

TABLE DES MATIERES

Nomenclature	v
Introduction générale	1
Chapitre 1 Véhicules hybrides : définition et problématique	7
1.1 Introduction.....	9
1.2 Définition d'un véhicule électrique hybride	10
1.2.1 Définition et historique	10
1.2.2 Fonctionnalités	11
1.2.3 Composants des véhicules électriques hybrides	11
1.2.4 Classification suivant l'hybridation	14
1.2.5 Architectures des véhicules électriques hybrides	15
1.3 Dimensionnement d'un véhicule électrique hybride.....	18
1.3.1 Modèle mécanique d'un véhicule.....	18
1.3.2 Modélisation de l'usage d'un véhicule	22
1.3.3 Modélisation d'une chaîne de traction.....	35
1.3.4 Stratégies de gestion de l'énergie.....	37
1.3.5 Dimensionnement d'un véhicule	40
1.4 Conclusion	43
Chapitre 2 Modélisation de la mission d'un véhicule	45
2.1 Introduction.....	47
2.2 Acquisition d'informations	48
2.2.1 Le Géo-Positionnement par Satellite (GPS)	48
2.2.2 Indicateurs de caractérisation des missions	48
2.2.3 Mission urbaine mesurée.....	51
2.2.4 Mission extra-urbaine mesurée	53
2.2.5 Comparaison des missions mesurées aux cycles de conduite standards	55
2.3 Outils de Modélisation d'un processus temporel	59
2.3.1 Les méthodes d'intelligence artificielle	59
2.3.2 Les méthodes statistiques.....	60
2.3.3 Comparaison des méthodes et choix du modèle	65
2.4 Modélisation matricielle de Markov.....	66
2.4.1 Propriété de Markov.....	66
2.4.2 Définition des matrices de transition	66
2.4.3 Exemple d'estimation des matrices de transition	67
2.5 Modélisation du profil de puissance.....	69
2.5.1 Application aux profils de puissance mesurés	69
2.5.2 Simulations et analyses du modèle	71
2.5.3 Conclusion sur la modélisation du profil de puissance.....	77
2.6 Modélisation de la mission du véhicule.....	78
2.6.1 Choix du nombre d'états de la modélisation	78
2.6.2 Application aux missions mesurées.....	79
2.6.3 Simulations et analyses du modèle	81
2.6.4 Synthèse de la modélisation de la mission d'un véhicule	86
2.7 Conclusion	88

Chapitre 3		Modèle d'un véhicule pour son dimensionnement	89
3.1	Introduction.....		91
3.2	Modélisation du véhicule		92
	3.2.1	<i>Variables d'entrée et de sortie du modèle</i>	92
	3.2.2	<i>Approche par les flux de puissance.....</i>	94
3.3	Modèles génériques adimensionnels des composants.....		98
	3.3.1	<i>Modèle de la batterie.....</i>	98
	3.3.2	<i>Modèle de la machine électrique</i>	104
	3.3.3	<i>Modèle du moteur thermique</i>	108
	3.3.4	<i>Modèle du groupe électrogène</i>	111
3.4	Stratégie de gestion de l'énergie		115
	3.4.1	<i>Stratégie pour la structure série</i>	115
	3.4.2	<i>Stratégie pour la structure parallèle.....</i>	124
3.5	Calcul de la consommation.....		131
	3.5.1	<i>Calcul de la consommation moyenne de carburant lors d'une mission</i>	131
	3.5.2	<i>Application à une mission standard.....</i>	133
3.6	Conclusion		137
Chapitre 4		Application au dimensionnement d'un véhicule hybride	139
4.1	Introduction.....		141
4.2	Structure hybride série		142
	4.2.1	<i>Algorithme de dimensionnement</i>	142
	4.2.2	<i>Résultats du dimensionnement selon différents types de mission</i>	149
4.3	Structure hybride parallèle		162
	4.3.1	<i>Algorithme de dimensionnement</i>	162
	4.3.2	<i>Résultats du dimensionnement selon différents types de mission</i>	166
4.4	Comparatif des structures par rapport aux missions.....		172
4.5	Conclusion		174
Conclusion générale		175	
Bibliographie		181	
ANNEXES		189	
Annexe A	Etude de sensibilité à l'inclinaison de la route.....		191
Annexe B	Validation de la conservation de la corrélation entre les variables d'une mission		192
Annexe C	Caractéristiques techniques du GPS Garmin eTrex HC		193
Annexe D	Traitement des mesures		194
Annexe E	Composants de la base de données PSAT.....		196
Annexe F	Dimensionnements pour la structure série		197
Annexe G	Dimensionnements pour la structure parallèle		207

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

Liste des acronymes

Liste des acronymes	Description
ARTEMIS	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems
EUDC	Extra-Urban Driving Cycle
GE	Groupe Electrogène
GPS	Global Positioning System
Li-ion	Lithium-ion
MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents
MT	Moteur thermique
ME	Machine électrique
NEDC	New European Driving Cycle
PSAT	Power System Analysis Toolkit
REM	Représentation Energétique Macroscopique

Liste des symboles

Liste des symboles	Description (Unité)
C_{carb}	Consommation de carburant (l/100km)
$C_{carb,max}$	Moins bonne consommation de carburant (l/100km)
$C_{carb,min}$	Meilleure consommation de carburant (l/100km)
D	Distance totale parcourue sur l'ensemble des missions (m)
E_{bat}	Capacité énergétique de la batterie (Ws)
E_{carb}	Energie carburant équivalente (Ws)
E_{max}	Energie maximale de l'organe de stockage (Ws)
$E_s(t)$	Energie instantanée dans l'organe de stockage (Ws)
E_u	Energie utile de l'organe de stockage (Ws)
$e_{bat}(t)$	Energie instantanée de l'organe de stockage (Ws)
ΔE_{carb}	Coefficient d'ajustement de la consommation de carburant (Ws)
PHP	Potentiel d'Hybridation de Puissance
PHE	Potentiel d'Hybridation Energétique
$P_{bat,c}$	Puissance maximale de charge de la batterie (W)
$P_{bat,d}$	Puissance maximale de décharge de la batterie (W)
P_{ge}	Puissance nominale du groupe électrogène (W)
$P_{ge,opt}$	Puissance correspondant au rendement maximal du GE (W)
$P_{ge,seuil}$	Seuil de puissance du GE pour la gestion de l'énergie série (W)
P_{max}	Puissance maximale de la mission (W)
P_{me}	Puissance nominale de la machine électrique (W)
$P_{me,c}$	Puissance maximale de la ME limitée par la batterie en charge (W)
$P_{me,d}$	Puissance maximale de la ME limitée par la batterie en décharge (W)
$P_{me,seuil}$	Seuil de puissance de la ME pour la gestion de l'énergie série (W)
P_{moy}	Puissance moyenne de la mission (W)
P_{mt}	Puissance nominale du moteur thermique (W)
$P_{mt,off}$	Seuil de puissance du MT pour la gestion de l'énergie (W)
$P_{mt,on}$	Seuil de puissance du MT pour la gestion de l'énergie (W)
$P_{mt,opt}$	Puissance du moteur thermique à son meilleur rendement (W)
$P_{mt,seuil}$	Seuil de puissance du MT pour la gestion de l'énergie (W)
$P_{trans,seuil}$	Seuil de puissance de la transmission pour la gestion de l'énergie (W)

$p(t)$	Puissance instantanée (W)
$p_{bat}(t)$	Puissance instantanée en sortie de la batterie (W)
$p_{carb}(t)$	Puissance instantanée en sortie du réservoir de carburant (W)
$p_{chim}(t)$	Puissance instantanée chimique de la batterie (W)
$p_{ge}(t)$	Puissance instantanée du groupe électrogène (W)
$p_{me}(t)$	Puissance instantanée de la machine électrique (W)
$p_{mt}(t)$	Puissance instantanée du moteur thermique (W)
$p_{roues}(t)$	Puissance instantanée aux roues (W)
$p_{trans}(t)$	Puissance instantanée à la transmission mécanique (W)
Δp_{carb}	Coefficient de correction du rendement de la chaîne de traction (W)
$\eta_{bat,c}$	Rendement de la batterie en charge
$\eta_{bat,c}^{moy}$	Rendement moyen de la batterie en charge
$\eta_{bat,d}$	Rendement de la batterie en décharge
η_{ge}	Rendement du groupe électrogène
η_{ge}^{opt}	Rendement optimal du groupe électrogène
η_{max}	Rendement maximisé de la chaîne de traction
η_{me}	Rendement de la machine électrique
$\eta_{me,c}^{moy}$	Rendement moyen de la machine électrique en mode génératrice
$\eta_{me,m}$	Rendement de la machine électrique en mode moteur
$\eta_{me,g}$	Rendement de la machine électrique en mode génératrice
η_{mt}	Rendement du moteur thermique
$\eta_{mt,opt}$	Rendement optimal du moteur thermique
η_{trans}	Rendement de la transmission
m	Masse du véhicule (kg)
m_{bat}	Masse de la batterie (kg)
$m_{ch\grave{a}ssis}$	Masse du châssis (kg)
m_{ge}	Masse du groupe électrogène (kg)
m_{me}	Masse de la machine électrique (kg)
m_{mt}	Masse du moteur thermique (kg)
m_{tract}	Masse de la chaîne de traction (kg)
sE_{bat}	Energie massique de la batterie (Ws/kg)
sP_{ge}	Puissance massique du groupe électrogène (W/kg)
sP_{me}	Puissance massique de la machine électrique (W/kg)
sP_{mt}	Puissance massique du moteur thermique (W/kg)
R_{carb}	Ratio entre la meilleure consommation et la moins bonne (%)
T_c	Taux de charge de la batterie en fonctionnement normal (C)
$T_{max,c}$	Taux de charge de la batterie maximum (C)
T_d	Taux de décharge de la batterie en fonctionnement normal (C)
$T_{max,d}$	Taux de décharge de la batterie maximum (C)
k_{max}	Ratio puissance maximale / nominale pour la machine électrique (%)
δ_{max}	Durée autorisée à k_{max} pour la machine électrique (s)
SOC	Etat de charge de la batterie (%)
SOE	Etat d'énergie de la batterie (%)
SOE_{fin}	Etat d'énergie de la batterie à la fin de la mission (%)
SOE_{min}	Seuil minimal de l'état d'énergie de la batterie (%)
SOE_{max}	Seuil maximal de l'état d'énergie de la batterie (%)
$SOE_{c,bas}$	Seuil de l'état d'énergie d'entrée en mode « charge » (%)
$SOE_{c,haut}$	Seuil de l'état d'énergie de sortie du mode « charge » (%)
$SOE_{d,bas}$	Seuil de l'état d'énergie de sortie du mode « décharge » (%)

$SOE_{d,haut}$
 ΔSOE

Seuil de l'état d'énergie d'entrée en mode « décharge » (%)
 Ecart entre les états d'énergie initial et final de la batterie (%)

t Instant temporel (s)
 t_0 Instant de début de la mission (s)
 t_f Instant de fin de la mission (s)
 Δt Pas de temps (s)

Modèle de Markov

E Espace dénombrable
 M Matrice de Markov
 f_i Densité de probabilité de l'état futur j à un état présent i donné
 F_i^{-1} Fonction de répartition inverse de l'état futur j à un état présent i donné
 i Indice de l'état actuel de la chaîne de Markov
 j Indice de l'état futur de la chaîne de Markov
 k Probabilité aléatoire comprise entre 0 et 1
 n Nombre d'états de la chaîne de Markov
 $nb_{vit_{max}}$ Nombre de classes maximal pour la variable vitesse
 $nb_{acc_{max}}$ Nombre de classes maximal pour la variable accélération
 $nb_{inc_{max}}$ Nombre de classes maximal pour la variable inclinaison
 p_{ij} Probabilité de transition de l'état i à l'état j
 r_{ij} Nombre de transition de l'état i à l'état j
 P_i Puissance correspondant à l'état présent i
 P_j Puissance correspondant à l'état présent j
 P_{sim} Profil de puissance simulé (W)
 v_i Vitesse correspondant à l'état présent i
 v_j Vitesse correspondant à l'état présent j
 γ_i Accélération correspondant à l'état présent i
 γ_j Accélération correspondant à l'état présent j
 α_i Inclinaison correspondant à l'état présent i
 α_j Inclinaison correspondant à l'état présent j

Modèle mécanique du véhicule

F_a Force d'accélération du véhicule (N)
 F_h Force due à l'inclinaison (N)
 F_r Force de résistance au roulement (N)
 F_{tot} Force aux roues (N)
 F_w Force aérodynamique (N)
 $v = V$ Vitesse du véhicule (m/s)
 V_{res} Vitesse relative du véhicule (m/s)
 V_w Vitesse du vent de face
 γ Accélération du véhicule (m/s²)
 α Angle d'inclinaison de la chaussée (degré),
 A_f Surface frontale du véhicule (m²),
 C_w Coefficient de frottement aérodynamique,
 C_r Coefficient de résistance des roues au roulement,
 g Accélération gravitationnelle (m/s²),
 ρ Densité de l'air (kg/m³),
 λ Facteur de masse

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le secteur des transports est fortement responsable de l'accroissement de la consommation d'énergie en France, ainsi que des émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Parmi les différents modes de transport, le transport routier représenterait à lui seul 80 % de la consommation d'énergie. Or, pour son fonctionnement, le secteur des transports est dépendant à 98 % des produits pétroliers (ADEME, 2012).

