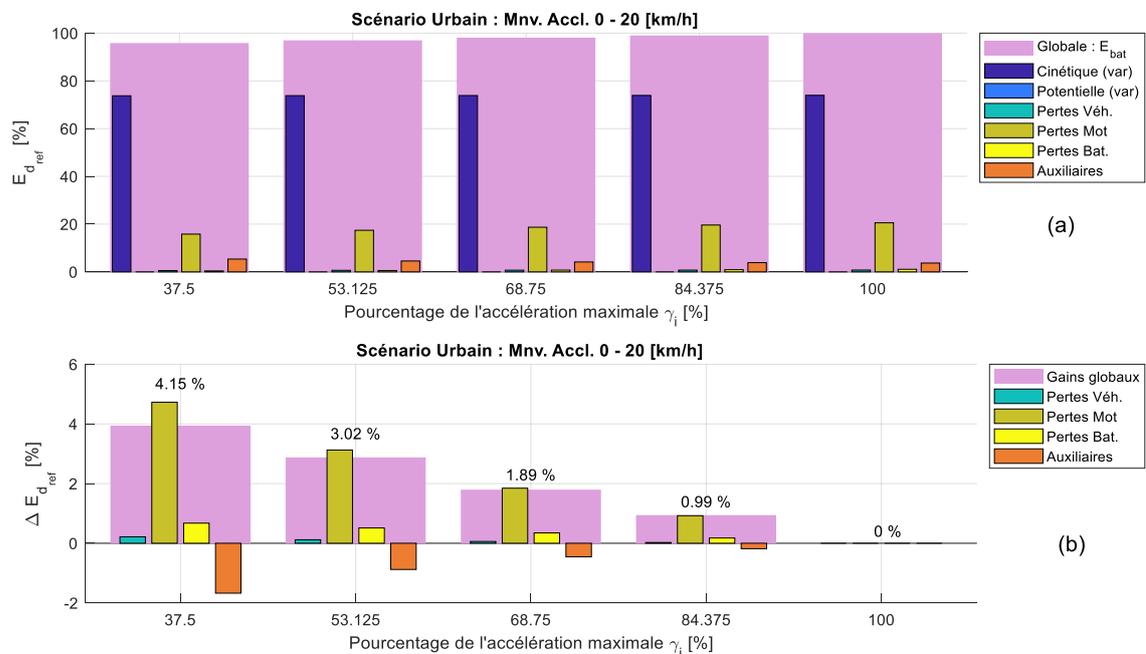


FIG. 1.5 – Effet de la MA sur la consommation: conduite urbaine - accélération de 0 - 20 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

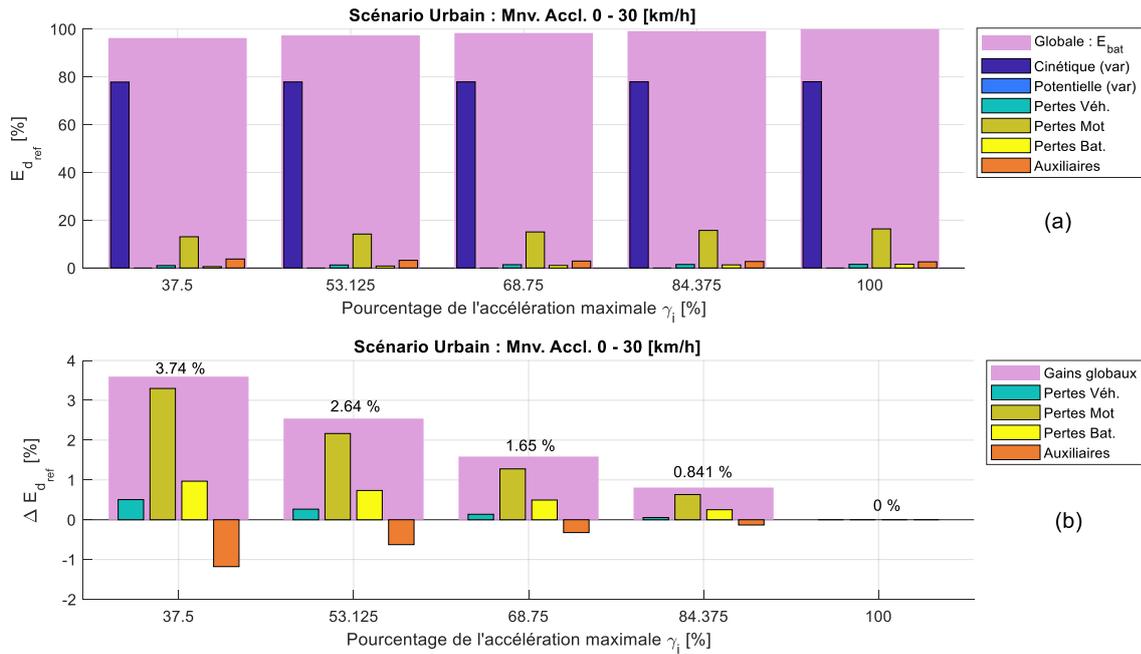


FIG. 1.6 – Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 0 - 30 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

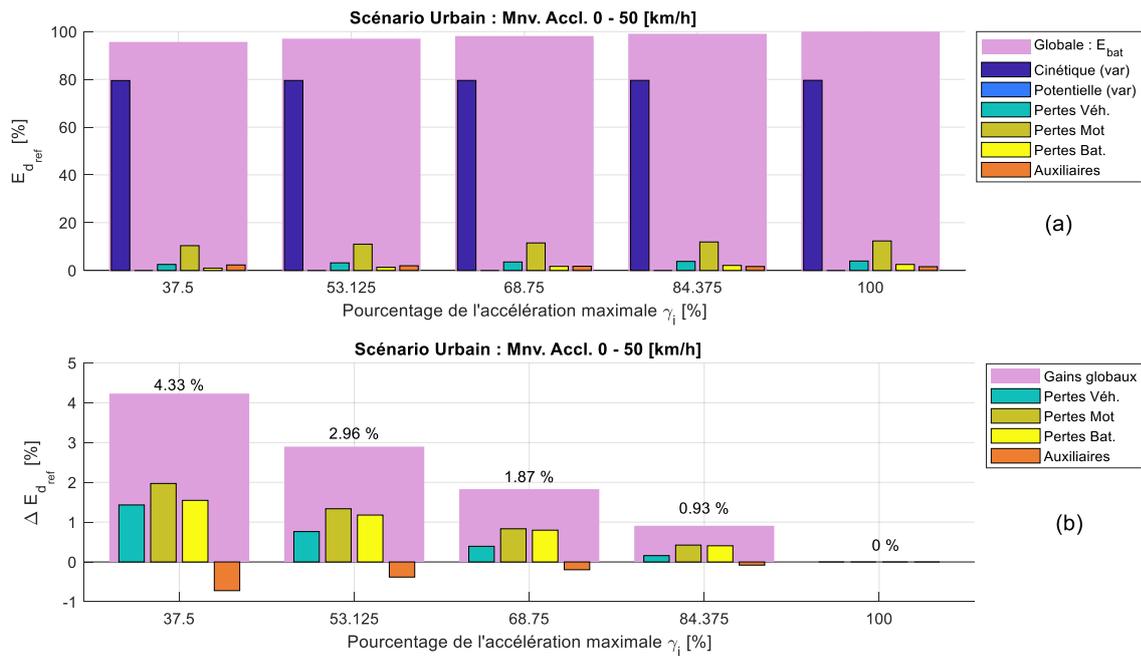


FIG. 1.7 – Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 0 - 50 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

Modulation de la décélération (MD)

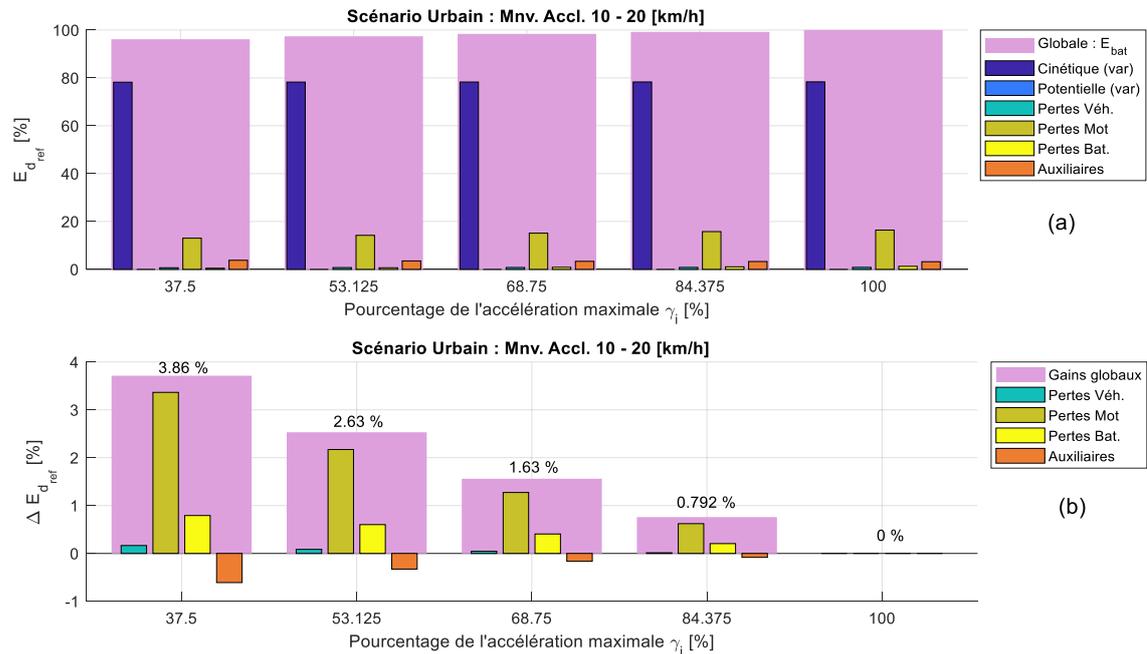


FIG. 1.8 – Effet de la MA sur la consommation: conduite urbaine - accélération de 10 - 20 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