Afin de rendre les véhicules moins consommateurs et moins polluants, de nouvelles normes européennes (Euro 4, Euro 5...) révisent à la baisse, tous les 4 ou 5 ans, les seuils d'émissions des principaux polluants réglementés. La recherche et le développement dans le domaine automobile permet de faire des progrès techniques pour diminuer les consommations des véhicules et par conséquent les émissions de CO₂. Les quatre principaux axes de recherche portent sur : les carburants conventionnels et alternatifs ; les systèmes de dépollution pour la réduction des émissions à l'échappement ; les moteurs (thermique, électrique, hybride, pile à combustible) ; les accessoires (climatisation, pneus, allègement, bruit). Parmi les différentes pistes à explorer, nous nous sommes intéressés aux véhicules électriques hybrides et plus particulièrement au dimensionnement des composants de la chaîne de traction.

En effet, à l'heure où l'automobile doit répondre à des enjeux environnementaux majeurs, le dimensionnement des composants de la chaîne de traction est une problématique clef dans les systèmes hybrides. La complexité de l'architecture embarquée est accrue par rapport aux véhicules thermiques conventionnels et il devient primordial de dimensionner correctement ces éléments afin d'assurer la fiabilité de l'architecture tout en diminuant sa consommation énergétique. Or, ce compromis n'est possible que par une bonne adéquation entre les systèmes de génération, les moyens de stockage d'énergie et les consommateurs électriques.

Le travail dont fait l'objet ce mémoire est principalement orienté sur le dimensionnement d'une chaîne de traction hybride selon trois objectifs. Le premier concerne le développement d'une méthode de dimensionnement pour des véhicules devant répondre à une mission ou un usage spécifique. Il semble par exemple évident qu'un véhicule de particulier de type urbain ne présente pas les mêmes besoins et caractéristiques qu'un camionnette de livraison ou qu'un véhicule distribuant le courrier en montagne. L'idée est donc de prendre en compte la mission réelle du véhicule pour optimiser le dimensionnement de la chaîne de traction, plutôt que de fixer des performances a priori (vitesse et accélération maximales, autonomie, etc.).

Dans ce contexte, plusieurs cycles de conduite de référence ont été développés par différentes institutions en particulier pour calculer les émissions de polluant d'un véhicule. Ces cycles sont souvent utilisés afin de comparer la consommation de carburant des véhicules entre

eux. Nous discuterons de l'intérêt et de la pertinence d'utiliser ces cycles pour notre application et étudierons leur impact sur le processus de dimensionnement d'un véhicule.

Le deuxième objectif est d'aboutir à un dimensionnement optimisé de manière « robuste », c'est-à-dire en ne se limitant pas à un profil de mission unique mais en utilisant un grand nombre de missions aléatoires de même nature. En effet, il serait intéressant de prendre en compte les variations de parcours et la dispersion des trajets qu'un véhicule peut avoir à effectuer. Une base de données mesurée conséquente permettrait de mener à bien cette étude. Cependant, cela implique la mise en place d'un système de mesures, de longues heures d'enregistrement ainsi qu'un espace mémoire important afin de conserver une telle base de données. Afin de limiter ces inconvénients, le développement d'un outil de modélisation de l'usage d'un véhicule permettrait de conserver les caractéristiques d'une base de données réduite à quelques heures de mesures et de simuler un grand nombre de profils de missions aléatoires.

Le troisième objectif est de ne faire aucun choix « a priori », ni sur la structure, ni sur les composants de la chaîne de traction. D'une part, cela implique de considérer les différentes architectures hybrides afin de comparer les structures série et parallèle entre-elles. D'autre part, le dimensionnement et les caractéristiques techniques des composants doivent être choisis à l'issue de l'étude. Les travaux se sont alors naturellement orientés vers la mise en œuvre d'une modélisation adaptée de la chaîne de traction ainsi que vers le développement d'une stratégie de gestion de l'énergie pour permettre de s'affranchir de ces choix.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier présente l'état de l'art des véhicules hybrides et les problématiques liées à la conception d'un tel véhicule. Cinq outils sont nécessaires à la démarche de dimensionnement. Le modèle mécanique du véhicule permet en premier lieu de déterminer la puissance demandée aux roues en fonction de différentes variables d'entrée qui seront identifiées. Une discussion est ensuite ouverte sur les différents cycles de conduite utilisés pour modéliser l'usage d'un véhicule. Dans un troisième temps, la modélisation d'une chaîne de traction est abordée puis une synthèse des stratégies de gestion de l'énergie est proposée. Finalement, la thématique du dimensionnement est présentée et les objectifs de cette étude sont précisés.

Le Chapitre 2 traite de la modélisation de l'usage d'un véhicule. Cette partie vise à caractériser la mission d'un véhicule selon son type (urbain, extra-urbain). Une base de données réelle a été enregistrée à l'aide d'un appareil GPS. Comme relevé dans le Chapitre 1, le modèle doit être capable de conserver les caractéristiques statistiques et dynamiques des missions enregistrées. De plus, la modélisation doit permettre de générer un grand nombre de missions aléatoires. D'après ces critères, le modèle par matrice de Markov est sélectionné et appliqué, dans un premier temps, aux profils de puissance mesurés, dans un second temps, aux missions définies par les trois variables {vitesse ; accélération ; inclinaison}. Nous analyserons la capacité de cette modélisation à conserver les relations entre celles-ci.

Le Chapitre 3 présente le modèle de la chaîne de traction d'un véhicule hybride dans l'optique de son dimensionnement. Les composants de cette chaîne de traction, le groupe électrogène, la batterie et la machine électrique, se devaient d'être modélisés de manière à ne pas faire de choix « a priori ». En considérant une approche par les flux de puissance, des modèles génériques adimensionnels des composants, caractérisant leurs rendements en fonction de leurs puissances réduites, ont été utilisés. Des stratégies de gestion de l'énergie sont alors proposées pour les structures série et parallèle en se basant sur une étude des modèles génériques adimensionnels afin de maximiser le rendement de la chaîne de traction. Cette modélisation permet de simuler les flux de puissance dans la chaîne de traction en fonction du dimensionnement des composants et de l'architecture du véhicule hybride.

Enfin, le Chapitre 4 propose un algorithme de dimensionnement développé de manière à minimiser la consommation de carburant du véhicule. Afin d'effectuer ce dimensionnement de manière « robuste » et par rapport à la nature de la mission, cet algorithme teste les combinaisons des composants {groupe électrogène ; batterie} pour la structure série et {moteur thermique ; batterie} pour l'architecture parallèle sur un ensemble de missions. Le dimensionnement est alors optimisé par rapport à l'usage du véhicule et sans choix arbitraire de la puissance des sources d'énergie ou de la structure du véhicule.

CHAPITRE 1

VEHICULES HYBRIDES : DEFINITION ET PROBLEMATIQUE

Chapitre 1 Véhicules hybrides : définition et problématique 7

1.1	Introduction.....	9
1.2	Définition d'un véhicule électrique hybride	10
1.2.1	Définition et historique	10
1.2.2	Fonctionnalités	11
1.2.3	Composants des véhicules électriques hybrides	11
1.2.3.1	Le stockage d'énergie	11
1.2.3.2	La motorisation thermique.....	13
1.2.3.3	La motorisation électrique	13
1.2.3.4	Choix des composants	13
1.2.4	Classification suivant l'hybridation.....	14
1.2.5	Architectures des véhicules électriques hybrides	15
1.2.5.1	La structure série	15
1.2.5.2	La structure parallèle	15
1.2.5.3	La structure combinée	16
1.2.5.4	Synthèse des diverses architectures	17
1.3	Conception d'un véhicule électrique hybride	18
1.3.1	Modèle mécanique d'un véhicule	18
1.3.1.1	Modèle (Fan, et al., 1993).....	18
1.3.1.2	Modèle (Ehsani, et al., 1997).....	20
1.3.1.3	Choix du modèle	21
1.3.2	Modélisation de l'usage d'un véhicule	22
1.3.2.1	Cycles de conduite à réalité limitée	22
1.3.2.2	Cycles de conduite développés à partir de mesures.....	25
1.3.2.3	Cycles de conduite générés de manière stochastique	31
1.3.2.4	Synthèse des différentes modélisations	34
1.3.3	Modélisation d'une chaîne de traction	35
1.3.3.1	Approche forward ou backward	35
1.3.3.2	Méthodes de modélisation	35
1.3.3.3	Choix de la modélisation	36
1.3.4	Stratégies de gestion de l'énergie	37
1.3.4.1	Lois de gestion hors ligne	38
1.3.4.2	Lois de gestion en ligne.....	38
1.3.4.3	Synthèse des diverses stratégies.....	39
1.3.5	Dimensionnement d'un véhicule	40
1.3.5.1	Dimensionnement selon les performances	40
1.3.5.2	Dimensionnement par downsizing	41
1.3.5.3	Dimensionnement systémique	41
1.3.5.4	Synthèse des méthodes de dimensionnement	42
1.4	Conclusion	43

1.1 INTRODUCTION

La conception d'un véhicule électrique hybride est une étude complexe à mener. En effet, de nombreux paramètres interviennent dans l'optimisation de ce type de véhicule amenant le concepteur à faire des choix plus ou moins a priori sur l'architecture ou le dimensionnement des composants par exemple. L'objectif de notre étude est de proposer une méthode de pré-dimensionnement limitant, dans la mesure du possible, ces choix a priori.

Ce chapitre est divisé en deux parties. Dans une première section, un état de l'art sur le véhicule électrique hybride sera présenté à travers sa définition et un bref historique, ses fonctionnalités, ses différents composants, sa classification suivant le degré d'hybridation et pour finir ses différentes architectures. Dans une deuxième section, les cinq rubriques indispensables à au dimensionnement d'un véhicule électrique hybride seront décrites. La première présente le modèle mécanique du véhicule choisi pour cette étude et la deuxième un état de l'art sur la modélisation de l'usage d'un véhicule qui montrera les limites des outils existants. Dans un troisième temps, une revue des différentes approches de modélisation de la chaîne de traction permettra de choisir la plus appropriée à notre étude et dans un quatrième temps, une synthèse des stratégies de gestion de l'énergie sera établie. Finalement, le dimensionnement d'un véhicule hybride sera abordé.

1.2 DEFINITION D'UN VEHICULE ELECTRIQUE HYBRIDE

1.2.1 DEFINITION ET HISTORIQUE

Par définition, un véhicule hybride est un véhicule intégrant deux sources d'énergies différentes, par exemple un moteur thermique conventionnel avec son réservoir de carburant et une machine électrique associée à une batterie (Rousseau, 2008).

En 1898, la Lohner-Porsche dite « la chaise » est le premier véhicule hybride thermique-électrique. Son architecture de type série incluait un moteur à combustion entraînant une génératrice qui alimentait des moteurs électriques situés dans les moyeux des roues avant. Cette automobile pouvait parcourir près de 60 km sur batterie seule (Chan, 2007).

Dans les années 1900, une automobile mixte pétrole/électricité, développée par le constructeur Pieper, est commercialisée en Belgique. Un moteur électrique aidait le moteur à pétrole de 3,5 CV dans les côtes et rechargeait les batteries dans les descentes (Beretta, 2010).

En 1902, la compagnie Krieger construisit quelques prototypes hybrides équipés d'un moteur thermique qui rechargeait les batteries via une dynamo. Ce constructeur basé à Paris fabriquait déjà des véhicules électriques avec roues avant motrices.

L'intérêt pour les véhicules hybrides commence à baisser avec le développement des moteurs thermiques et des chaînes de production d'Henry Ford à partir de 1904 (Chan, 2007).

Entre 1910 et 1918, la société Commercial Construction Trucks a produit des véhicules dont le moteur à essence entraîne une génératrice qui alimentait directement le moteur de traction, éliminant ainsi la nécessité d'une transmission ou d'une batterie.

En 1969, les voitures hybrides réapparurent après une longue période sans avancée. La General Motors 512 a été conçue pour fonctionner selon trois modes : en tout électrique pour une vitesse inférieure à 10 miles/h, en combiné électricité-essence entre 10 et 13 miles/h et en tout thermique au-delà de 13 miles/h.

L'intérêt pour la technologie hybride revient après l'embargo pétrolier de 1973. Volkswagen développe un véhicule hybride appelé « Taxi » avec la plage de rendement la plus grande de tous les hybrides présentés dans le monde jusqu'à là puisqu'une commutation est possible entre son moteur électrique et son moteur à essence.

En 1989, Audi présente son hybride Duo. C'est un hybride bi-mode dont le moteur électrique, alimenté par une batterie au nickel-cadmium, est connecté aux roues arrière du véhicule alors que le moteur thermique entraîne les roues avant.

L'ère moderne de l'automobile hybride commence en 1997 avec la commercialisation de la Toyota Prius au Japon. Deux ans plus tard, Honda lance l'Insight suivie de près par la Honda Civic Hybrid. En une dizaine d'années, plus d'un million de véhicules hybrides ont été vendus dans le monde et plus de vingt nouveaux modèles ont été introduits sur le marché automobile (Beretta, 2010).

1.2.2 FONCTIONNALITES

Grâce à l'hybridation de sa propulsion, un véhicule peut exploiter de nouvelles fonctionnalités par rapport au véhicule conventionnel afin de réduire sa consommation de carburant, d'améliorer ses performances et son confort de conduite (Rousseau, 2008).

- 1) **Stop & start** : Ce système permet d'arrêter le moteur thermique lors des arrêts aux feux rouges ou dans les embouteillages, puis de le redémarrer rapidement avec la possibilité d'une aide du moteur électrique pour favoriser le démarrage du véhicule. Ainsi, la consommation de carburant du moteur au ralenti est économisée lors d'arrêts de courte durée.
- 2) **Mode boost** : Ce mode correspond à l'assistance du moteur thermique par la machine électrique. Cela permet de faire tourner le moteur thermique à un point de fonctionnement avec un meilleur rendement. Ce mode peut aussi être actionné lorsque la demande en puissance est supérieure à celle que peut développer le moteur thermique.
- 3) **Mode régénération** : Dans ce mode, le moteur thermique fournit une puissance supérieure à celle demandée au niveau des roues afin de fonctionner à un meilleur rendement. Le surplus d'énergie est récupéré par la machine électrique, en mode génératrice, et emmagasiné dans un organe de stockage pour être utilisé ultérieurement.
- 4) **Mode freinage récupératif** : L'énergie cinétique du véhicule au freinage est récupérée sous forme d'énergie électrique et stockée.
- 5) **Mode tout thermique** : Cette fonctionnalité est celle d'un véhicule thermique classique puisque la batterie n'est pas utilisée. Ce mode est activé si la batterie est déchargée ou si le moteur thermique peut fonctionner à un bon rendement, lors d'un parcours autoroutier par exemple.
- 6) **Mode tout électrique** : A l'inverse, il s'agit du mode pour lequel le véhicule est propulsé à l'aide de l'énergie contenue dans l'organe de stockage alors que le moteur thermique est arrêté. Ce mode offre tous les avantages du véhicule électrique : une consommation de carburant nulle, l'absence de rejet de polluant et un fonctionnement silencieux.

1.2.3 COMPOSANTS DES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES

1.2.3.1 Le stockage d'énergie

Un véhicule nécessite au moins une source d'énergie embarquée voire deux dans le cas d'un véhicule hybride. La Figure 1.1 caractérise les différents éléments de stockage selon leur puissance massique (assurant l'accélération du véhicule) et leur énergie massique (assurant son autonomie).

Dans un véhicule conventionnel, c'est le **réservoir de carburant** qui assure son autonomie, choix qui s'explique clairement au regard de ses caractéristiques énergétiques. Cependant, la diminution des ressources fossiles et l'augmentation des émissions de polluants poussent à trouver des sources d'énergie alternatives pour limiter l'utilisation du carburant.

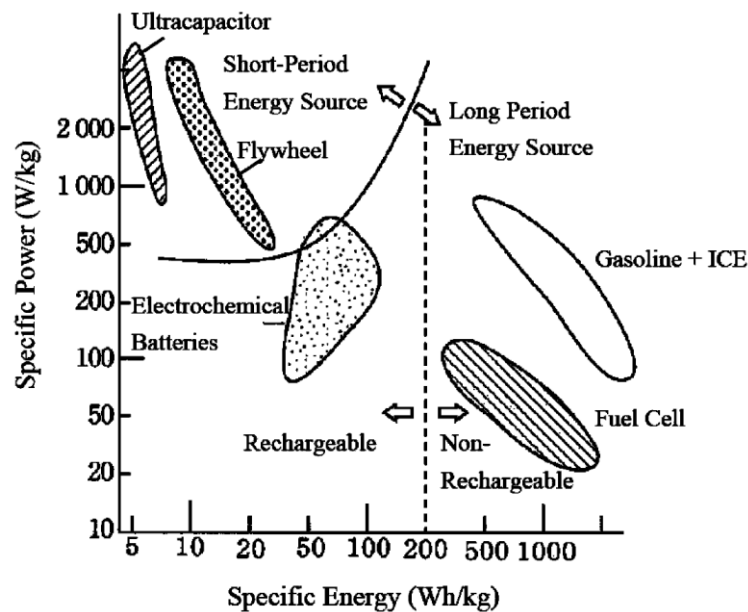


Figure 1.1 Densité de puissance et d'énergie des éléments de stockage (Chan, 2007)

Une des alternatives étudiées est la **pile à combustible** dont l'énergie spécifique est comparable à celle de l'essence. Cependant, sa puissance massique est bien inférieure ce qui laisse craindre des performances inférieures à celles obtenues par un moteur thermique. De plus, cette technologie est complexe, coûteuse et manque encore de fiabilité pour une commercialisation à court terme.

Des sources d'énergie complémentaires au carburant sont donc considérées et pour certaines déjà utilisées afin de réduire la consommation des véhicules : la batterie électrochimique, le supercondensateur et le volant d'inertie qui commence à être développé. Ces sources complémentaires apportent une fonctionnalité que le carburant et la pile à combustible n'ont pas : elles sont rechargeables.

La **batterie électrochimique** est l'élément de stockage réversible le plus utilisé dans les véhicules hybrides. Il existe différentes technologies de batterie sur le marché comme la batterie à base de plomb (Pb), de nickel (Ni) ou de lithium (Li) pour ne citer que les principales. Le stockage par batterie fait l'objet de nombreux travaux de recherche pour répondre au besoin automobile, cette technologie est donc en pleine évolution.

Le **supercondensateur** présente une énergie massique plus faible que celle de la batterie mais une densité de puissance plus importante. Ainsi cette source d'énergie est plus réactive aux demandes de fortes puissances mais ne permet pas d'accumuler beaucoup d'énergie. Son nombre de cycles de charge-décharge est très élevé comparé à celui d'une batterie.

Le **volant d'inertie** permet de stocker l'énergie sous forme cinétique. Comme le supercondensateur, il est caractérisé par une faible densité d'énergie et une forte puissance massique. Pour profiter d'une énergie importante, cette technologie est coûteuse et nécessite une installation sécurisée peu compatible avec un véhicule risquant un accident.

1.2.3.2 La motorisation thermique

Il existe différentes technologies de motorisation thermique comme par exemple le moteur diesel, à essence, au gaz de pétrole liquéfié, au gaz naturel ainsi que les moteurs à combustion externe Stirling ou Ericsson. Les moteurs diesel et à essence sont les plus courants dans le domaine automobile.

Comme rappelé précédemment, l'intérêt de la motorisation thermique provient des caractéristiques spécifiques du carburant en termes de puissance et d'énergie. Ainsi, un moteur thermique permet à lui seul de propulser un véhicule avec un réservoir de 40 litres sur 800 kilomètres d'autoroute, parcours qui demande une forte puissance et une grande autonomie.

Cependant, un moteur thermique présente quelques défauts. En effet son rendement ne dépasse pas les 45% pour le moteur diesel, il est bruyant et rejette des polluants. De plus un moteur thermique ne possède pas de couple à faible vitesse, son rendement est particulièrement mauvais à faible couple et sa plage de vitesse est réduite. Une boîte de vitesse permet de palier partiellement à ces défauts et d'utiliser le moteur dans de meilleures conditions.

1.2.3.3 La motorisation électrique

Les différentes technologies de machines électriques dans le domaine automobile sont les machines asynchrones, les machines synchrones à aimants permanents ou les machines synchrones à réluctance variable. Les machines à courant continu sont devenues obsolètes pour cette application avec les progrès de la commande des machines.

La motorisation électrique a deux fonctions dans un véhicule hybride. Soit la machine électrique fonctionne en mode moteur pour propulser le véhicule, soit elle fonctionne en génératrice pour récupérer l'énergie mécanique (au freinage ou fournie par le moteur thermique) et recharger la batterie. L'inconvénient majeur de cette technologie provient de la faible autonomie des sources d'énergie électrique qui lui sont connectées.

Les avantages de ce composant par rapport au moteur thermique sont un excellent rendement atteignant les 90% en moyenne pour les gammes de puissance considérées, un fonctionnement silencieux et propre. De plus, un moteur électrique permet de fournir un couple à faible vitesse appréciable au démarrage d'un véhicule et possède un fonctionnement à puissance maximale avec un bon rendement sur une large plage de vitesse.

1.2.3.4 Choix des composants

Le moteur thermique avec son réservoir de carburant et la machine électrique associée à une batterie étant les technologies les plus matures dans le domaine automobile, ce sont celles-ci que nous emploierons dans ce mémoire. Cependant la démarche proposée restera applicable quelle que soit la technologie de composant choisie.

1.2.4 CLASSIFICATION SUIVANT L'HYBRIDATION

Les constructeurs et équipementiers utilisent souvent une classification des véhicules électriques hybrides suivant leur degré d'hybridation défini par le rapport entre la puissance du moteur électrique et la puissance du moteur thermique. Cette classification distingue quatre niveaux : le Micro hybrid, le Mild hybrid, le Full hybrid et le Plug-in hybrid. Leurs fonctions, le gain en carburant et des exemples ont été répertoriés par (Lhomme, 2007) dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Classification des véhicules électriques hybrides par rapport à leur niveau d'hybridation

Type d'hybride	Fonctions	Gain en carburant sur cycle urbain	Exemples de véhicules
Micro hybrid ou Stop & start	Arrêt du moteur thermique (MT) : chaque fois que le véhicule est à l'arrêt, le MT est stoppé afin de moins consommer ; Redémarrage du MT : la machine électrique (ME) (alternateur-démarrreur) intégrée redémarre le MT quand le conducteur active la pédale d'accélérateur ; Accélération : l'alternateur-démarrreur peut aider le MT au démarrage et pendant de courtes accélérations ; Mode normal : le MT fonctionne seul, un couple supplémentaire de la ME peut être fourni pour pallier aux acyclismes du MT.	5 à 8 %	Citroën C3 Toyota Crown GM Saturn
Mild hybrid	La principale différence entre le Micro et le Mild hybrid est le remplacement de l'alternateur-démarrreur par une ME ; La ME propulse rarement le véhicule seul, elle assiste plutôt le MT ; La ME, l'alternateur et les batteries sont plus puissants que dans le cas d'un Micro hybrid et donc jouent un rôle plus important dans le fonctionnement du véhicule.	20 à 30 %	Honda Insight Honda Civic Honda Accord
Full hybrid	Sa configuration est quasiment la même que le Mild hybrid mais les composants sont encore plus puissants ; La ME propulse souvent le véhicule seul, particulièrement pour une conduite en ville ; Le MT peut être plus petit car la ME est de plus grande puissance et peut donc fournir un plus grand couple dans une gamme de régime donnée. Le système de commande est plus complexe afin d'optimiser la gestion de puissance.	30 à 40 %	Toyota Prius Ford Escape Peugeot 3008 Ford Escape
Plug-in hybrid	Son architecture est semblable au Full hybrid mais avec la possibilité de recharger la batterie par une source extérieure, sur le réseau par exemple ; La ME, l'alternateur et les batteries sont considérablement de plus grandes puissances ; Le système de commande doit empêcher de recharger la batterie tant que celle-ci n'a pas atteint un niveau minimal. Si celui-ci est atteint alors on passe en fonctionnement Full hybrid.	Aucun carburant consommé en mode tout électrique. Comparable au Full hybrid lorsque le moteur thermique est utilisé	Gruau Microbus Dassault-Heuliez Cleanova Daimler-Chrysler Sprinter Opel Ampera

1.2.5 ARCHITECTURES DES VEHICULES ELECTRIQUES HYBRIDES

Trois familles d'architectures hybrides sont communément définies :

- la structure série où le moteur thermique n'est pas connecté directement aux roues,
- la structure parallèle pour laquelle le moteur thermique fournit un couple aux roues,
- la structure combinée, dont l'architecture reprend les caractéristiques du série et du parallèle.

1.2.5.1 La structure série

Dans la configuration série, représentée en Figure 1.2 (Chan, 2007), seule la machine électrique est connectée directement à la transmission et donc aux roues. Le moteur thermique est associé à une génératrice électrique, faisant ainsi office de groupe électrogène et transformant l'énergie issue de la combustion en énergie électrique. L'électricité ainsi générée peut être emmagasinée dans un élément de stockage tel qu'une batterie électrochimique ou être utilisée par le moteur électrique pour propulser le véhicule.