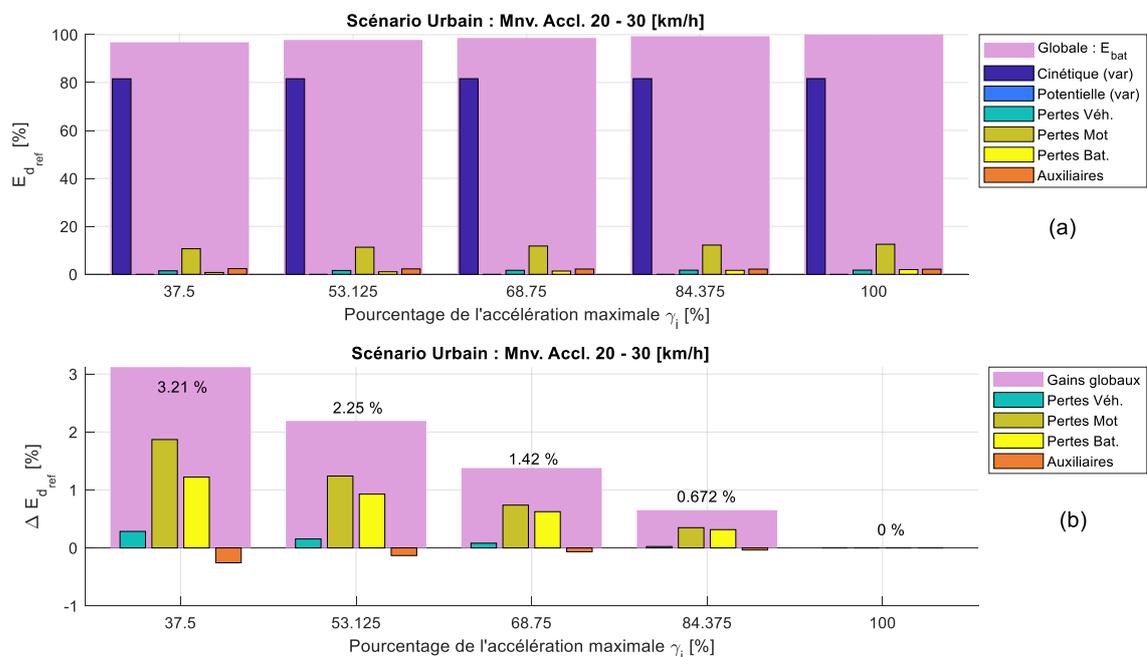


FIG. 1.9 – Effet de la MA sur la consommation: conduite urbaine - accélération de 20 - 30 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

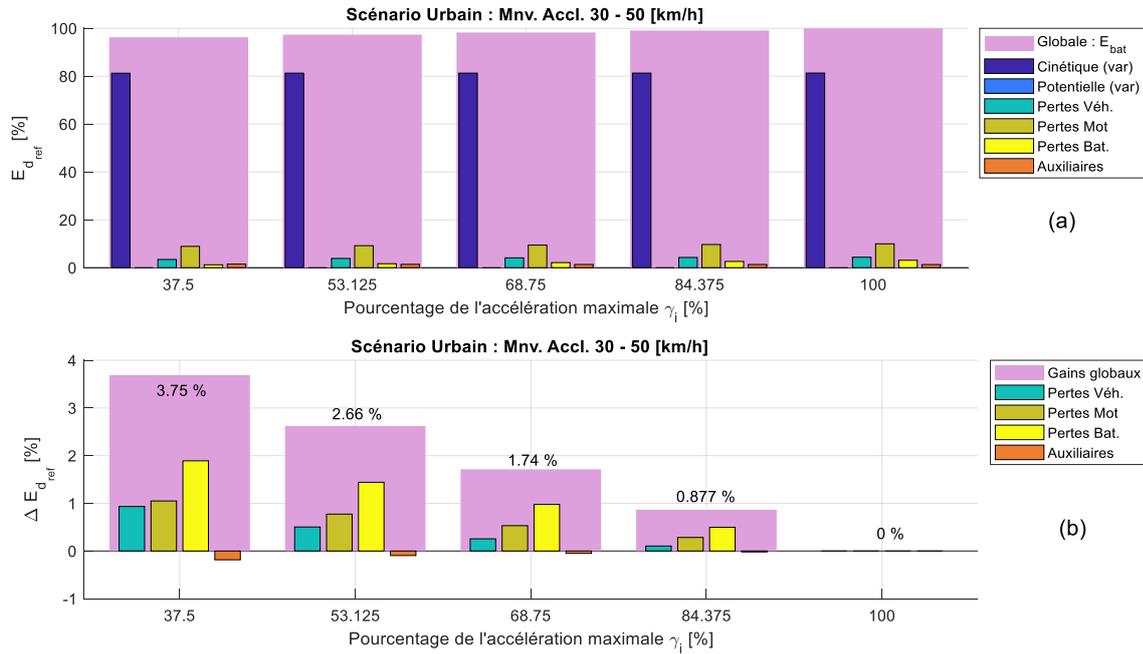


FIG. 1.10 – Effet de la MA sur la consommation : conduite urbaine - accélération de 30 - 50 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MA

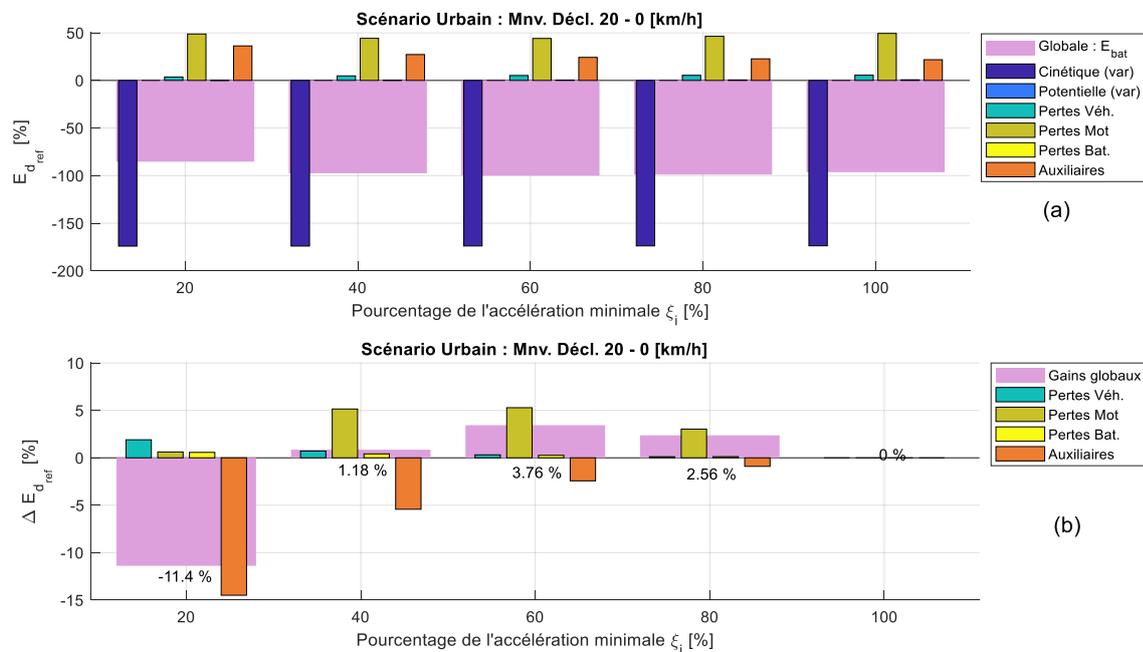


FIG. 1.11 – Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 20 - 0 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

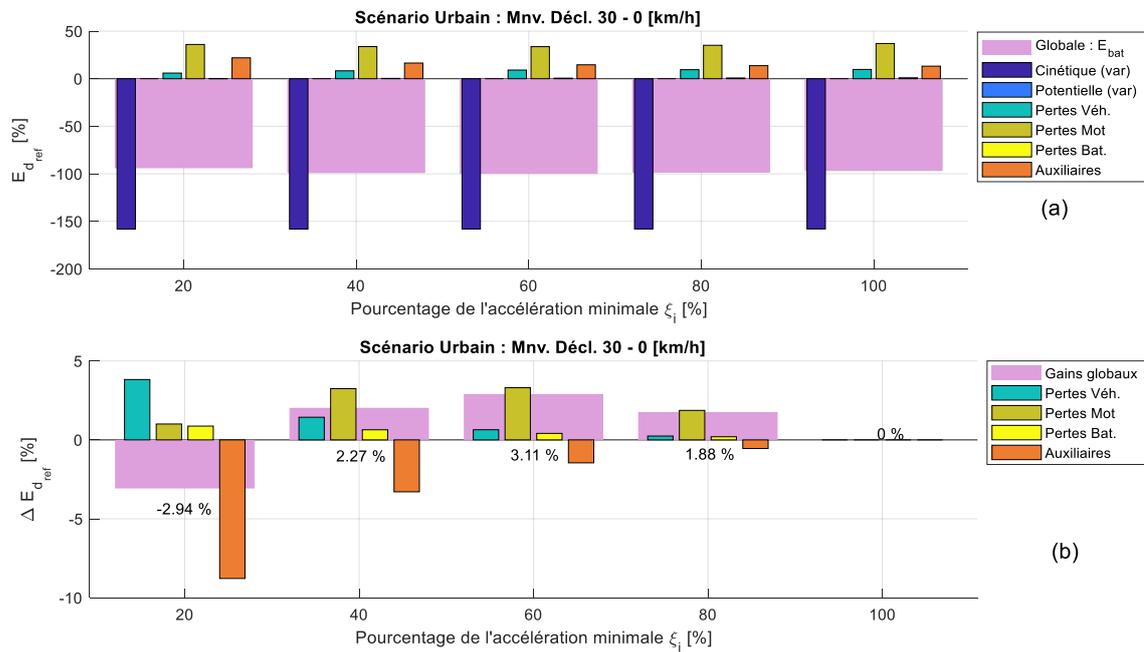


FIG. 1.12 – Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 30 - 0 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

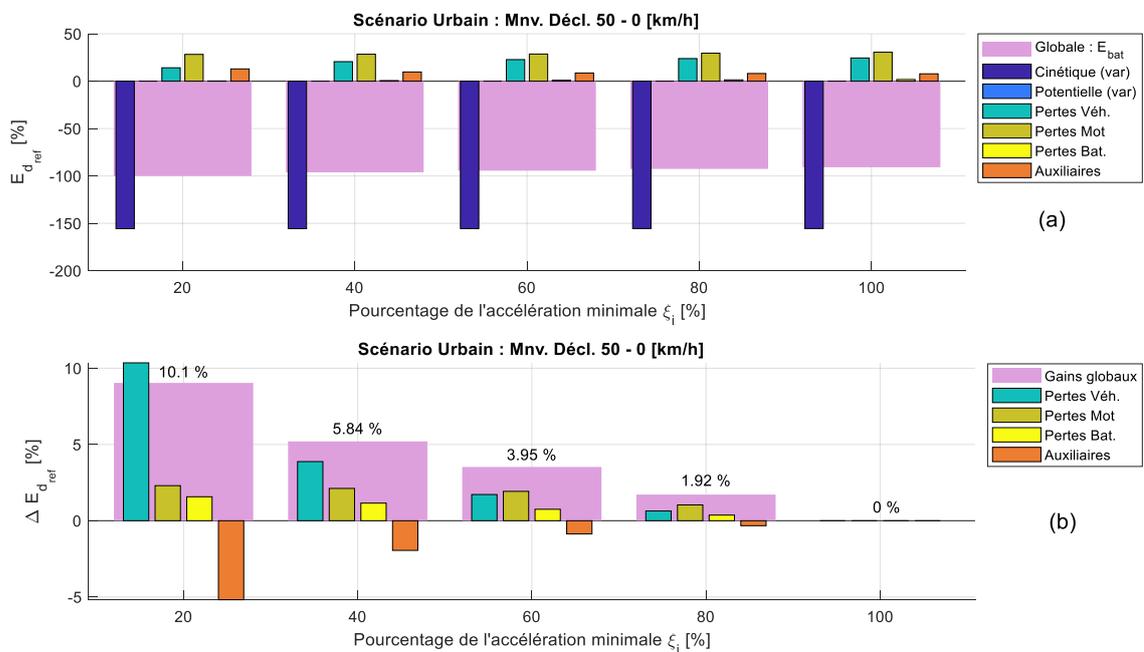


FIG. 1.13 – Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 50 - 0 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

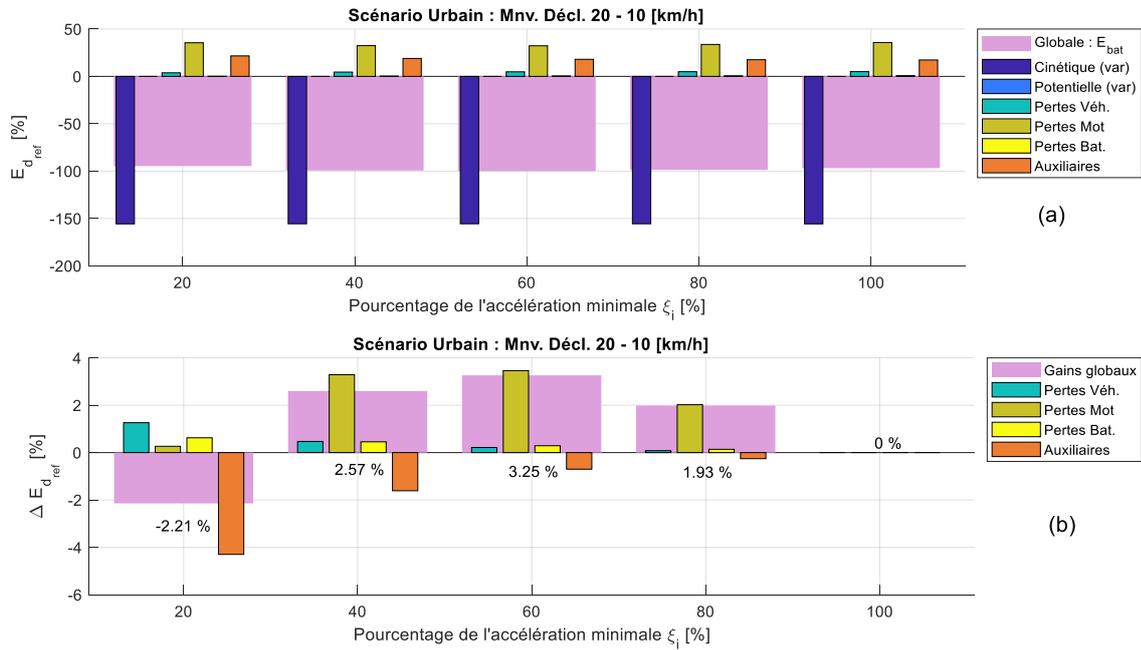


FIG. 1.14 – Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 20 - 10 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

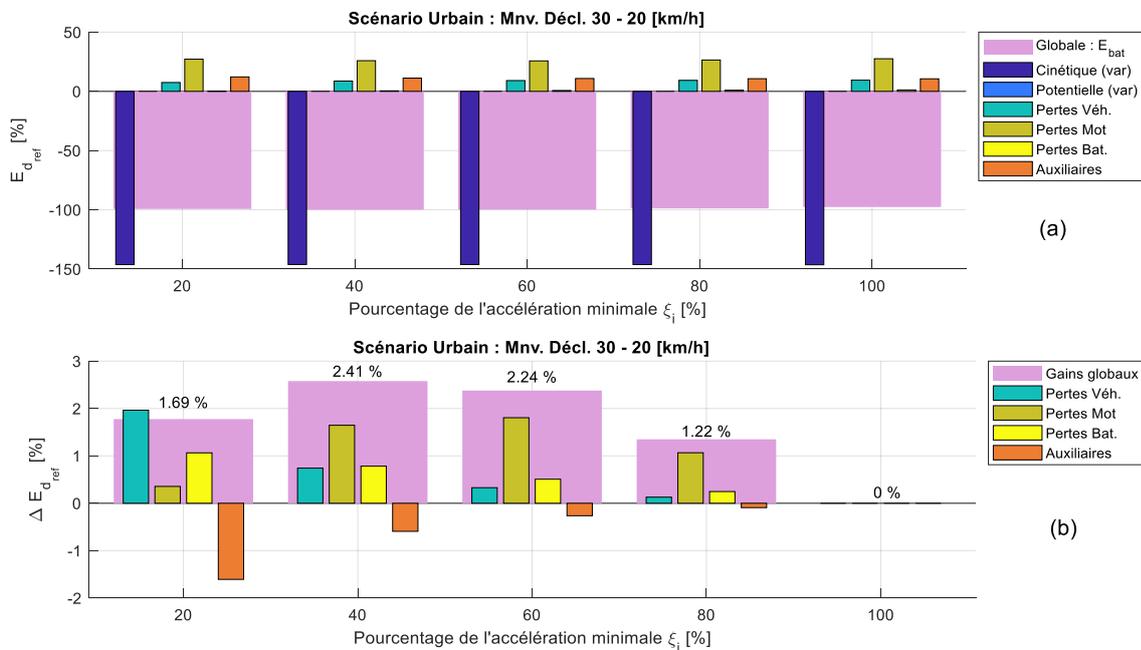


FIG. 1.15 – Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 30 - 20 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

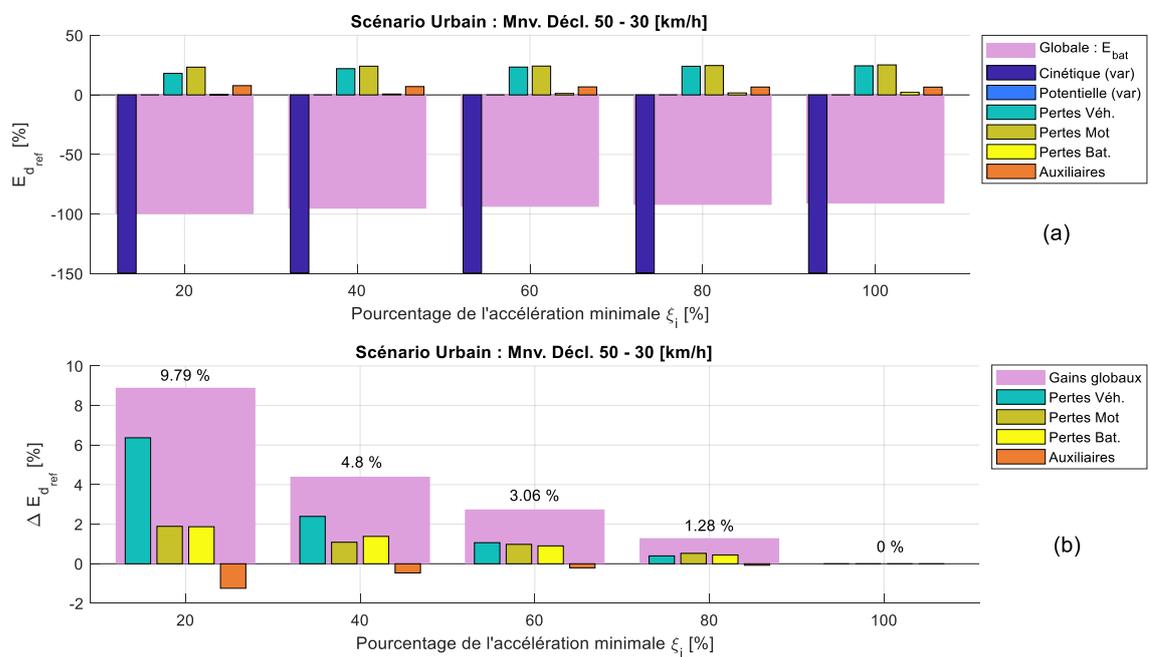


FIG. 1.16 – Effet de la MD sur la consommation : conduite urbaine - décélération de 50 - 30 [km/h]. (a) Consommation absolue d'énergie [%]; (b) Gain d'énergie dû à la MD

ANNEXE V : FORMULATION TEMPORELLE DU PROBLÈME QUASI-OPTIMAL D'ÉCOCONDUITE

Dans cette section, nous présentons une formulation du problème d'écoconduite où la plupart des paramètres des manœuvres correspondent à des variables temporelles. Cette formulation est plus intuitive et favorise potentiellement la convexité du problème. En revanche, la relation entre les paramètres de la manœuvre optimale et l'agrément de conduite sont moins explicites que dans la formulation utilisant les valeurs d'à-coups des phases transitoires. De même, l'exécution par les autres sous-systèmes de l'algorithme d'écoconduite est plus simple lorsqu'on travaille avec des valeurs d'à-coup.

Fonction de coût

Soit la fonction $A_{veh} : \mathbb{R}^r \times [0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^2$ grâce à (2.5), où $t_f : \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$. Les paramètres du profil sont $\underline{\theta} = [a_{ex}, \tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$; la vitesse et l'accélération initiales, v_0 et a_0 , respectivement, sont des données d'entrée. La durée totale de la manœuvre est $t_f = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$.

$$\dot{\underline{x}}(\underline{\theta}, t) = A_{veh}(\underline{\theta}, t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} V_{veh}^{ph1}(\underline{\theta}, t) \\ a_{veh}^{ph1}(\underline{\theta}, t) \end{bmatrix}, & 0 \leq t < \tau_1 \\ \begin{bmatrix} V_{veh}^{ph2}(\underline{\theta}, t) \\ a_{veh}^{ph2}(\underline{\theta}, t) \end{bmatrix}, & \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 \\ \begin{bmatrix} V_{veh}^{ph3}(\underline{\theta}, t) \\ a_{veh}^{ph3}(\underline{\theta}, t) \end{bmatrix}, & \tau_1 + \tau_2 \leq t \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases} \quad (1.27)$$