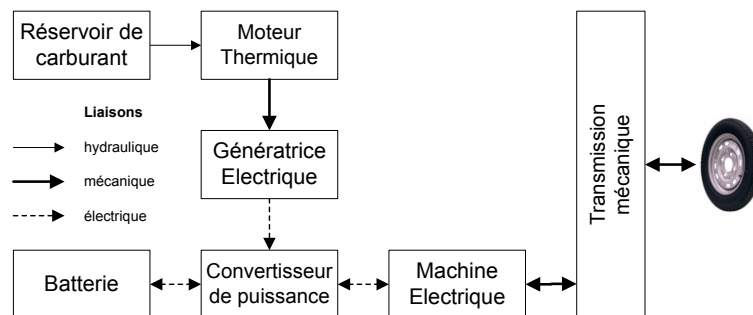


Figure 1.2 Architecture hybride série

Dans ce type d'hybridation, la machine électrique est la seule connectée aux roues. Elle doit donc être dimensionnée pour assurer seule la traction du véhicule. Le moteur thermique quant à lui, n'ayant pas de liaison mécanique avec la transmission, peut être contrôlé de manière à fonctionner à son point de rendement maximal (Rousseau, 2008).

L'intérêt de cette structure est donc de pouvoir utiliser le moteur thermique à son point de fonctionnement optimal quelle que soit la puissance demandée au niveau des roues. En revanche, le principal défaut de cet hybride est le cumul des rendements dû aux multiples conversions d'énergie (thermique > mécanique > électrique > mécanique) (Beretta, 2010).

Cette technologie a été choisie par General Motors pour son véhicule Volt. Les premières livraisons de la version européenne, l'Opel Ampera, ont commencé en début d'année 2012.

1.2.5.2 La structure parallèle

Dans la configuration parallèle, les moteurs thermique et électrique sont tous les deux connectés directement à la transmission donc aux roues. Ces deux moteurs peuvent ainsi participer indépendamment ou simultanément à la propulsion du véhicule, leurs puissances mécaniques s'additionnant alors au niveau des roues. Là où les puissances étaient combinées en

un nœud électrique dans la structure série, elles sont ici combinées en un nœud mécanique (Chan, et al., 2010) (Trigui, 2011).

Le schéma de principe de la structure parallèle ainsi que les transferts d'énergie possibles entre les différents organes sont représentés en Figure 1.3. La configuration générale de cette architecture est composée d'un moteur thermique avec son réservoir de carburant, d'une machine électrique couplée à un élément de stockage tel qu'une batterie et d'une transmission mécanique incluant la boîte de vitesse et l'embrayage (Chan, 2007).

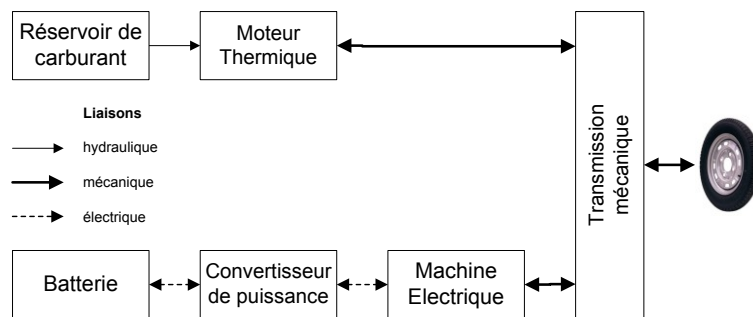


Figure 1.3 Architecture hybride parallèle

Dans ce type d'hybridation, le moteur thermique est principalement utilisé pour déplacer le véhicule. La machine électrique qui utilise l'énergie de la batterie permet un fonctionnement en mode boost et temporairement en mode tout électrique pour éviter des situations où le moteur thermique est peu efficace. La recharge des batteries est assurée par la récupération de l'énergie cinétique pendant les phases de décélération et de freinage du véhicule (Beretta, 2010).

L'architecture hybride parallèle est complexe à contrôler car les deux sources de puissance sont directement reliées aux roues. Il faut donc une commande capable de répartir la consigne de couple entre le moteur thermique et la machine électrique à chaque instant. Le coût de cette architecture est néanmoins compensé par son potentiel important de réduction de consommation de carburant (Rousseau, 2008).

Cette architecture est aussi la plus proche des véhicules conventionnels, ce qui explique peut-être que cette technologie ait été développée par de nombreux constructeurs comme Peugeot, Citroën et Honda pour leurs véhicules 3008, C4 et Civic respectivement.

1.2.5.3 La structure combinée

L'architecture combinée, appelée aussi hybride à dérivation de puissance, permet de combiner les avantages des structures série et parallèle. Cette structure présente un lien mécanique de plus entre le moteur thermique et la transmission par rapport à l'hybride série et une génératrice électrique est ajoutée entre le moteur thermique et le convertisseur de puissance par rapport à l'architecture parallèle comme le montre la Figure 1.4. Les puissances sont donc combinées en deux nœuds : l'un électrique et l'autre mécanique (Chan, et al., 2010) (Trigui, 2011).

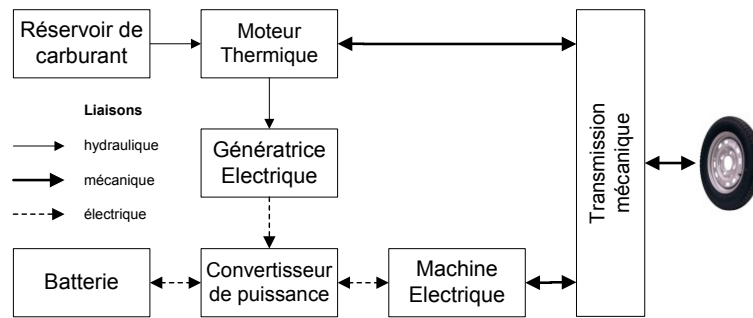


Figure 1.4 Architecture hybride combinée

La puissance du moteur thermique peut permettre de propulser le véhicule directement ou de recharger la batterie via la génératrice électrique. Le véhicule peut donc être propulsé par le moteur thermique, ou par la machine électrique, ou par les deux. Ainsi, une commande appropriée permet d'utiliser le moteur thermique à son point de fonctionnement optimal comme dans la structure série en profitant d'un bon rendement de la chaîne de conversion de l'énergie comme dans l'architecture parallèle. L'inconvénient de cette structure combinée est la complexité de la commande des trois moteurs qui implique aussi un coût élevé.

Cette technologie a été choisie par les concepteurs de la Toyota Prius et du 4x4 Lexus RX400h.

1.2.5.4 Synthèse des diverses architectures

Dans son étude, (Lhomme, 2007) récapitule les avantages et les inconvénients de chaque structure dans le Tableau 1.2. Dans cette étude, nous nous intéresserons principalement aux structures série et parallèle.

Tableau 1.2 Synthèse des diverses architectures

Architecture	Points forts	Points faibles
Série	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Bon rendement énergétique en mode tout électrique en zone urbaine ♦ Gestion relativement facile ♦ Très bon contrôle du moteur thermique 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Faible rendement énergétique de la chaîne globale en zone extra-urbaine ♦ Utilisation de trois machines dont une (au moins) de forte puissance ♦ Mode tout thermique impossible
Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Bon rendement énergétique ♦ Modes tout électrique et tout thermique possibles ♦ Utilisation d'une seule machine électrique de puissance plus faible que pour l'architecture série 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Gestion délicate ♦ Fonctionnement du moteur thermique pas toujours optimal ♦ Couplage mécanique et implantation des composants complexes
Combinée	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Bon rendement énergétique ♦ Tous les modes sont possibles (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle) ♦ Très bonne répartition de l'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Gestion très délicate ♦ Couplage mécanique et implantation des composants très complexes ♦ Utilisation de trois machines ♦ Coût élevé

1.3 DIMENSIONNEMENT D'UN VEHICULE ELECTRIQUE HYBRIDE

Le véhicule électrique hybride étudié dans ce mémoire embarque donc un moteur thermique, une batterie et une ou deux machines électriques selon la structure série ou parallèle. Le type d'hybridation, mild ou full hybrid, sera défini à l'issue du processus de dimensionnement.

La conception d'un véhicule électrique hybride repose ainsi sur cinq paramètres :

- le modèle mécanique d'un véhicule,
- la modélisation de l'usage d'un véhicule,
- le modèle de la chaîne de traction,
- la stratégie de gestion de l'énergie,
- le dimensionnement des composants.

Nous allons voir dans cette section un bref état de l'art dans chacun de ces domaines.

1.3.1 MODELE MECANIQUE D'UN VEHICULE

La première étape consiste à établir le modèle mécanique du véhicule. Ses deux caractéristiques principales sont : sa masse et le volume qu'il occupe dans l'espace. La masse, donc le poids, implique qu'une force est nécessaire pour accélérer le véhicule et vaincre les forces de résistance à l'avancement. Le volume du véhicule implique quant à lui un effort à fournir pour écarter l'air de la route lors d'un déplacement. Les différentes forces qui agissent sur le véhicule peuvent donc être identifiées à partir de la Figure 1.5. La littérature offre plusieurs modèles mécaniques plus ou moins complexes. Dans cette section, nous détaillerons succinctement deux de ces modèles puis nous sélectionnerons le modèle le mieux adapté à notre application.

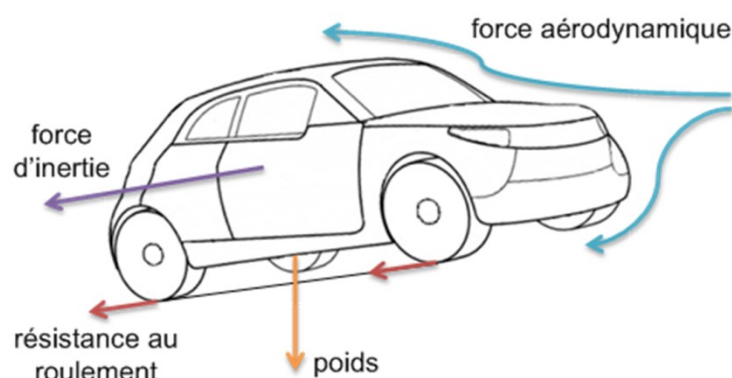


Figure 1.5 Bilan des forces agissant sur le véhicule

1.3.1.1 Modèle (Fan, et al., 1993)

Le système de propulsion doit fournir un effort de traction au niveau de la roue égale à la somme des forces pour surmonter la traînée aérodynamique, la résistance au roulement et l'inclinaison de la route. Il doit également fournir l'effort nécessaire à l'accélération du véhicule. Selon (Fan, et al., 1993), la force nécessaire à la traction du véhicule au niveau des roues est définie à partir des équations (1.1) à (1.5) :

$$F_{tot} = F_w + F_r + F_h + F_a \quad (1.1)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_w V_{res}^2 \quad (1.2)$$

$$F_r = m g C_r \cos \alpha \quad (1.3)$$

$$F_h = m g \sin \alpha \quad (1.4)$$

$$F_a = m \lambda \frac{dV_{res}}{dt} \quad (1.5)$$

où F_w est la force aérodynamique, F_r la force de résistance au roulement, F_h la force due à l'inclinaison et F_a la force pour l'accélération du véhicule,

V_{res} vitesse relative du véhicule, $V_{res} = V + V_w$ (m/s) avec V la vitesse du véhicule et V_w la vitesse du vent de face (négative en cas de vent arrière),

α angle d'inclinaison (degré),

A_f surface frontale du véhicule (m²),

C_w coefficient de frottement aérodynamique,

C_r coefficient de résistance des roues au roulement,

m masse du véhicule (kg),

g accélération gravitationnelle (m/s²),

ρ densité de l'air (kg/m³),

λ facteur de masse $\in [1.06 ; 1.34]$, qui dépend de la vitesse engagée

$$F_a = \lambda m \frac{dV_{res}}{dt} = \left[m + \sum J \left(\frac{i}{r} \right)^2 \right] \frac{dV_{res}}{dt} \quad (1.6)$$

où J est le moment d'inertie au niveau de la circonférence de la roue motrice, i le rapport de la boîte de vitesse et r le rayon de la roue (m)

La force aérodynamique F_w est, d'une part, proportionnelle à C_w . Ainsi, plus ce coefficient est réduit, meilleur est le profil du véhicule. Le coefficient C_w peut être estimé à :

- 0.2 pour un véhicule ayant un très bon profil,
- 0.3 pour un véhicule ayant un bon profil,
- 0.5 pour un véhicule typique,
- 0.7 pour une camionnette.

La force aérodynamique F_w est, d'autre part, proportionnelle à la surface frontale du véhicule A_f , ainsi, une réduction de A_f minimise la consommation d'énergie. Ce coefficient A_f est fonction de la hauteur et de la largeur du véhicule.