Où :

$$V_{veh}^{ph1} : \mathbb{R}^r \times [0, \tau_1] \rightarrow \mathbb{R} \quad , \quad V_{veh}^{ph1}(\underline{\theta}, t) = v_0 + a_0 t + \left(\frac{a_{ex} - a_0}{2 \tau_1} \right) t^2 \quad (1.28)$$

$$a_{veh}^{ph1} : \mathbb{R}^r \times [0, \tau_1] \rightarrow \mathbb{R} \quad , \quad a_{veh}^{ph1}(\underline{\theta}, t) = a_0 + \left(\frac{a_{ex} - a_0}{\tau_1} \right) t \quad (1.29)$$

$$V_{veh}^{ph2} : \mathbb{R}^r \times [\tau_1, \tau_1 + \tau_2] \rightarrow \mathbb{R} \quad , \quad V_{veh}^{ph2}(\underline{\theta}, t) = \left[v_0 + \left(\frac{a_0 - a_{ex}}{2} \right) \tau_1 \right] + a_{ex} t \quad (1.30)$$

$$a_{veh}^{ph2} : \mathbb{R}^r \times [\tau_1, \tau_1 + \tau_2] \rightarrow \mathbb{R} \quad , \quad a_{veh}^{ph2}(\underline{\theta}, t) = a_{ex} \quad (1.31)$$

$$V_{veh}^{ph3} : \mathbb{R}^r \times [\tau_1 + \tau_2, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3] \rightarrow \mathbb{R} \quad , \quad V_{veh}^{ph3}(\underline{\theta}, t) = \left[v_0 + \frac{(a_0 - a_{ex}) \tau_1}{2} - \frac{a_{ex} (\tau_1 + \tau_2)^2}{2 \tau_3} \right] \\ + \frac{a_{ex} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}{\tau_3} t - \frac{a_{ex} t^2}{2 \tau_3} \quad (1.32)$$

$$a_{veh}^{ph3} : \mathbb{R}^r \times [\tau_1 + \tau_2, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3] \rightarrow \mathbb{R} \quad , \quad a_{veh}^{ph3}(\underline{\theta}, t) = \frac{a_{ex} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}{\tau_3} - \frac{a_{ex}}{\tau_3} t \quad (1.33)$$

En intégrant (2.5) sur les modèles de consommation *physique* et *analytique*, donnés respectivement par les équations (1.55) et (1.144) de la section III.1.2, nous pouvons définir une fonctionnelle $J(u(\underline{\theta}))$ en utilisant (2.14), où \check{P}_{bat} , et donc \check{E}_{mnv} , peuvent être issues des modèles physique ou analytique de consommation. Cette fonction de coût, pour un paramétrage du système donnée, est complètement définie par la connaissance de $\underline{\theta}$.

$$J(u(\underline{\theta})) = \int_0^{t_f(\underline{\theta})} \check{P}_{bat}(\underline{\theta}, t) dt = \check{E}_{mnv}(\underline{\theta}) \quad (1.34)$$

Contrainte sur la vitesse finale

A partir de l'équation (2.15) de la section IV.2.1.2, il est possible d'exprimer la vitesse finale du véhicule, en fonctions des paramètres temporel et de l'accélération pendant la phase stabilisée, comme suit :

$$V_f^h = V_0^h + \frac{a_0}{2} \tau_1 + \frac{1}{2} a_{ex} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + \frac{1}{2} a_{ex} \tau_2 \quad (1.35)$$

Ainsi, nous pouvons définir l'objectif sur la vitesse finale comme une *contrainte d'égalité* de la forme $\hat{g}(\underline{\theta}) = 0$, comme il est montré sur (1.36), où $\Delta V^h = V_f^h - V_0^h$ est la variation de vitesse du véhicule hôte entre le début et la fin de la manœuvre.

$$\hat{g}(\underline{\theta}) = \Delta V^h - \frac{a_0}{2} \tau_1 - \frac{1}{2} a_{ex} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) - \frac{1}{2} a_{ex} \tau_2 = 0 \quad (1.36)$$

ANNEXE VI: DÉFINITION

MATHÉMATIQUE DE CERTAINES

FONCTIONS MATLAB

Ci-dessous, nous proposons des définitions mathématiques de certaines fonctions de génération de vecteurs utilisées dans la section IV.2.4 pour la définition de l'algorithme de recherche exhaustive. Nous mentionnerons le nom donné par Matlab à de telles fonctions ; en revanche, des équivalents existent dans la plupart de langages de programmation.

Fonction *linspace*

La fonction *linspace* permet la génération de vecteurs linéairement espacés. Elle peut-être définie de point de vue mathématique comme :

$$\begin{aligned}
 f_{Lin} : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{N}_{++} &\rightarrow \mathbb{R}^{\mathbb{N}_{++}} \\
 x_1, x_2, m &\mapsto \underline{\mathbf{y}} = f_{Lin}(x_1, x_2, m)
 \end{aligned} \tag{1.37}$$

$$\underline{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 + \left(\frac{x_2 - x_1}{m-1}\right) \\ \vdots \\ x_1 + (i-1) \left(\frac{x_2 - x_1}{m-1}\right) \\ \vdots \\ x_1 + (m-1) \left(\frac{x_2 - x_1}{m-1}\right) \end{bmatrix}$$

Fonction *NaN_{mat}*

La fonction *NaN_{mat}* permet de générer des matrices dont l'ensemble des éléments sont des *Nan*. Elle peut-être définie comme :

$$\begin{aligned}
 NaN_{mat} : \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} &\rightarrow \{\mathbb{R} \cup Nan\}^{\mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++}} \\
 m_a, m_b, m_c &\mapsto M_{nan} = NaN_{mat}(m_a, m_b, m_c)
 \end{aligned} \tag{1.38}$$

$$M_{nan}(i, j, k) = NaN, \quad \forall i \in \{1, \dots, m_a\}, j \in \{1, \dots, m_b\}, k \in \{1, \dots, m_c\},$$

Fonction $Zero_{mat}$

La fonction $Zero_{mat}$ permet de générer des matrices dont l'ensemble des éléments sont des 0. Elle peut-être définie comme :

$$\begin{aligned}
 Zero_{mat} : \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} &\rightarrow \{\mathbb{R} \cup Nan\}^{\mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++}} \\
 m_a, m_b, m_c &\mapsto M_0 = Zero_{mat}(m_a, m_b, m_c) \\
 M_0(i, j, k) = 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, m_a\}, j \in \{1, \dots, m_b\}, k \in \{1, \dots, m_c\},
 \end{aligned} \tag{1.39}$$

Fonction $False_{mat}$

La fonction $False_{mat}$ permet de générer des matrices booléennes dont l'ensemble des éléments sont des False. Elle peut-être définie comme :

$$\begin{aligned}
 False_{mat} : \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} &\rightarrow \{\text{True}, \text{False}\}^{\mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++} \times \mathbb{N}_{++}} \\
 m_a, m_b, m_c &\mapsto M_{false} = False_{mat}(m_a, m_b, m_c) \\
 M_{false}(i, j, k) = \text{False}, \quad \forall i \in \{1, \dots, m_a\}, j \in \{1, \dots, m_b\}, k \in \{1, \dots, m_c\},
 \end{aligned} \tag{1.40}$$

ANNEXE VII : MÉTHODE D'IDENTIFICATION DE LA LIMITE D'À-COUP ACCEPTABLE EN FONCTION DE LA DURÉE DU TRANSITOIRE

Sur la section II.3.5, nous avons proposé un modèle pour caractériser la limite acceptable d'à-coup, en fonction de la durée de la phase transitoire. Le modèle en question est le suivant :

$$J_k^{lim}(\tau_k) = f_J(\tau_k) = c_J + \frac{b_J}{\tau_k + d_J}$$

Avec $\hat{J}_k = J_k^{lim}(\tau_k)$, correspond à l'à-coup maximum acceptable dans le cas des accélérations et $\check{J}_k = J_k^{lim}(\tau_i)$ à la limite inférieure d'à-coup acceptable pour les décélérations ; l'indice $k \in \{1,3\}$, indique la phase transitoire de la manœuvre (1 : phase initiale ; 3 : phase finale). τ_k est la durée de la phase transitoire correspondante et c_J , b_J et d_J sont des constantes associées à chaque phase et à chaque type de manœuvre. Pour des manœuvres d'accélération $b_J > 0$, et $b_J < 0$ pour des décélérations.

Ci-dessous, nous proposerons une méthode permettant d'obtenir des valeurs pertinentes des paramètres du modèle (c_J , b_J et d_J), à partir des données issues de roulages réels. Pour ce faire, nous devons, dans un premier temps, calculer la « distance » entre chaque manœuvre proposée et une instance du modèle. Par simplicité, nous n'écrirons pas l'indice k sur nos équations, étant donné que les formules sont valables pour les phases initiale et finale des manœuvres.

Distance minimale d'un point par rapport au modèle

Pour pouvoir déterminer si un modèle $J^{lim}(\tau)$ est représentatif des observations empiriques, il nous faut un critère. Le plus intuitif est de nous baser sur la distance entre le modèle et chacune des observations. Cependant, la distance pourrait être définie des différentes manières. Nous proposerons la définition qui suit :

Soit $\underline{x}_i = [\tilde{\tau}_i, \tilde{J}_i]^T$ une observation de l'amplitude et la durée de l'à-coup associée à une manœuvre, que nous appellerons un « point » par commodité. Aussi, soit $\underline{y}(\tau) = [\tau, J^{lim}(\tau)]^T$ le point de la fonction J^{lim} associé à une durée τ quelconque. La distance euclidienne entre les deux points est donnée par :

$$d(\underline{y}(\tau), \underline{x}_i) = \|\underline{x}_i - \underline{y}(\tau)\|_2 \quad (1.41)$$

Ainsi, la distance du point \underline{x}_i à la fonction $J^{lim}(\tau)$, notée d_i^* est définie comme :

$$d_i^*(\underline{x}_i) = \inf_{\tau \in \mathbb{R}_{++}} \left\{ d(\underline{y}(\tau), \underline{x}_i) \right\} \quad (1.42)$$

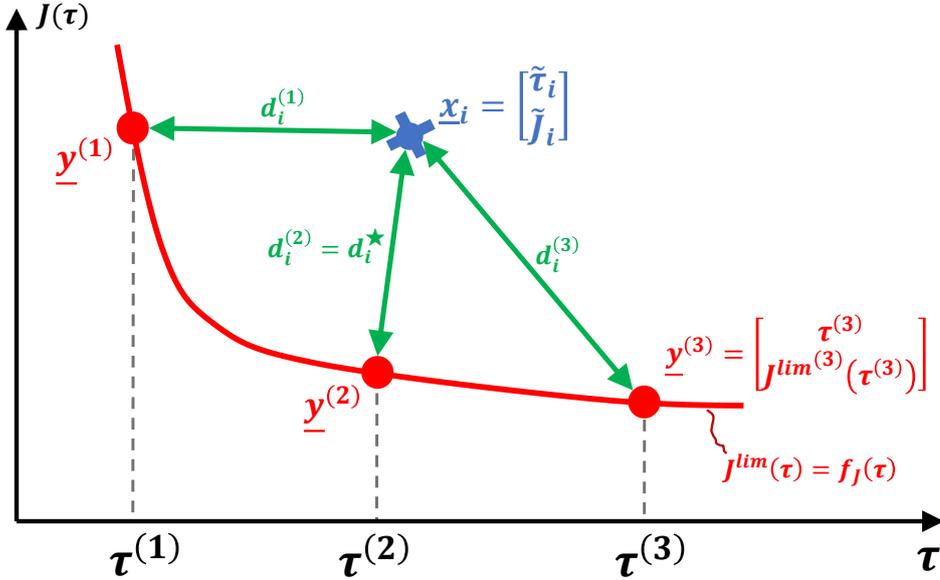


FIG. 1.17 – Définition de la distance $d_i^*(\underline{x}_i)$ entre un point $\underline{x}_i = [\tilde{\tau}_i, \tilde{J}_i]^T$, associé à une manœuvre, et la fonction d'à-coup acceptable $J^{lim}(\tau) = f_J(\tau)$.

Cette distance est représentée par la Figure 1.17, où $\underline{x}_i = [\tilde{\tau}_i, \tilde{J}_i]^T$; $d_i^{(j)}$ représentent des point quelconques

Trouver la valeur de d_i^* revient à résoudre le problème d'optimisation suivant :

$$\underset{\tau \in \mathbb{R}_{++}}{\text{minimiser}} \quad \|\underline{x}_i - \underline{y}(\tau)\|_2 = \left\| \begin{bmatrix} \tilde{\tau}_i - \tau \\ \tilde{J}_i - J^{lim}(\tau) \end{bmatrix} \right\|_2 \quad (1.43)$$

Un problème équivalent est :

$$\underset{\tau \in \mathbb{R}_{++}}{\text{minimiser}} \quad f_0(\tau) = (\tilde{\tau}_i - \tau)^2 + (\tilde{J}_i - J^{lim}(\tau))^2 \quad (1.44)$$

En appliquant la définition (3.55), nous pouvons reformuler $f_0(\tau)$ comme suit :

$$\begin{aligned} f_0(\tau) &= (\tilde{\tau}_i - \tau)^2 + \left(\tilde{J}_i - c_J - \frac{b_J}{\tau_k + d_J} \right)^2 \\ f_0(\tau) &= (\tau + d_J)^2 - 2(\tilde{\tau}_i + d_J)\tau + \left[\tilde{\tau}_i^2 + (\tilde{J}_i - c_J)^2 - d_J^2 \right] \\ &\quad - 2(\tilde{J}_i - c_J)b_J(\tau + d_J)^{-1} + b_J^2(\tau + d_J)^{-2} \end{aligned} \quad (1.45)$$

Concernant la convexité de $f_0(\tau)$, nous montrons sur le Théorème 1.2 de l'Annexe II que $f_0(\tau)$ est une fonction convexe en \mathbb{R}_{++} si la condition $\frac{(\tilde{J}_i - c_J)^4}{b_J^2} \leq 16$ est respectée.

Dans la pratique, cette condition peut être difficile à garantir. Toutefois, le théorème nous montre que f_0 garde un certain niveau de convexité. Si nous analysons la structure

de la fonction $f_0(\tau) : \mathbb{R}_{++} \rightarrow \mathbb{R}$, nous constatons que le seul terme qui apporte une non-convexité est celui en $\gamma^{-1} = \tau + d_J^{-1}$, dont le signe est négatif. Ce terme décroît rapidement en γ , ce qui fait penser que la non-convexité soit localisée au voisinage de $\gamma = 0$, donc au voisinage de $\tau = -d_J$. De ce fait, la non-convexité de f_0 ne devrait pas poser d'inconvénient de point de vue pratique, à condition que le problème soit initialisé suffisamment loin de $\tau = -d_J$ et, de préférence, à proximité de la solution du problème. Nous proposons donc le point d'initialisation présenté sur (1.46), c'est-à-dire, commencer avec la même valeur de τ que l'observation empirique ; cela semble être une bonne supposition. Sur l'équation, k correspond au numéro d'itération de l'algorithme d'optimisation.

$$\tau_{[k=0]} = \tilde{\tau}_i \tag{1.46}$$

En outre, nous n'accepterons une sortie de l'algorithme d'optimisation que si celle-ci respecte l'une des conditions suivantes : soit la diminution de la fonction de coût devient *suffisamment petite*, soit c'est la variation des variables d'optimisation qui le devient ; dans ces deux cas, il est fort probable de se trouver très à proximité de la solution du problème. De plus, afin d'éviter que l'algorithme s'éloigne du « bassin de convergence » visé par le choix du point d'initialisation, nous allons privilégier une méthode de point intérieur [22], en imposant la contrainte $\tau \geq -d_J$.

Ainsi, d_i^* peut, avec une forte probabilité, être obtenue en résolvant le problème d'optimisation (1.47), en utilisant une méthode de point intérieur.

$$\begin{aligned} & \underset{\tau \in \mathbb{R}_{++}}{\text{minimiser}} \quad \|\underline{\mathbf{x}}_i - \underline{\mathbf{y}}(\tau)\|_2 \\ & \text{tel que} \quad \tau \geq -d_J \end{aligned} \tag{1.47}$$

Identification du modèle de la limite d'à-coup en fonction du temps, à partir des mesures réelles

Nous voulons trouver une fonction représentative des données issues des roulages réels. En revanche, nous ne voulons pas une fonction moyennant les données, mais une englobant la *majorité* des données, pour que celle-ci représente ce que le conducteur pourrait trouver acceptable. Le modèle retenu est, bien sûr, celui montré sur (3.55), et les paramètres à identifier sont c_J , b_J et d_J .

Nous commencerons par définir une *distance signée* l_i entre chaque point $\underline{\mathbf{x}}_i = [\tilde{\tau}_i, \tilde{J}_i]^T$ et la fonction $f_J(\underline{\theta}, \tilde{\tau}_i)$. $f_J(\underline{\theta}, \tilde{\tau}_i)$ est donné par (3.55), où les paramètres du modèle sont désormais considérés comme des entrées et regroupés sur le vecteur $\underline{\theta} = [b_J, c_J, d_J]^T$. Le mot « signée » fait référence au fait que l_i doit changer de signe selon que le point se trouve au-dessus ou en-dessous de la courbe $J_k^{lim}(\tau_k)$. Cette distance est définie sur (1.48) et illustrée par la Figure 1.18.

$$l_i(\underline{\mathbf{x}}_i, \underline{\theta}) = \text{sign}[\tilde{J}_i - f_J(\underline{\theta}, \tilde{\tau}_i)] \cdot d_i^*(\underline{\mathbf{x}}_i, \underline{\theta}) \tag{1.48}$$

$d_i^*(\underline{\mathbf{x}}_i, \underline{\theta})$ est définie par (1.49) et, selon il a été discuté, devrait *a priori* pouvoir être calculée de manière globale, en temps polynômial, en utilisant un algorithme d'optimisation basé sur une méthode de barrière.

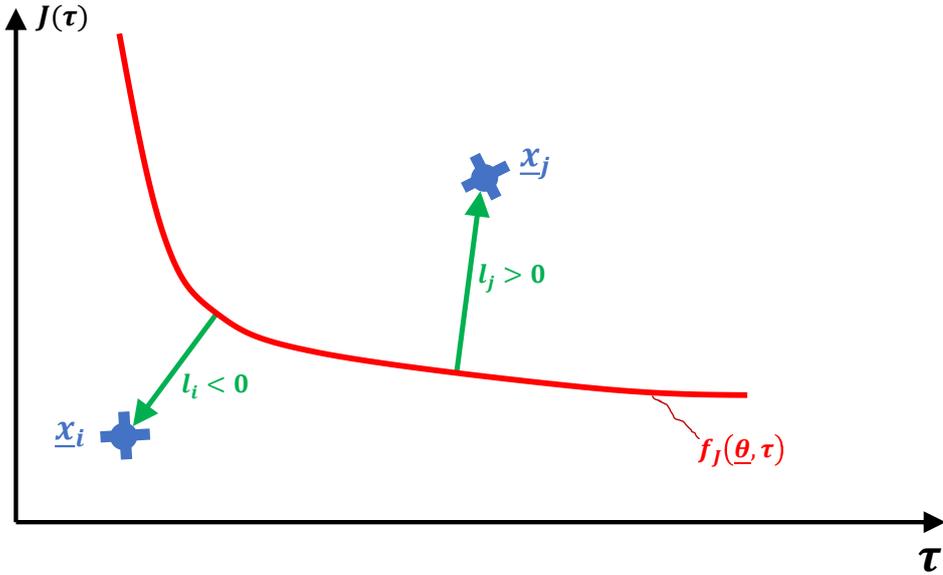


FIG. 1.18 – Distance signée, $l_i = f(\underline{x}_i, \underline{\theta})$, entre un point $\underline{x}_i = [\tilde{\tau}_i, \tilde{J}_i]^T$, associé à une manœuvre, et la fonction d'à-coup acceptable $J^{lim} = f_J(\underline{\theta}, \tau)$.

$$d_i^*(\underline{x}_i, \underline{\theta}) = \inf_{\tau \in \mathbb{R}_{++}^{-d_J}} \left\{ \left\| \underline{x}_i - \begin{bmatrix} \tau \\ J^{lim}(\underline{\theta}, \tau) \end{bmatrix} \right\|_2 \right\} \quad (1.49)$$

Ensuite, nous définissons une fonction de pénalité non-symétrique $\phi(l)$, nous permettant de pénaliser différemment les points qui dépassent la courbe de ceux qui ne le font pas. Nous proposons deux choix possibles, $\phi_1(l)$ et $\phi_2(l)$, définis par les équations (1.50) et (1.51), respectivement, où c_d est un paramètre permettant de régler le déséquilibre entre les valeurs négatives et positives de l . La Figure 1.19 illustre les deux fonctions de pénalité pour $c_d = 0.5$ et $c_d = 0.8$.

$$\phi_1(l) = \begin{cases} |l| & , l \geq 0 \\ c_d |l| & , l < 0 \end{cases} \quad (1.50)$$

$$\phi_2(l) = \begin{cases} l^2 & , l \geq 0 \\ c_d l^2 & , l < 0 \end{cases} \quad (1.51)$$

Le choix entre $\phi_1(l)$ et $\phi_2(l)$ peut influencer la sensibilité de l'optimisation à des points très éloignés des tendances, qui correspondraient à des action atypiques du conducteur. En revanche, il est difficile de déterminer un critère pertinent pour le choix entre les deux fonctions de pénalité. Pour nos études, nous avons décidé de travailler avec $\phi_1(l)$.