Parmi les paramètres des équations précédentes (1.2)-(1.5), certains paramètres comme la masse m peuvent être fournis par le fabricant du véhicule, alors que les autres doivent être identifiés à l'aide d'essais spécifiques sur le véhicule.

Un moyen pour identifier les coefficients du modèle mécanique du véhicule, est de lancer le véhicule à une vitesse donnée et de le laisser en « roue libre » (c'est-à-dire de débrayer le moteur). A partir de l'équation (1.7), on obtient pour cet essai :

$$0 = \frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_w \times V_{res}^2 + m \times g \times C_r \times \cos \alpha + m \times g \times \sin \alpha + m \times \lambda \times \frac{dV_{res}}{dt} \quad (1.7)$$

Aucune vitesse n'étant enclenchée, on a $\lambda = 1$. Sachant que $\frac{dV_{res}}{dt} = \frac{dV}{dt} + \frac{dV_w}{dt}$ et en considérant la vitesse du vent constante, on aura $\frac{dV_{res}}{dt} = \frac{dV}{dt}$. D'où :

$$m \times \lambda \times \frac{dV}{dt} = - \left[\frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_w \times V_{res}^2 + m \times g \times C_r \times \cos \alpha + m \times g \times \sin \alpha \right] \quad (1.8)$$

Pour deux instants différents, et grâce à des capteurs spécifiques, les quatre variables d'entrée α , V , V_w et $\frac{dV}{dt}$ peuvent être mesurées. Ainsi, en supposant que la masse m est connue, deux équations à deux inconnues permettent de déterminer $\rho \times A_f \times C_w$ et C_r .

1.3.1.2 Modèle (Ehsani, et al., 1997)

Nous allons maintenant présenter le modèle utilisé par (Ehsani, et al., 1997) pour définir une méthodologie de conception de véhicules électrique ou hybride en se basant sur la dynamique du véhicule. Il diffère du modèle (Fan, et al., 1993) par la définition de la force de roulement.

Dans ce modèle, la force de roulement prend en compte la déformation des pneus sur la route :

$$F_r = m \times g \times C_f(V_{res}) \quad (1.7)$$

où C_f est le coefficient de résistance de roulement des pneus. Il augmente d'une manière non linéaire avec la vitesse du véhicule et également au cours des manœuvres du véhicule.

Contrairement au modèle (Fan, et al., 1993), F_r est indépendante de l'inclinaison de la route.

1.3.1.3 Choix du modèle

Le Tableau 1.3 permet de faire une synthèse des modèles présentés précédemment.

Tableau 1.3 Comparaison entre les deux modèles proposés

	Modèle (Fan, et al., 1993)	Modèle (Ehsani, et al., 1997)
Force aérodynamique F_w	$\frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_w \times V_{res}^2$	$\frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_w \times V_{res}^2$
Force de roulement F_r	$m \times g \times C_r \times \cos \alpha$	$m \times g \times C_f(V_{res})$
Force due à l'inclinaison F_h	$m \times g \times \sin \alpha$	$m \times g \times \sin \alpha$
Force d'accélération F_a	$m \times \lambda \times \frac{dV_{res}}{dt}$	$m \times \lambda \times \frac{dV_{res}}{dt}$
Paramètres mesurables	$\rho \times A_f \times C_w, C_r$	$\rho \times A_f \times C_w$
Paramètres à chercher	λ	$\lambda, C_f(V_{res})$
Variables mesurées par capteurs	$\alpha, V, V_w, \frac{dV_{res}}{dt}$	$\alpha, V, V_w, \frac{dV_{res}}{dt}$

Les paramètres du modèle (Fan, et al., 1993) peuvent être identifiés par des essais simples, tandis que le paramètre C_f du modèle (Ehsani, et al., 1997) nécessite de mettre en place une méthode plus complexe. Le but de notre étude étant d'effectuer un pré-dimensionnement des composants d'un véhicule, le modèle (Fan, et al., 1993) répond à nos besoins.

La vitesse du vent n'est pas souvent prise en compte dans les études énergétiques des véhicules. En effet, le vent est un processus stochastique complexe à modéliser, qui peut augmenter la puissance demandée à la traction s'il est de face mais aussi la diminuer s'il est de dos. Dans ce mémoire, la vitesse du vent est négligée.

Le modèle mécanique du véhicule choisi comporte donc trois variables d'entrée qui sont la vitesse du véhicule, son accélération et l'inclinaison de la route. La masse du véhicule est quant à elle un paramètre d'entrée du modèle qui dépend du dimensionnement de la chaîne de traction.

1.3.2 MODELISATION DE L'USAGE D'UN VEHICULE

Afin de modéliser l'usage d'un véhicule, des cycles de conduite de référence représentant la vitesse du véhicule en fonction du temps ont été développés dans le but d'évaluer les émissions de polluants des véhicules ainsi que leur consommation de carburant. Dans un premier temps, ils ont permis de comparer les véhicules sur une même base et de vérifier leur respect des normes en vigueur. Les cycles standards ont ensuite été utilisés dans les phases de conception, de développement et de test des véhicules électriques hybrides. En effet, ces cycles de conduite définissent l'usage du véhicule à partir duquel il est possible de dimensionner la capacité de la batterie et d'optimiser la stratégie de gestion de l'énergie du véhicule hybride.

De nombreux standards sont utilisés dans la littérature et certaines institutions développent leurs propres cycles de référence afin de répondre aux contraintes de leurs applications. En effet, l'usage d'un véhicule automobile peut être très différent selon la zone géographique (États-Unis ou Europe), le type de voie (urbain ou autoroutier) et le type de véhicule (véhicule particulier ou poids lourd). Trois catégories de cycle de conduite se distinguent :

- les cycles standards à « réalité limitée » définis à partir de performances limites du véhicule comme sa vitesse et son accélération maximales,
- les cycles standards développés à partir de mesures en conditions réelles et constitués de micro-trajets représentatifs d'une base de données par exemple,
- les cycles générés selon une approche stochastique pour disposer d'une grande variété de parcours.

1.3.2.1 Cycles de conduite à réalité limitée

1.3.2.1.1 Standards SAE J227A

Dans leur article (Fan, et al., 1993), Fan, Dawson et Eastham estiment la puissance et l'énergie requises par un véhicule électrique pour différentes conditions de conduite avec les quatre cycles de conduite du standard SAE J227A. Les caractéristiques de ces cycles sont récapitulées dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 Tableau des caractéristiques des cycles de conduite SAE J227A (Fan, et al., 1993)

type	v_{max} km/h	acc t_a , s	cruise t_{cr} , s	coast t_{co} , s	brake t_b , s	idle t_i , s	total t_{tot} , s
A	16 ± 1	4 ± 1	0	2 ± 1	3 ± 1	30 ± 2	39 ± 2
B	32 ± 1	19 ± 1	19 ± 1	4 ± 1	5 ± 1	25 ± 2	72 ± 2
C	48 ± 1	18 ± 2	20 ± 1	8 ± 1	9 ± 1	25 ± 2	80 ± 2
D	72 ± 1	28 ± 2	50 ± 2	10 ± 1	9 ± 1	25 ± 2	122 ± 2

Chaque cycle contient 5 phases représentées en Figure 1.6 :

- un temps d'accélération t_a pour atteindre la vitesse maximum,
- un temps t_{cr} à la vitesse de croisière,
- un temps t_{co} où le véhicule monte une pente,
- un temps t_b de freinage pour stopper le véhicule,
- un temps t_i où le moteur tourne à vide avant la fin du cycle.

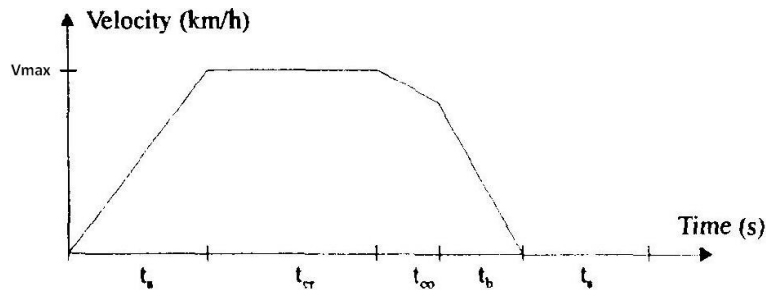


Figure 1.6 Profil des cycles de conduite SAE J227A (Fan, et al., 1993)

Le cycle de type D, de caractéristique plutôt périurbaine avec une vitesse maximale de 72 km/h, a été sélectionnée par (Fan, et al., 1993) pour établir les performances de leur véhicule électrique.

1.3.2.1.2 Standards européens

En Europe, les cycles ECE-15 et EUDC (Extra Urban Driving Cycle) sont les références.

Le cycle ECE-15 illustré en Figure 1.7 a été conçu pour représenter les conditions de conduite urbaine dans des villes comme Paris ou Rome par exemple. Il est caractérisé par une faible vitesse du véhicule, une faible charge du moteur et une faible température des gaz d'échappement.

Le cycle EUDC, en Figure 1.8, a été construit pour tenir compte des modes de conduite plus « agressifs » à haute vitesse. La vitesse maximale du cycle EUDC a été fixée à 120 km/h et est maintenue sur une très courte durée.

Le cycle NEDC (New European Driving Cycle) a ensuite été conçu pour représenter l'usage typique d'un véhicule en Europe. La Figure 1.9 montre qu'il est constitué du cycle de conduite urbain ECE-15 répété quatre fois (de 0 à 800 s) et du cycle de conduite extra-urbain EUDC (de 800 à 1200 s).

Les cycles ECE-15 et EUDC ont été utilisés par (Kleimaier, et al., 2000) pour l'optimisation de la conception d'un véhicule hybride et de son algorithme de contrôle.

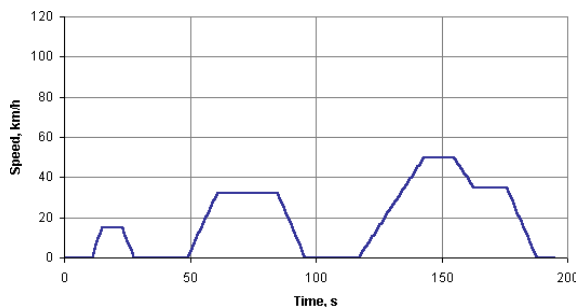


Figure 1.7 Cycle de conduite ECE-15
(www.dieselnet.com, 2009)

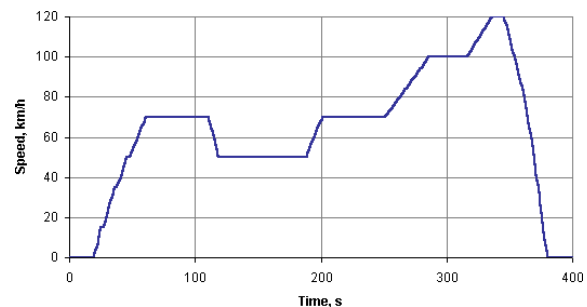
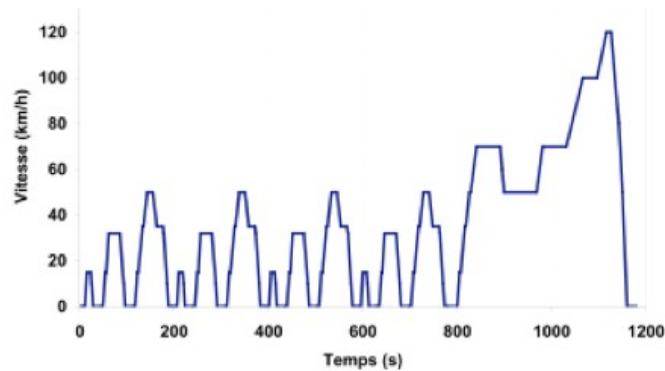
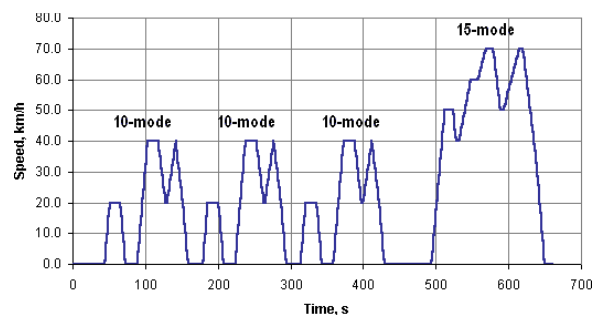


Figure 1.8 Cycle de conduite EUDC
(www.dieselnet.com, 2009)



1.3.2.1.3 Standard japonais

Sur le même principe, le cycle JPN 10-15 a été élaboré pour certifier la consommation de carburant et les émissions de polluants pour des véhicules légers au Japon. Ce cycle a permis de valider l'algorithme de contrôle d'un véhicule hybride dans (Barsali, et al., 2004)



1.3.2.1.4 Conclusion sur les cycles de conduite à réalité limitée

L'avantage des cycles précédemment présentés est clairement la simplicité de leur définition et donc de leur mise en œuvre dans le développement de véhicules automobiles. Cependant, plusieurs critiques sur leur représentativité et leur sévérité peuvent être relevées.