En nous basant sur $\phi(l)$, nous pouvons définir une fonction mesurant l'écart global entre le modèle $f_J(\tau)$ et les observations issues des roulages réels. Celle-ci est présentée sur (1.52), où $X = [\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_p]^T$, et p le nombre d'observations.

$$\Phi(\underline{\theta}, X) = \sum_{i=1}^p \phi(l_i(\underline{\theta}, \underline{x}_i)) \quad (1.52)$$

L'équation (1.52) peut être exprimée comme suit :

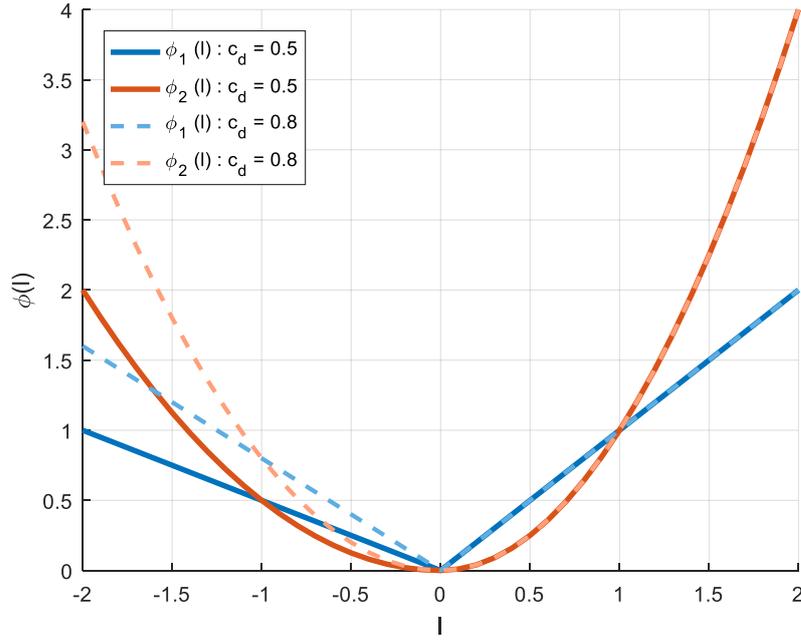


FIG. 1.19 – Fonctions asymétriques de pondération, $\phi_1(l)$ et $\phi_2(l)$; deux valeurs du paramètre de calibration, $c_d = 0.5$ et $c_d = 0.8$

$$\Phi(\underline{\theta}, X) = \sum_{i=1}^p \phi \left(\left[\text{sign}(\tilde{J}_i - f_J(\underline{\theta}, \tilde{\tau}_i)) \right] \cdot \left[\inf_{\tau > -d_J} \left\| \mathbf{x}_i - \begin{bmatrix} \tau \\ J^{lim}(\underline{\theta}, \tau) \end{bmatrix} \right\|_2 \right] \right) \quad (1.53)$$

Ainsi, pour trouver la courbe $f_J(\tau)$ qui représente « au mieux » les observations empiriques, il suffit de résoudre le problème d'optimisation (1.54), pour une valeur de c_d donnée.

$$\underset{\underline{\theta}}{\text{minimiser}} \quad \Phi(\underline{\theta}, X) \quad (1.54)$$

L'analyse de la convexité de (1.54) est loin d'être triviale. Cependant, on peut espérer qu'avec une bonne initialisation de l'algorithme, c'est-à-dire, en choisissant $\underline{\theta}_{[k=0]}$ intelligemment, on tombera à proximité d'un « bassin de convergence » de $\Phi(\underline{\theta}, X)$ et qu'on obtiendra donc, au moins, un minimum local. Dans ce contexte, l'enjeu n'est pas de minimiser la valeur de $\Phi(\underline{\theta}, X)$, mais de retrouver une relation *pertinente* entre la durée des phases transitoires et la valeur d'à-coup acceptable par le conducteur.

Calibration de l'algorithme pour trouver le q -ème quantile des observations

Nous souhaitons trouver une fonction $f_J(\tau)$, représentant adéquatement la relation entre la durée des phases transitoires et la tolérance du conducteur. Lorsque quelqu'un est au volant d'une voiture, il ne réalise pas forcément, de manière systématique, des manœuvres lui offrant le plus grand agrément de conduite ; dans certains cas, selon son niveau d'anticipation, ou le niveau de criticité de la manœuvre, il peut être contraint des faire des compromis sur son agrément. Ainsi, un critère pertinent pour décider si une fonction est acceptable ou pas est de définir une proportion de points qui doivent

rester *sous la courbe* et qui correspondraient, a priori, aux manœuvres moins respectueuses de l'agrément de conduite. Cette proportion sera notée q_J et nous considérerons qu'une fonction $f_J^*(\tau)$ est suffisamment représentative des données si elle délimite le q_J -ème quantile dans les observations expérimentales.

Le quantile délimité par une fonction $f_J^j(\tau)$, noté q_J^j , est donné par (1.55), où p est le nombre total d'observations et n_{inf} le nombre de points sous la courbe.

$$q_J^j = \frac{n_{inf}}{p}, \quad n_{inf} = \mathbf{card} \left(\left\{ \mathbf{x}_i : \tilde{J}_i \leq f_J^j(\underline{\theta}, \tilde{\tau}_i) \right\} \right) \quad (1.55)$$

Pour déterminer $f_J^*(\tau)$, nous avons utilisé le paramètre c_d comme levier pour faire varier le déséquilibre entre le *poids* des points *sous la courbe* et *sur la courbe*. Pour des petites valeurs de c_d les distances des points *sous la courbe* à la fonction auront moins d'importance sur la valeur totale de la fonction de coût, et vice-versa.

Nous avons utilisé la méthode de bijection pour trouver une fonction respectant le critère du q_J -ème quantile, comme le montre l'Algorithme 6, où f_Φ est une fonction qui récupère en entrée les observations des manœuvres, X , et une valeur du paramètre c_d ; elle génère en sortie les paramètres du modèle, $\underline{\theta}$, et le quantile q_J correspondants.

Pour l'implémentation de l'algorithme, il a été nécessaire d'appliquer certaines considérations pratiques. D'une part, la résolution du problème est assez coûteuse en temps de calcul; cela est dû à la présence de trois problèmes d'optimisation imbriqués: chaque itération de l'Algorithme 5 implique de résoudre le problème d'optimisation (1.54), qui demande à son tour de résoudre plusieurs fois le problème (1.47). La résolution de l'ensemble peut donc demander plusieurs heures. De plus, pour initialiser l'algorithme, il est nécessaire de déterminer des valeurs de \check{c}_d et \hat{c}_d permettant d'obtenir des quantiles q_J supérieur et inférieur à la cible q_J^{cib} , respectivement. Cette tâche doit se faire à la main et elle peut prendre un certain temps; ainsi pour une implémentation pratique de l'algorithme, on doit chercher un bon compromis entre le niveau de sécurité d'avoir des valeurs acceptable au premier essai (en choisissant un \check{c}_d petit et un \hat{c}_d grand), et le temps de calcul de l'algorithme. Nous avons pris le parti de choisir une valeur petite de \check{c}_d , et une grande valeur de \hat{c}_d , notamment $\check{c}_d = 0.05$ et $\hat{c}_d = 16$ afin de pouvoir résoudre, de manière automatique, plusieurs problèmes d'affilé; en revanche, cela a été pénalisant sur le temps de calcul.

Une difficulté supplémentaire réside dans le fait que le problème (1.54) n'est pas convexe⁴. Ainsi, lors de la conception de la fonction $\left[q_J^{nouv}, \underline{\theta}^{nouv} \right] = f_\Phi(c_d^{nouv}, X)$, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes de sécurité pour éviter de tomber sur des minima locaux. Cette tâche n'est pas triviale dans la mesure où la définition de coût global du problème varie pour chaque nouvelle valeur de c_d , et donc à chaque itération du problème. Le mécanisme que nous avons employé consiste à comparer, à chaque itération, $\Phi(\underline{\theta}, X)$ à un certain seuil $\hat{\Phi}$; si le seuil est dépassé, alors on relance le problème d'optimisation avec une nouvelle valeur d'initialisation de $\underline{\theta}$, choisie aléatoirement. En revanche, ce seuil sera uniquement pertinent pour une certaine plage de valeurs de c_d . Nous avons réussi à palier à cela en appliquant un peu plus de souplesse quand le quantile de l'itéra-

Algorithme 6 : Détermination de la fonction $f_J^*(\tau)$ séparant le q_J -ème quantile des observations

Entrée : limites mini et maxi de c_d : \check{c}_d et \hat{c}_d ;
 observations des manœuvres : $X = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_p]^T$
 cible de quantile : q_J^{cib}
 erreur tolérable : ϵ_{q_J}
 nombre maximum d'itérations : \hat{N}_{iter}

Sortie : Paramétrage « optimum » de la fonction : $\underline{\theta}^* = [b_J^*, c_J^*, d_J^*]^T$
 quantile correspondant : q_J^*
 valeur de c_d associée : c_d^*

1 **Début**
 2 Initialisation des bornes d'exploration de l'algorithme : $c_d^1 = \check{c}_d, c_d^2 = \hat{c}_d$
 3 Évaluation de la borne inférieure : $[q_J^1, \underline{\theta}^1] = f_\Phi(c_d^1, X)$
 4 Évaluation de la borne supérieure : $[q_J^2, \underline{\theta}^2] = f_\Phi(c_d^2, X)$
 5 Initialisation du compteur d'itérations : $k_{iter} = 0$
 6 Initialisation de l'erreur : $E_{q_J} = \min \{ |q_J^{cib} - q_J^1|, |q_J^{cib} - q_J^2| \}$
 7 **Tant que** $(E_{q_J} \geq \epsilon_{q_J})$ **et** $(k_{iter} < \hat{N}_{iter})$ **faire**
 8 Mise à jour du paramètre c_d : $c_d^{nouv} = (c_d^1 + c_d^2) / 2$
 9 Résolution du problème d'optimisation : $[q_J^{nouv}, \underline{\theta}^{nouv}] = f_\Phi(c_d^{nouv}, X)$
 10 **Si** $q_J^{nouv} \geq q_J^{cib}$ **alors**
 11 $c_d^1 = c_d^{nouv}$
 12 $q_J^1 = q_J^{nouv}$
 13 $\underline{\theta}^1 = \underline{\theta}^{nouv}$
 14 **Sinon**
 15 $c_d^2 = c_d^{nouv}$
 16 $q_J^2 = q_J^{nouv}$
 17 $\underline{\theta}^2 = \underline{\theta}^{nouv}$
 18 **fin**
 19 Calcul de l'erreur pour l'itération : $E_{q_J} = \min \{ |q_J^{cib} - q_J^1|, |q_J^{cib} - q_J^2| \}$
 20 Comptage de l'itération : $k_{iter} = k_{iter} + 1$
 21 **fin**
 22 **Fin**

tion sortait d'une certaine plage de valeurs (à l'occasion quand $q_J \in [0.1, 0.9]$, nous avons appliqué un seuil $\hat{\Phi} = 30$; dans le cas contraire, nous n'avons pas appliqué de seuil).

4. Nous avons pu le vérifier empiriquement, en constatant que l'algorithme d'optimisation retournait des minima locaux.

ANNEXE VIII : CONDITION DE PASSAGE À LA *Phase 3* AVEC PRISE EN COMPTE DE L'EFFET DE L'ÉCHANTILLONNAGE

Nous présentons ici un mécanisme permettant de compenser l'effet de l'échantillonnage de la consigne de couple au moment de décider de l'amorçage de la *Phase 3* d'une manœuvre trapézoïdale d'accélération. Par la suite, la valeur du pas de temps sera notée Δt .

La Figure 1.20 représente la phase finale du trapèze d'accélération, en considérant l'effet d'échantillonnage de la consigne générée. Plutôt que de varier continuellement, la consigne d'accélération subit des « sauts » dont la valeur est de $-J_3^* \Delta t$, ce qui permet de respecter l'accélération théorique au moment précis où la transition a lieu, indiqués par des flèches jaunes sur la figure.