Dans un premier temps, la définition de la vitesse maximum à 70 km/h au Japon, à 72 km/h dans le cycle SAE et à 120 km/h pour le cycle NEDC peut sembler arbitraire. En effet, les vitesses limites observées sur les autoroutes dans le monde atteignent les 100 km/h au Japon, les 130 km/h aux Etats-Unis et dans la plupart des pays européens, les 140 km/h en Pologne et voire plus en Allemagne où il n'y a pas de limite.

Une deuxième critique, soulignée par (Rahman, et al., 1999), (Guzzella, et al., 2005), (Crolla, et al., 2008) et (Jaafar, 2011), porte sur le caractère non réaliste des accélérations et décélérations constantes de ces cycles. En effet, la dynamique des véhicules, en termes de valeur et de diversité de l'accélération, est bien plus élevée en pratique.

Ces cycles de conduite ne présentant pas les qualités de représentativité et de sévérité requises, d'autres cycles de conduite ont été développés à partir de données réelles mesurées.

1.3.2.2 Cycles de conduite développés à partir de mesures

1.3.2.2.1 Cycles de conduite européens ARTEMIS

Dans le cadre du projet de recherche européen ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems), l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) a élaboré un ensemble de cycles de conduite de référence (André, 2004). Dans le cadre d'une campagne de mesures des émissions de polluants des véhicules particuliers, l'utilisation de ces cycles assure la compatibilité et l'intégration des émissions de polluants dans les systèmes d'inventaires européens.

Les cycles ARTEMIS ont été construits à partir d'une large base de données mesurées en France, au Royaume-Uni, en Allemagne, en Grèce, en Suisse et en Italie. Cela représente des milliers d'heures de mesures sur un peu moins de 3000 véhicules différents avec 27000 tests d'émission. L'analyse de ces données dans le plan accélération / vitesse, en fonction du type de conduite dans lequel elles ont été enregistrées, a permis de définir 12 sous-types de cycles de conduite illustrés en Figure 1.11. Une étude statistique sur la composition des types de conduite (urbain, routier, autoroutier) en fonction de ces sous-types a permis de définir trois cycles de conduite présentés en Figure 1.12. Ce jeu de cycles de conduite est adapté à la mesure des émissions de polluants pour les véhicules légers.

D'autres cycles ont été développés, très comparables aux précédents de par la méthode employée, les données et leur structure. Cependant, la base de données a été préalablement partagée en deux sous-ensembles correspondant respectivement aux véhicules faiblement et fortement motorisés (André, 2006).

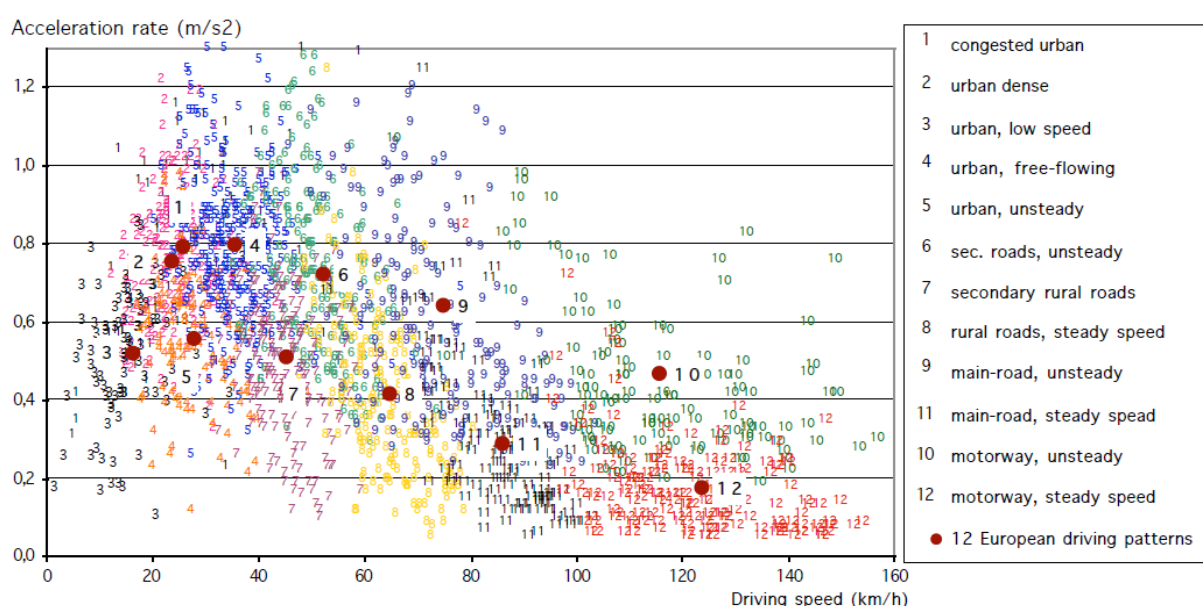


Figure 1.11 Variabilité des conditions de conduite et positionnement des 12 centres des classes au sein d'un échantillon d'observations (André, 2004)

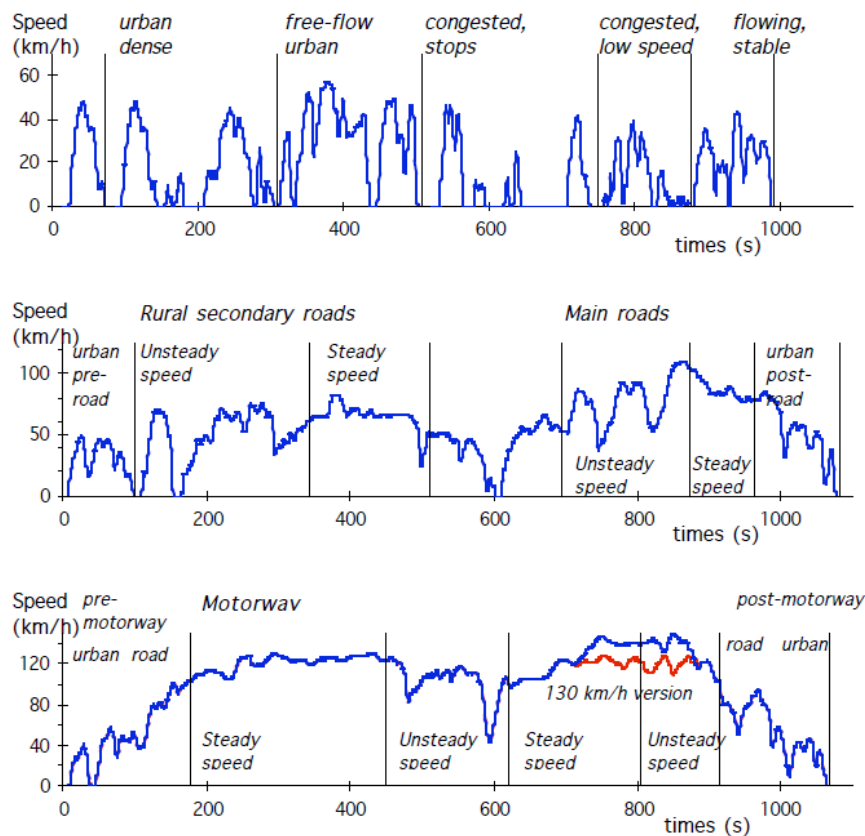


Figure 1.12 Cycles de conduite Artemis (André, 2004)

1.3.2.2.2 Cycles de conduite à Hong Kong

Une approche similaire à celle ayant conduit aux cycles ARTEMIS a permis de développer trois cycles de conduite (cf. Figure 1.13) selon les conditions de trafic à Hong Kong (Hung, et al., 2007).

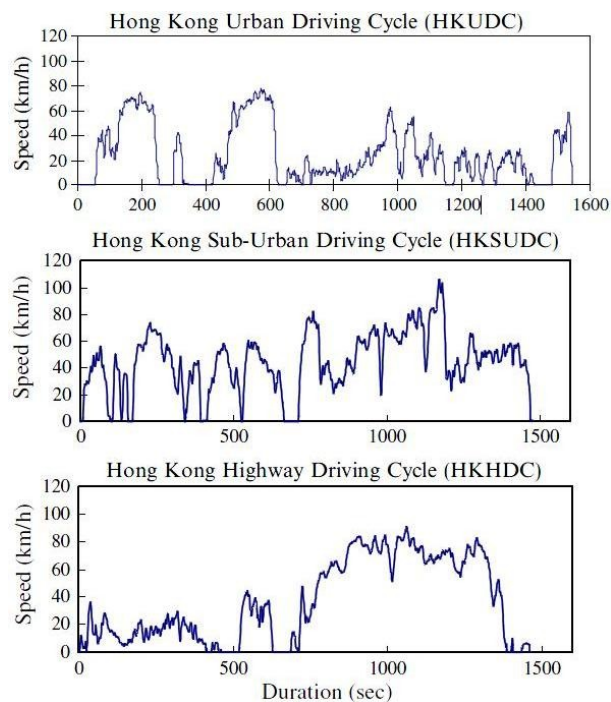


Figure 1.13 Cycles de conduite à Hong Kong (Hung, et al., 2007)

1.3.2.2.3 Divers standards américains

Aux Etats-Unis, le cycle FTP-72 (Federal Test Procedure), aussi appelé Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), est utilisé pour la certification des émissions des véhicules légers (cf. Figure 1.14). Il se compose de deux phases : une phase de démarrage à froid de 505 s et une seconde phase de 864 s. Ce cycle simule un trafic urbain sur 12 km avec des arrêts fréquents et une vitesse maximum établie à 90 km/h.

Le cycle FTP-75, représenté en Figure 1.15, reprend les deux phases du cycle FTP-72 auxquelles est ajoutée une phase de démarrage à chaud. La distance parcourue est alors de 18 km pour une durée de 1874 s et toujours une vitesse maximum de 90 km/h.

Le cycle HWFET (HighWay Fuel Economy Test) vient en complément du FTP-75 pour simuler un comportement routier : 17 km sont parcourus en 765 s avec une vitesse maximale de 96 km/h (Figure 1.16).

Le cycle UDDS HDV (Urban Dynamometer Driving Schedule for Heavy-Duty Vehicles) a été développé pour tester les véhicules poids lourds sur un parcours de 9 km en 1060 s et une vitesse maximum de 93 km/h (cf. Figure 1.17).

Dans l'article (Wang, et al., 2006), la stratégie de gestion de l'énergie est optimisée sur les cycles FTP-75 et HWFET afin d'économiser le carburant et de limiter les émissions de polluants.

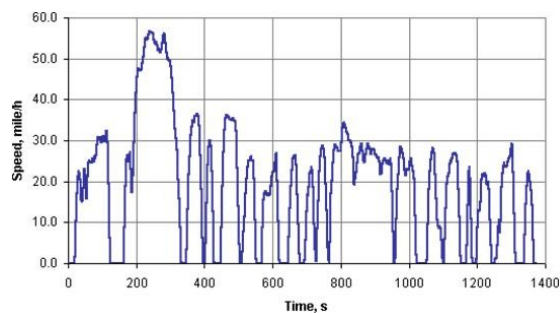


Figure 1.14 Cycle de conduite FTP-72 ou UDDS
(www.dieselnet.com, 2009)

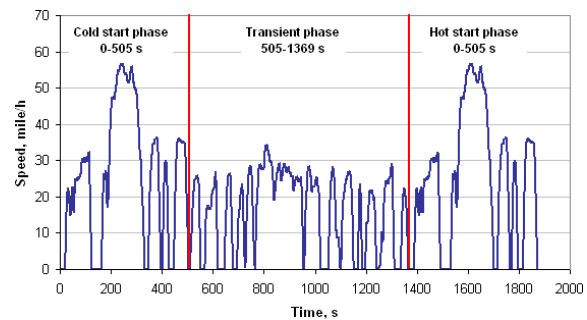


Figure 1.15 Cycle de conduite FTP-75
(www.dieselnet.com, 2009)

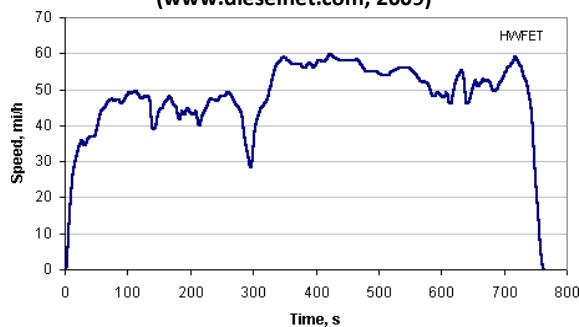


Figure 1.16 Cycle de conduite HWFET
(www.dieselnet.com, 2009)

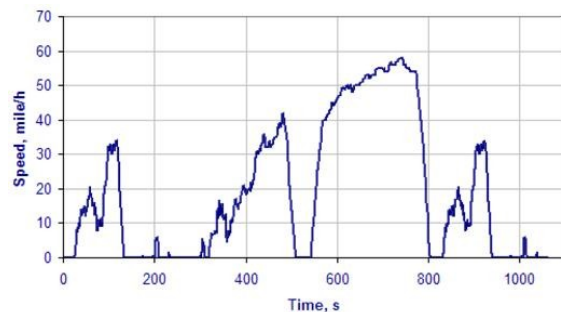


Figure 1.17 Cycle de conduite UDDS HDV
(www.dieselnet.com, 2009)

1.3.2.2.4 Standards SAE J1711 PCT

Un autre standard, le SAE J1711 PCT est utilisé par (Rahman, et al., 2000) pour calculer les émissions de polluants et la consommation de carburant d'un véhicule hybride parallèle. Quatre cycles standards, représentés en Figure 1.18, le composent : le Federal Urban Drive Cycle (FUDS), le HighWay Fuel Economy Test (HWFET), le United States high speed and acceleration (US06) et le Supplemental Federal Test Procedure (SFTP).

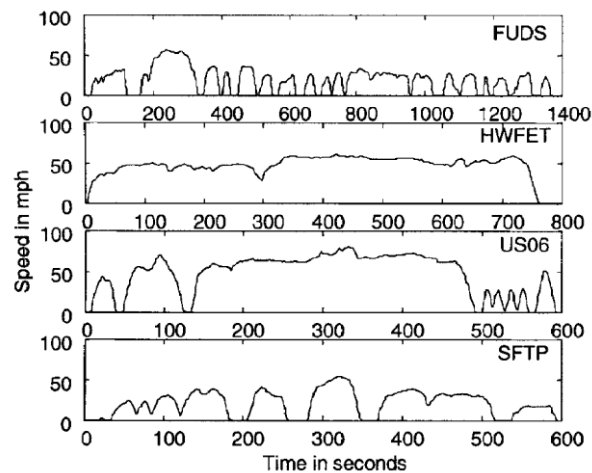


Figure 1.18 Standards SAE J1711 PCT (Rahman, et al., 2000)

1.3.2.2.5 Cycles West Virginia University

La West Virginia University a développé trois cycles pour véhicules poids lourds selon le type de trafic rencontré : le WVU CITY, le WVU INTER-city et le WVU SUBurban (cf. Figure 1.19). Cet effort de recherche a été motivé par la nécessité d'obtenir des mesures représentatives des émissions de poids lourds afin de comparer les carburants diesel, essence ou biocarburant.

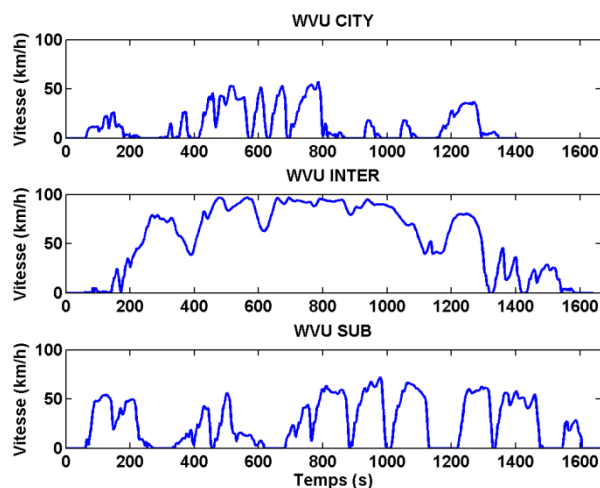


Figure 1.19 Cycles de conduite de la West Virginia University (source : PSAT)

1.3.2.2.6 Cycles de conduite pour véhicule hybride plug-in

(Tara, et al., 2010) ont développé deux profils d'utilisation pour un véhicule hybride plug-in à partir d'une base de données collectées sur une flotte de véhicules dans la ville de Winnipeg au Canada. Le premier représente un parcours en semaine (Figure 1.20) et le second le week-end (Figure 1.21). Les phases de stationnements présentant un potentiel de recharge sont incluses aux profils puisque c'est une donnée importante pour un véhicule de type plug-in.

Ces cycles ont permis d'optimiser le dimensionnement d'une batterie afin de convertir un véhicule full hybrid similaire à la Toyota Prius en un véhicule de type plug-in.

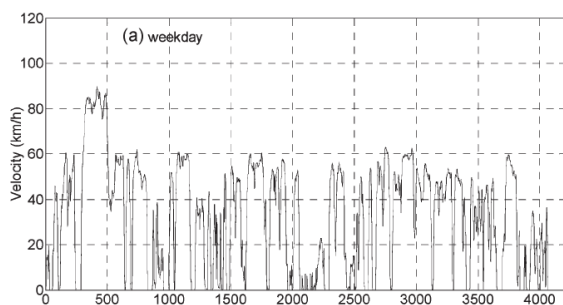


Figure 1.20 Cycle de conduite pour un véhicule plug-in en semaine (Tara, et al., 2010)

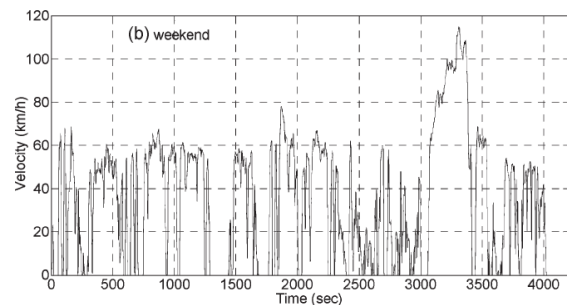


Figure 1.21 Cycle de conduite pour véhicule plug-in le week-end (Tara, et al., 2010)

1.3.2.2.7 Modèle d'un trajet spécifique

Avec le développement de l'outil GPS et la disponibilité d'informations sur le trafic routier, il est possible de prédire la puissance instantanée nécessaire à la propulsion et ainsi optimiser la stratégie de gestion de l'énergie. Dans ce cadre, l'article (Johannesson, et al., 2007) propose de modéliser une mission spécifique, c'est-à-dire un trajet routier spécifique, comme un processus stochastique basé sur des données mesurées. Deux modèles sont définis : le premier est indépendant de la position du véhicule sur le trajet alors que le second modèle la prend en compte. L'objectif de l'article est de comparer les stratégies de gestion de l'énergie basées sur chacun de ces modèles prédictifs de la mission spécifique.

Ces modèles stochastiques de la mission sont basés sur les chaînes de Markov dont la propriété fondamentale est que l'état futur ne dépend que de l'état présent et non du passé. La matrice de Markov permet de modéliser un processus grâce aux probabilités de passage d'un état à un autre. La définition de la matrice de Markov sera plus amplement développée dans le chapitre suivant.

Les modèles sont construits à partir de la mesure de la vitesse d'un véhicule enregistrée trente-sept fois sur le même parcours. La première matrice de Markov est construite en considérant les transitions de l'état défini par les deux variables {vitesse aux roues ; puissance demandée}. Pour cette matrice, la référence est temporelle c'est-à-dire que la matrice contient les probabilités de transitions de l'état à l'instant présent vers l'état à l'instant futur. La seconde

matrice de Markov est construite pour considérer cette fois un état défini par le couple {vitesse aux roues ; accélération du véhicule} alors que la référence est la position du véhicule c'est-à-dire que la matrice contient les probabilités de transitions de l'état à la position actuelle vers l'état à la position future.

Dans la continuité de cette étude, l'article (Johannesson, et al., 2009) propose de construire la matrice de Markov en considérant un état défini par le mode de fonctionnement. Quatre modes sont définis : accélération, contrôle de la vitesse, freinage et arrêt. Deux exemples, présentés en Figure 1.22, montrent la performance du modèle à reproduire les mesures (de gauche) en simulations (à droite).

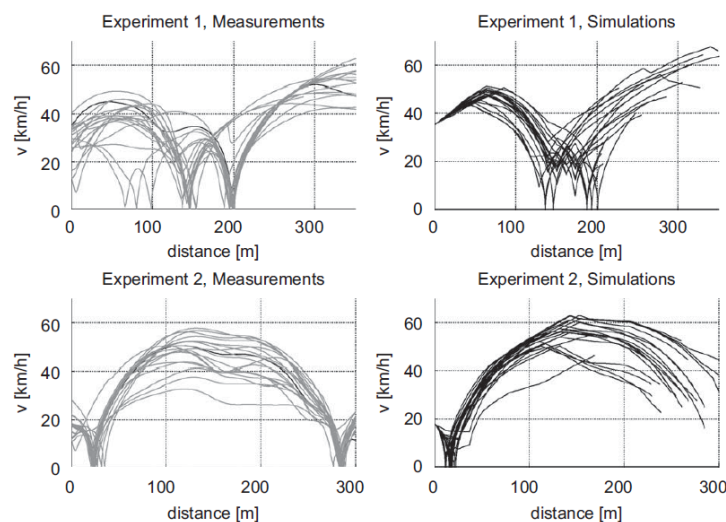


Figure 1.22 Comparaison entre les trajectoires mesurées et celles simulées (Johannesson, et al., 2009)

Cette méthode de modélisation par matrice de Markov a été utilisée par (Lin, et al., 2003) et (Lee, et al., 2011) afin de synthétiser un cycle représentatif d'une base de données mesurée qui permet d'évaluer la consommation d'énergie et le potentiel de recharge des véhicules plug-in.

1.3.2.2.8 Conclusion sur les cycles de conduite développés à partir de mesures

Les cycles de conduite développés à partir de mesures présentent certains avantages comparés aux cycles à réalité limitée. En effet, ils sont plus représentatifs de la conduite en conditions réelles et notamment de la dynamique en termes d'accélération et de décélération. Cependant, un inconvénient de ces deux catégories de cycles peut être soulevé en termes de représentativité de la diversité de conduite. En effet, tous les cycles présentés précédemment spécifient un trajet particulier (Souffran, et al., 2011b).

Ainsi des études, comme (Adornato, et al., 2009) par exemple, se basent sur une campagne de mesures réalisée dans des conditions de conduite réelle. Cependant, ce type de base de données n'est pas accessible à tous et occupe un espace mémoire non négligeable. Pour parer à cet inconvénient, sans avoir recours à une base de données volumineuse, une approche stochastique de génération de cycles de conduite a été développée par plusieurs auteurs.

1.3.2.3 Cycles de conduite générés de manière stochastique

1.3.2.3.1 Cycles générés aléatoirement par une approche probabiliste

L'étude (Ravey, et al., 2010) présente un modèle statistique caractérisant la mission d'un camion à ordures de l'aller où il démarre à vide du centre des déchets, à la phase de collecte puis au retour où il rentre plein. Plusieurs grandeurs caractéristiques de la mission du camion ont été identifiées à partir de données statistiques réelles : la distance et la vitesse du trajet entre le centre et la première maison, la distance et la vitesse du parcours entre deux maisons, le temps de collecte et le poids des ordures à chaque maison et l'inclinaison de la route. Ces sept variables ont été modélisés par une distribution normale :

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad x \in \mathbb{R}$$

où x représente l'une des sept variables, μ est la valeur moyenne et σ est l'écart-type. A partir des distributions statistiques de chaque variable, leurs valeurs sont tirées aléatoirement et indépendamment à chaque instant de la mission du véhicule afin de générer un cycle de conduite. La fin de la mission intervient lorsque le camion à ordures est plein. Un exemple de mission générée est présenté en Figure 1.23 avec le profil de vitesse en a) et l'évolution du poids du camion en b). Ces cycles générés permettent de dimensionner la pile à combustible et la capacité de la batterie du camion à ordures hybride.

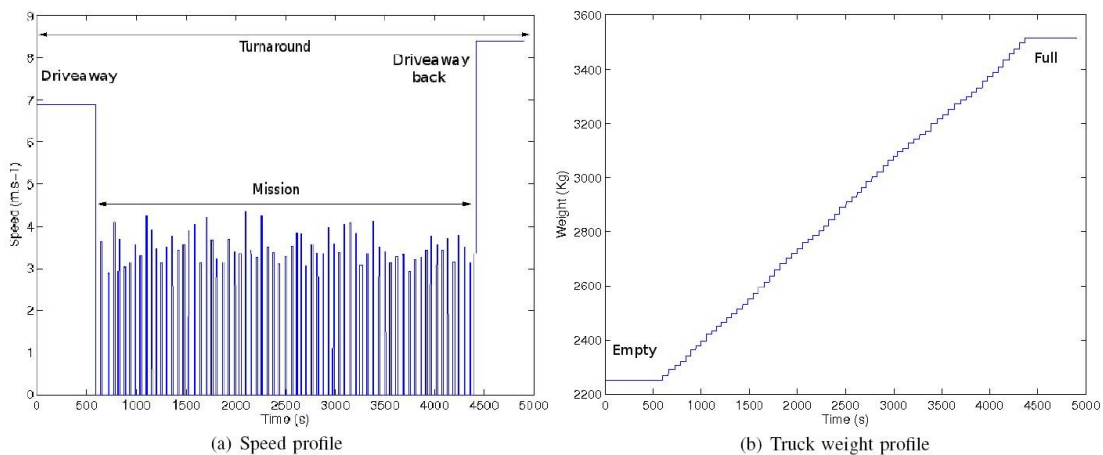


Figure 1.23 Exemple de mission d'un camion à ordures générée aléatoirement (Ravey, et al., 2010)

Une autre étude (Schwarzer, et al., 2010) reprend cette idée de modélisation des caractéristiques principales des cycles de conduite de véhicules particuliers par une distribution statistique. Les paramètres choisis sont la durée du cycle, l'accélération et la décélération en milieu urbain, l'accélération et la décélération sur autoroute, la durée et la vitesse de croisière en ville, la durée et la vitesse de croisière sur autoroute et la durée d'un arrêt. De même que (Ravey, et al., 2010), chacun de ces dix paramètres est modélisé de manière indépendante par sa densité de probabilité.