Lors du premier pas de temps, à l'itération $j = 0$, l'accélération vaudra $a_{veh}(t_k^+) = a_{ex}^\diamond - J_3^* \Delta t$, et maintiendra cette valeur jusqu'à $t = (t_k + \Delta t)^-$. Ainsi, la vitesse au long de cette intervalle sera donnée par :

$$V_{veh}(t) = V_0^h + \int_{t_k}^t [a_{ex}^\diamond - J_3^* \Delta t] d\tau = V_0^h + a_{ex}^\diamond (t - t_k) - J_3^* \Delta t (t - t_k) \quad , \quad t \in (t_k, t_k + \Delta t] \quad (1.56)$$

Ainsi, à la fin de cette itération, à $t = t_k + \Delta t$, la vitesse du véhicule, notée V_1^h sera donnée par :

$$V_1^h = V_{veh}(t_k + \Delta t) = V_0^h + [a_{ex}^\diamond \Delta t - J_3^* \Delta t^2] \quad (1.57)$$

* * *

Afin de simplifier la compréhension du principe de calcul, nous présenterons encore la démarche pour analyser l'itération suivante, quand $j = 1$. Cela nous permettra par la suite de présenter les résultats pour une valeur arbitraire de j .

L'accélération dans l'intervalle entre les itérations $j = 1$ et $j = 2$ vaut $a_{veh}(t) = a_{ex}^\diamond - 2J_3^* \Delta t$, ce qui sera valable de $t = (t_k + \Delta t)^+$ à $t = (t_k + 2\Delta t)^-$. Dans cet intervalle la vitesse du véhicule sera donc donnée par :

$$\begin{aligned} V_{veh}(t) &= V_1^h + \int_{t_k + \Delta t}^t [a_{ex}^\diamond - 2J_3^* \Delta t] d\tau \quad , \quad t \in (t_k + \Delta t, t_k + 2\Delta t] \\ &= V_0^h + a_{ex}^\diamond \Delta t - J_3^* \Delta t^2 + [a_{ex}^\diamond - 2J_3^* \Delta t] [t - (t_k + \Delta t)] \quad , \quad t \in (t_k + \Delta t, t_k + 2\Delta t] \end{aligned} \quad (1.58)$$

Ainsi, au début de l'itération $j = 2$, la vitesse vaudra :

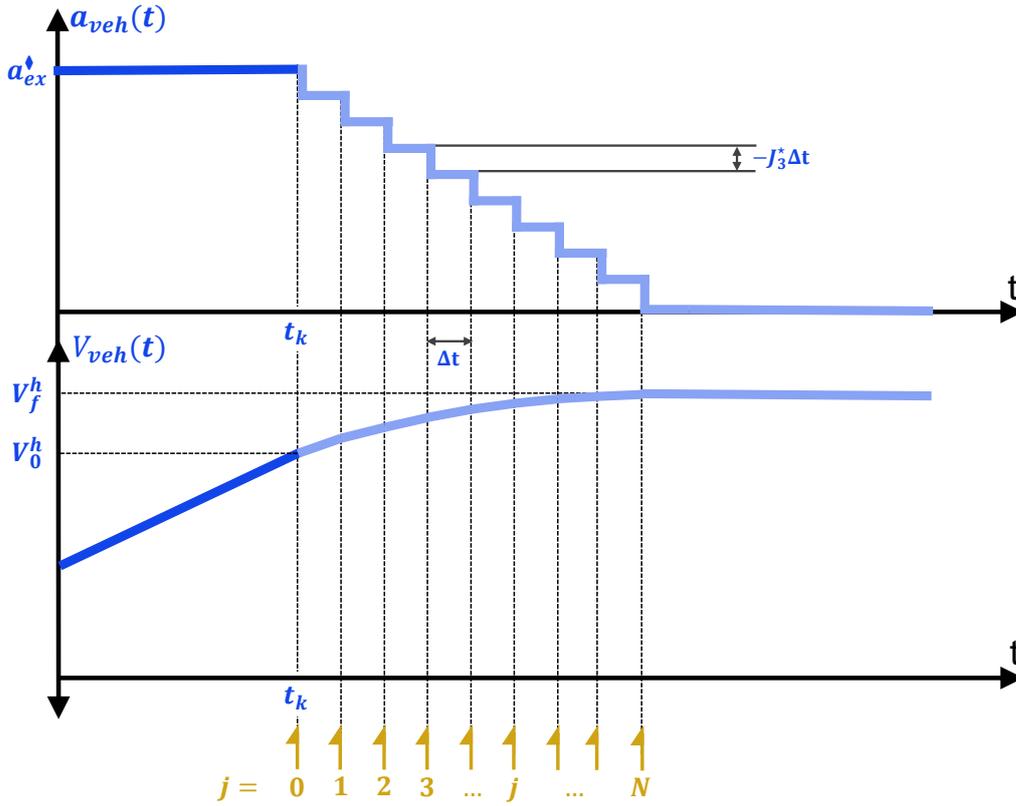


FIG. 1.20 – Notation fin phase 2 - approche avancée : évolution par sauts de l'accélération, avec prise en compte de l'effet de l'échantillonnage.

$$V_2^h = V_{veh}(t_k + 2\Delta t) = V_1^h + [a_{ex}^\diamond \Delta t - 2J_3^* \Delta t^2] \quad (1.59)$$

En appliquant l'expression de V_1^h , donnée par (1.57), nous obtenons :

$$V_2^h = V_{veh}(t_k + 2\Delta t) = V_0^h + [a_{ex}^\diamond \Delta t - J_3^* \Delta t^2] = V_0^h + 2a_{ex}^\diamond \Delta t - 3J_3^* \Delta t^2 + [a_{ex}^\diamond \Delta t - 2J_3^* \Delta t^2] \quad (1.60)$$

* * *

Nous pouvons appliquer le même principe au cas général, pour calculer le vitesse du hôte à l'itération j , notée V_j^h . Ainsi, nous obtenons l'expression par récurrence (1.61), en partant de la valeur de vitesse à l'itération précédente, V_{j-1}^h .

$$V_j^h = V_{veh}(t_k + j\Delta t) = V_{j-1}^h + [a_{ex}^\diamond \Delta t - jJ_3^* \Delta t^2] \quad (1.61)$$

En développant la récurrence, nous avons :

$$V_j^h = V_{veh}(t_k + j\Delta t) = V_0^h + [a_{ex}^\diamond \Delta t - J_3^* \Delta t^2] = V_0^h + ja_{ex}^\diamond \Delta t - \left(\sum_{i=1}^j i\right) J_3^* \Delta t^2 + [a_{ex}^\diamond \Delta t - 2J_3^* \Delta t^2] \quad (1.62)$$

⋮

$$+ [a_{ex}^\diamond \Delta t - jJ_3^* \Delta t^2]$$

Ce qui équivaut à :

$$V_j^h = V_0^h + j a_{ex}^\diamond \Delta t - \frac{j(j+1)}{2} J_3^* \Delta t^2 \quad (1.63)$$

Encore une expression équivalente, ayant un intérêt de point de vue du coût de calcul est donnée par (1.64). En effet, dans cette formulation, les seuls éléments variables sont des puissances du nombre entier j , pouvant être calculées à moindre coût⁵.

$$V_j^h = V_0^h + j \Delta t \left(a_{ex}^\diamond - \frac{J_3^* \Delta t}{2} \right) - j^2 \frac{J_3^* \Delta t^2}{2} \quad (1.64)$$

* * *

Finalement, nous allons considérer la dernière itération de la *Phase 3*. L'itération N permettant d'annuler la valeur de l'accélération est le plus petit nombre naturel tel que $a_{ex}^\diamond - N J_3^* \Delta t \leq 0$. En partant de cette condition, et en sachant que $N \in \mathbb{N}$ nous trouvons l'équation (1.65), où $\lceil - \rceil$ correspond à l'opérateur *Part entière supérieure*.

$$N = \left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \quad (1.65)$$

Ainsi, si on déclençait le transitoire final de la manœuvre à $t = t_k$, la vitesse finale du véhicule hôte vaudrait :

$$\begin{aligned} V^h(t_k + \tau_3) &= V_0^h + N \Delta t \left(a_{ex}^\diamond - \frac{J_3^* \Delta t}{2} \right) - N^2 \frac{J_3^* \Delta t^2}{2} \\ &= V_0^h + \left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \Delta t \left(a_{ex}^\diamond - \frac{J_3^* \Delta t}{2} \right) - \left(\left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \right)^2 \frac{J_3^* \Delta t^2}{2} \end{aligned} \quad (1.66)$$

Dans le cas général, il faudrait donc démarrer la phase finale du trapèze quand :

$$V_0^h[k] \approx V_f^h - \left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \Delta t \left(a_{ex}^\diamond - \frac{J_3^* \Delta t}{2} \right) + \left(\left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \right)^2 \frac{J_3^* \Delta t^2}{2} \quad (1.67)$$

S'il s'agissait d'un scénario d'accostage derrière un véhicule à vitesse constante, alors la condition peut être définie en fonction de la mesure de vitesse relative :

$$\Delta V_0[k] \approx \left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \Delta t \left(a_{ex}^\diamond - \frac{J_3^* \Delta t}{2} \right) - \left(\left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \right)^2 \frac{J_3^* \Delta t^2}{2} \quad (1.68)$$

Et la nouvelle *condition de transition* vers la *Phase 3* présentée sur la Figure 3.3, b_{ph2} , peut être définie par (1.69), où ε_3 représente une tolérance sur la vitesse finale.

$$b_{ph2} = \left[\left| \Delta V_0[k] - \left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \Delta t \left(a_{ex}^\diamond - \frac{J_3^* \Delta t}{2} \right) + \left(\left\lceil \frac{a_{ex}^\diamond}{J_3^* \Delta t} \right\rceil \right)^2 \frac{J_3^* \Delta t^2}{2} \right| \leq \varepsilon_3 \right] \quad (1.69)$$

* * *

Il est également possible de déterminer une condition pour contrôler le respect d'une inter-distance acceptable en fin de manœuvre. Pour ce faire, nous prendrons la même approche que pour la condition sur la vitesse, en présentant d'abord le calcul pour les deux premières itérations, pour ensuite présenter le cas général.

5. En utilisant, par exemple, un *tableau de hachage*.

La vitesse entre les itérations $j = 0$ et $j = 1$ est donnée par (1.56). Ainsi, la position dans l'intervalle $t \in (t_k, t_k + \Delta t]$ peut être calculée en utilisant (1.70), où nous appliquerons un changement de variable, en utilisant $t' = t - t_k$.

$$X_{veh}(t) = X_0^h + \int_0^{t'} [V_0^h + (a_{ex}^\diamond - J_3^* \Delta t) \tau] d\tau = X_0^h + V_0^h t' + \frac{a_{ex}^\diamond - J_3^* \Delta t}{2} t'^2, \quad t' \in (0, \Delta t] \quad (1.70)$$

Et donc la position du véhicule hôte, à l'itération $j = 1$, ayant lieu à $t = t_k + \Delta t$, c'est-à-dire, $t' = \Delta t$, notée X_1^h , vaudra :

$$X_1^h = X_{veh}(t_k + \Delta t) = X_0^h + V_0^h \Delta t + \frac{a_{ex}^\diamond}{2} \Delta t^2 - \frac{J_3^*}{2} \Delta t^3 \quad (1.71)$$

* * *

Entre les itérations $j = 1$ et $j = 2$, et donc dans l'intervalle $t \in (t_k + \Delta t, t_k + 2\Delta t]$, la vitesse du véhicule hôte est définie sur (1.58). Nous pouvons déterminer la position instantanée du véhicule, en intégrant ce résultat, comme montré ci-dessous, où $t' = t - (t_k + \Delta t)$.

$$\begin{aligned} X_{veh}(t) &= X_1^h + \int_0^{t'} [V_1^h + (a_{ex}^\diamond - 2J_3^* \Delta t) \tau] d\tau, \quad t \in (t_k + \Delta t, t_k + 2\Delta t] \\ &= X_1^h + V_1^h [t - (t_k + \Delta t)] + \frac{a_{ex}^\diamond - 2J_3^* \Delta t}{2} [t - (t_k + \Delta t)]^2, \quad t \in (t_k + \Delta t, t_k + 2\Delta t] \end{aligned} \quad (1.72)$$

À $t = t_k + 2\Delta t$, c'est-à-dire, à l'itération $j = 2$, la position du véhicule hôte, X_2^h , vaudra donc :

$$X_2^h = X_{veh}(t_k + 2\Delta t) = X_1^h + V_0^h \Delta t + \frac{3}{2} a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - 2J_3^* \Delta t^3 \quad (1.73)$$

En remplaçant X_2^h , (1.71), dans l'expression, nous aurons :

$$\begin{aligned} X_2^h &= X_0^h + \left[V_0^h \Delta t + \frac{1}{2} a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{1}{2} J_3^* \Delta t^3 \right] = X_0^h + 2V_0^h \Delta t + \frac{4}{2} a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{5}{2} J_3^* \Delta t^3 \\ &+ \left[V_0^h \Delta t + \frac{3}{2} a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{4}{2} J_3^* \Delta t^3 \right] \end{aligned} \quad (1.74)$$

* * *

Dans le cas général, où nous voudrions calculer la distance parcourue par le véhicule hôte à l'itération j , nous pouvons trouver l'expression par récurrence suivante :

$$X_j^h = X_{veh}(t_k + j\Delta t) = X_{j-1}^h + V_0^h \Delta t + \left(j - \frac{1}{2} \right) a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{j^2}{2} J_3^* \Delta t^3 \quad (1.75)$$

Ensuite, nous pouvons développer la récurrence :

$$\begin{aligned} X_j^h &= X_0^h + \left[V_0^h \Delta t + \frac{1}{2} a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{1}{2} J_3^* \Delta t^3 \right] = X_0^h + jV_0^h \Delta t + \left[\sum_{i=1}^j \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^j i^2 \right] J_3^* \Delta t^3 \\ &+ \left[V_0^h \Delta t + \frac{3}{2} a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{4}{2} J_3^* \Delta t^3 \right] \\ &+ \left[V_0^h \Delta t + \frac{5}{2} a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{9}{2} J_3^* \Delta t^3 \right] \\ &\vdots \\ &+ \left[V_0^h \Delta t + \left(j - \frac{1}{2} \right) a_{ex}^\diamond \Delta t^2 - \frac{j^2}{2} J_3^* \Delta t^3 \right] \end{aligned} \quad (1.76)$$

Les relations (1.77) et (1.78) concernent les sommes dans l'expression précédente :

$$\sum_{i=1}^j \left(i - \frac{1}{2} \right) = \sum_{i=1}^j i - \sum_{i=1}^j \left(\frac{1}{2} \right) = \frac{j(j+1)}{2} - \frac{1}{2}j = \frac{j^2}{2} \quad (1.77)$$

$$\sum_{i=1}^j i^2 = \frac{1}{6}j(j+1)(2j+1) \quad (1.78)$$

Ainsi, X_j^h vaudra :

$$X_j^h = X_0^h + j V_0^h \Delta t + \frac{j^2}{2} a_{ex}^{\diamond} \Delta t^2 - \frac{1}{12} [j(j+1)(2j+1)] J_3^* \Delta t^3 \quad (1.79)$$

De même que pour le cas de la vitesse, nous pouvons exprimer cette condition comme une somme de constantes multipliées par des puissances du *nombre entier* j , comme montré sur (1.80). Cela permet de réduire le coût de calcul.

$$X_j^h = X_0^h + j \left[V_0^h - \frac{J_3^* \Delta t^2}{12} \right] \Delta t + j^2 \left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{2} - \frac{J_3^* \Delta t}{3} \right] \Delta t^2 - j^3 \left[\frac{J_3^*}{6} \right] \Delta t^3 \quad (1.80)$$

Pour déterminer la position du véhicule hôte à la fin de la manœuvre, il suffit de calculer l'expression précédente à l'itération $j = N$, où la valeur de N est donné par (1.65). Ainsi, X_N^h vaudrait :

$$X_N^h = X_0^h + \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right) \left[V_0^h - \frac{J_3^* \Delta t^2}{12} \right] \Delta t + \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^2 \left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{2} - \frac{J_3^* \Delta t}{3} \right] \Delta t^2 - \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^3 \left[\frac{J_3^*}{6} \right] \Delta t^3 \quad (1.81)$$

* * *

Si la cible se déplace à vitesse constante (et potentiellement nulle), il est possible de calculer sa position à l'itération $j = N$ comme :

$$X_N^c = X_0^c + V_0^c (N \Delta t) = X_0^c + X_0^c \left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \Delta t \quad (1.82)$$

Ainsi, l'inter-distance entre les deux véhicules à l'itération N est donnée par (1.83), où tous les paramètres sont des résultats précédents, des constantes ou des mesures.

$$\begin{aligned} \Delta X_N &= X_N^c - X_N^h \\ &= (X_0^c - X_0^h) + \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right) \left[V_0^c - V_0^h + \frac{J_3^* \Delta t^2}{12} \right] \Delta t - \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^2 \left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{2} - \frac{J_3^* \Delta t}{3} \right] \Delta t^2 + \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^3 \left[\frac{J_3^*}{6} \right] \Delta t^3 \\ &= \Delta X_0 [k] + \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right) \left[\Delta V_0 [k] + \frac{J_3^* \Delta t^2}{12} \right] \Delta t - \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^2 \left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{2} - \frac{J_3^* \Delta t}{3} \right] \Delta t^2 + \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^3 \left[\frac{J_3^*}{6} \right] \Delta t^3 \end{aligned} \quad (1.83)$$

Il faudrait donc veiller au respect de la condition (1.84). Si celle-ci ne pouvait pas être respectée, alors il serait nécessaire, d'appliquer une action corrective. Cela sort du périmètre de notre étude.

$$\Delta \dot{X}_{crit} \leq \Delta X_0 [k] + \left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \left[\Delta V_0 [k] + \frac{J_3^* \Delta t^2}{12} \right] \Delta t - \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^2 \left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{2} - \frac{J_3^* \Delta t}{3} \right] \Delta t^2 + \left(\left[\frac{a_{ex}^{\diamond}}{J_3^* \Delta t} \right] \right)^3 \left[\frac{J_3^*}{6} \right] \Delta t^3 \leq \Delta \dot{X}_{crit} \quad (1.84)$$

Does anybody know what we are living for?

(Est-ce que quelqu'un sait pour quelle raison nous vivons?)

The Show Must Go On

Roger Taylor, John Deacon, Brian May et Freddie Mercury

Finalisé à Suresnes, France, en décembre 2020

Edwin SOLANO ARAQUE

De l'ergonomie automobile à l'optimisation de la conduite automatisée. Application à l'écoconduite des véhicules électriques

Résumé :

Cette thèse se focalise sur l'étude de l'écoconduite (pratique de conduite visant à réduire l'impact environnemental de l'utilisation du véhicule) et, en particulier, des éco-manœuvres de conduite, avec prise en compte des contraintes d'infrastructure et de trafic, ainsi que des contraintes d'agrément de conduite. De plus, nous considérons, lors de la conception de l'algorithme, des principes inspirés de la cognition humaine, afin de renforcer l'efficacité et la bonne modularité. La facilité de calibration de l'algorithme est un autre aspect pris en considération. L'ensemble de l'exposé se focalise sur les véhicules électriques à batterie. Cependant, les principes proposés peuvent être adaptés pour leur application sur d'autres types de groupe motopropulseur.

Ces travaux s'orientent sur trois grandes lignes. La première, l'Ergonomie de conduite, a permis de déterminer des critères d'agrément de conduite ; une modélisation du conducteur permettant de tenir compte des aspects ergonomiques est proposée. De même, nos hypothèses sont confrontées au comportement d'un conducteur en situation réelle, en appliquant une méthodologie innovante pour l'analyse d'enregistrements de roulages réels. Ensuite, une Modélisation énergétique du véhicule et des manœuvres de conduite est présentée, ainsi qu'une analyse du potentiel et l'origine du gain associé à différentes stratégies d'éco-conduite. Finalement un Algorithme de commande est proposé pour la réalisation d'éco-manœuvres de conduite, avec prise en compte des critères d'agrément. La structure globale de l'algorithme, basée sur les principes cognitifs, est constitué de plusieurs sous-systèmes le rendant modulaire et capable de répondre aux contraintes de calcul en temps réel et de mise au point, propres au milieu industriel.

Mots clés : Ecoconduite, Véhicules Autonomes et Connectés, Véhicules électriques, Gestion de l'énergie, Ergonomie automobile, Commande optimale

From Automotive Ergonomics to Automated-Driving Optimization. Application to Eco-driving of Electric Vehicles

Summary :

In the framework of this dissertation, we will focus on Eco-driving and, particularly on eco-maneuvers, taking into account constraints associated to infrastructure and traffic, as well as with drivability. Additionally, we will take inspiration on Cognitive Principles for the algorithm design; it will allow to reinforce algorithm's effectiveness and modularity. Easiness of calibration will also be an important concern for our work. Our whole discussion focuses on Battery Electric Vehicles. However, the proposed principles may be adapted for their application for other types of powertrain.

Our work treats three main topics: on one side, Driving Ergonomics, allowing to determine some criteria on drivability ; we will also propose a modelling of the driver allowing to take into account ergonomics considerations. Finally, we will assess our hypothesis with respect with driver behavior on real situations, by applying an innovative methodology for the analysis of actual driving records. Next we will focus on Energy Model of the vehicle and of driving maneuvers, as well as to the assessment of energy gain potential associated to several Eco-driving strategies; the origin of these gains is also studied. Finally, we propose a Control Algorithm allowing to execute driving eco-maneuvers, while taking into account drivability criteria. The global algorithm structure is based on cognitive principles presented earlier. These function consists of several subsystems, which improves its modularity, and enforces its potential to operate within real-time constraints, and simplifies calibrations ; these both are major advantages for an industrial application.

Keywords : Eco-driving, Connected and Autonomous Vehicles, Electric Vehicles, Energy Management, Automotive Ergonomics, Optimal Control



Laboratoire PRISME, 8 rue Léonard
de Vinci 45072 Orléans Cedex 2



RENAULT