L'outil de simulation est ensuite capable de générer une infinité de cycles. La première étape de simulation est de tirer aléatoirement la durée du cycle de conduite. L'ordre et la durée des phases urbaines et autoroutières sont ensuite déterminés. Dans une seconde étape, un tirage aléatoire est effectué sur les autres variables afin de générer les sous-phases qui, mises bout à bout, forment le cycle de conduite. Enfin, un bruit est ajouté au profil de vitesse sur les phases de croisière.

Dans cette étude, le cycle standard UDDS pour véhicule léger, illustré en Figure 1.14, a été choisi pour être modélisé par cet outil de simulation. Trois exemples de cycle de conduite générés aléatoirement sont donnés en Figure 1.24. Ces cycles ont permis d'optimiser la stratégie de gestion de l'énergie d'un véhicule hybride.

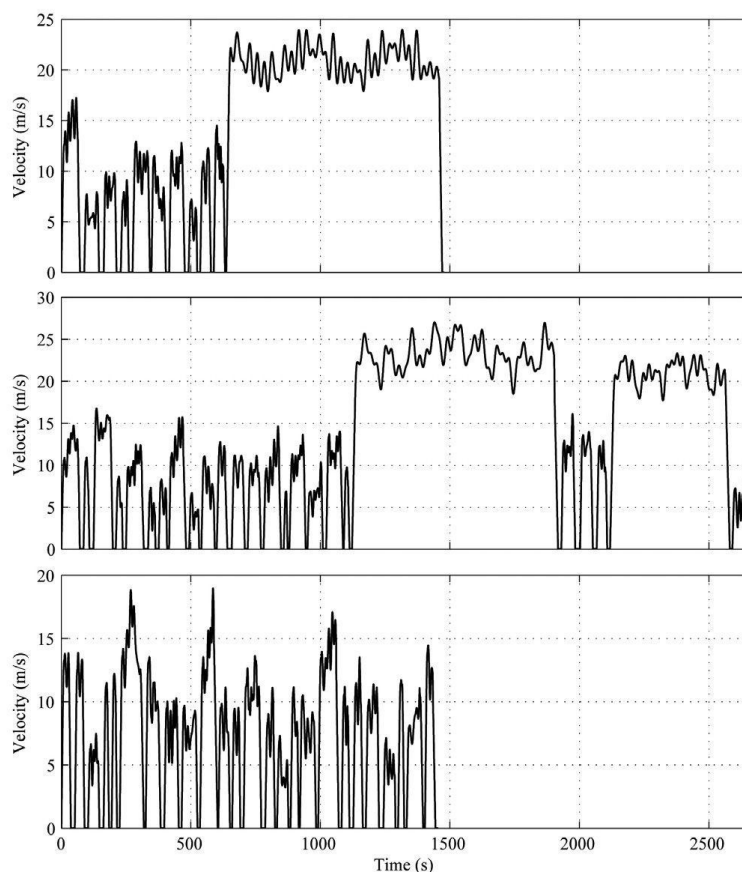


Figure 1.24 Trois exemples de cycle générés aléatoirement à partir du cycle UDDS (Schwarzer, et al., 2010)

1.3.2.3.2 Cycles aléatoires générés grâce à une matrice de Markov

L'idée de plusieurs auteurs a été de générer des cycles stochastiques en se basant sur la matrice de Markov afin de simuler un grand nombre de trajets ayant les mêmes caractéristiques qu'un cycle prédéterminé. L'outil est le même que celui utilisé dans le paragraphe 1.3.2.2.7 pour simuler un trajet spécifique avec une topologie de route donnée. Dans ce paragraphe, cet outil est mis en œuvre d'une autre manière afin de simuler différentes possibilités de parcours.

L'article (Kolmanovsky, et al., 2002) décrit une approche alternative pour optimiser la stratégie de commande en puissance d'une propulsion de véhicule. L'optimisation est effectuée sur une famille de cycles de conduite générés de manière aléatoire à partir de la matrice de Markov. Une programmation dynamique stochastique est appliquée pour obtenir une gestion de l'énergie optimisée par rapport à ces cycles générés.

L'idée est de modéliser un cycle de conduite prédéfini (Figure 1.25), par une matrice de Markov et d'effectuer des tirages aléatoires sur ce modèle pour obtenir des cycles de conduite aléatoires, mais conservant les caractéristiques probabilistes des cycles de conduite standardisés. Une certaine réserve peut être émise sur la pertinence de la représentativité des cycles simulés, dont trois exemples sont illustrés en Figure 1.26, par rapport au cycle standard.

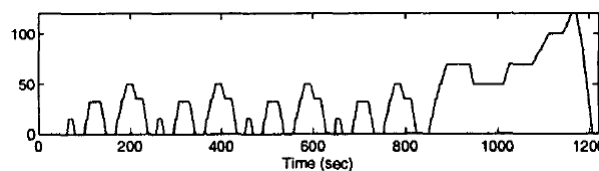


Figure 1.25 Cycle de conduite NEDC (Kolmanovsky, et al., 2002)

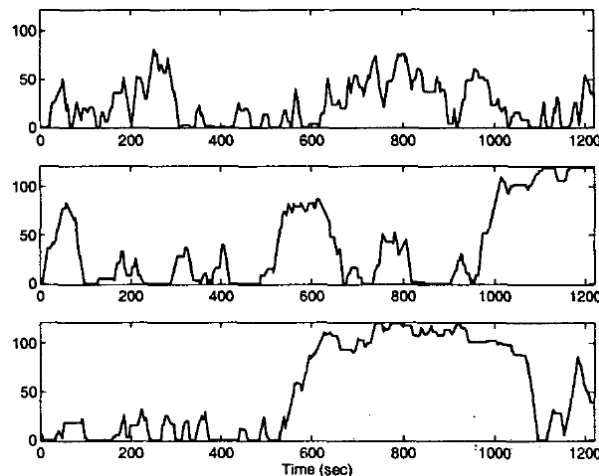


Figure 1.26 Exemples de cycles de conduite générés aléatoirement (Kolmanovsky, et al., 2002)

En effet, un cycle de conduite standard ne fournit pas assez de transitions pour être représentatif. Afin d'améliorer ce point, plusieurs cycles de référence différents peuvent être concaténés ensemble. Dans cette idée, (Lin, et al., 2004) aborde également le problème de la gestion de l'énergie par une approche stochastique pour un poids lourd hybride. La consigne de puissance du conducteur ainsi que la vitesse au niveau des roues sont modélisées par une matrice de Markov pour représenter le caractère aléatoire de la demande en puissance du conducteur sous diverses conditions de conduite. Les quatre cycles de référence choisis pour construire le modèle étaient des cycles spécifiques aux poids lourds : l'UDDS HDV, le WVU INTER, le WVU SUB et le WVU CITY. A partir de la matrice de Markov construite sur les profils {vitesse aux roues ; puissance demandée} des cycles de conduite, des profils reprenant les caractéristiques des standards sont générés aléatoirement. Un exemple de cycle généré est donné en Figure 1.27. Au contraire d'une optimisation déterministe sur un cycle de conduite donné, l'approche

stochastique permet d'optimiser la stratégie de gestion de l'énergie sur un ensemble de cycles de conduite différents.

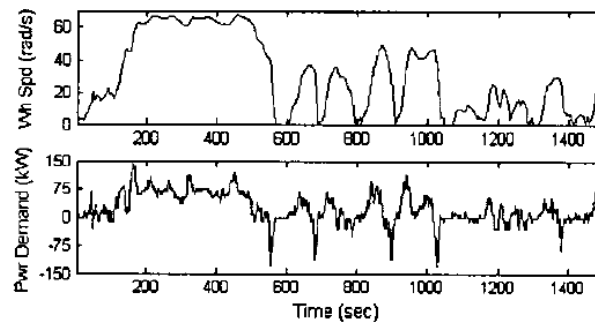


Figure 1.27 Exemple d'un cycle {vitesse aux roues ; puissance demandée} généré aléatoirement (Lin, et al., 2004)

1.3.2.4 Synthèse des différentes modélisations

En conclusion de cette revue non exhaustive des différents standards rencontrés dans la littérature, leurs différents objectifs peuvent être rappelés :

- disposer d'une référence pour mesurer ou estimer la consommation énergétique du véhicule et donc son autonomie,
- reproduire les conditions moyennes de roulage du véhicule sous la forme d'un cycle relativement court en durée et en distance,
- permettre l'évaluation de l'impact de différentes caractéristiques du véhicule ou du mode de conduite sur la consommation d'énergie.

D'une part, il semble important de garder à l'esprit que la simulation de l'usage d'un véhicule est fonction du triplet { véhicule ; route ; conducteur }. D'autre part, la durée d'un cycle reste très variable entre des ordres de grandeur de quelques minutes et d'une heure.

Plusieurs remarques peuvent être objectées à l'utilisation de cycles de référence dans le cadre de la conception et de l'optimisation d'un véhicule comme le soulignait déjà l'étude (Rahman, et al., 1999) et plus récemment (Crolla, et al., 2008) :

- le caractère non réaliste du profil de vitesse dans certains cycles de référence,
- un manque de richesse des cycles standards en général,
- la non prise en compte de l'inclinaison de la route,
- la non dépendance des paramètres dans le cas des cycles générés de manière stochastique.

Ainsi, l'étude d'un véhicule requiert idéalement une « infinité » de cycles de conduite, basés sur des mesures en conditions réelles et incluant l'inclinaison de la route. En effet, comme le montre l'analyse de sensibilité présentée en Annexe A et issue de (Souffran, et al., 2012), la puissance demandée aux roues est fortement impactée par la pente de la voie, même pour des valeurs faibles de celle-ci. Notre laboratoire n'ayant pas cette base de données conséquente en sa possession, un modèle de l'usage d'un véhicule reprenant les quatre caractéristiques citées précédemment devra être mis en place afin de simuler des profils, divers mais cohérents, d'utilisation d'un véhicule.

1.3.3 MODELISATION D'UNE CHAÎNE DE TRACTION

1.3.3.1 Approche forward ou backward

Deux types d'approches existent pour modéliser la chaîne de traction d'un véhicule hybride :

- ◆ **Modélisation forward** : Cette approche utilise un modèle conducteur (généralement un simple correcteur PI) qui va tenter de suivre au mieux le cycle de conduite désiré. Cette approche est appropriée à la simulation détaillée de la commande des véhicules hybrides puisqu'elle s'approche le plus de la réalité (Lhomme, 2007). En effet, l'analyse de la chaîne de traction part du conducteur pour simuler le fonctionnement des composants du véhicule. Ces composants peuvent être testés et analysés de manière plus fine avec des modèles dynamiques. L'inconvénient principal de ce concept est le temps de simulation élevé. Les bibliothèques de composants VEHLIB, développée par l'INRETS (Trigui, et al., 2004), et PSAT (Power System Analysis Toolkit), développée par Argonne National Laboratory, utilisent cette démarche.
- ◆ **Modélisation backward** : A l'inverse, aucun modèle conducteur n'est défini dans cette approche. C'est le cycle de conduite en lui-même qui permet de déterminer la puissance requise au niveau des roues du véhicule ce qui permet d'en déduire comment chaque composant doit être utilisé. Cette approche « remonte » la chaîne de traction d'où l'appellation « backward ». Cette modélisation permet d'utiliser des cartographies pour les composants du système ce qui allège considérablement le temps de simulation par rapport à la modélisation forward. Cependant, les effets dynamiques des composants sont négligés. La bibliothèque de composants Advisor développée par le National Renewable Energy Laboratory utilise cette démarche (Wipke, et al., 1999).

La modélisation backward est généralement utilisée pour définir une tendance alors que la modélisation forward permet de sélectionner la configuration et les technologies pour la chaîne de traction ainsi que de développer la stratégie de gestion de l'énergie qui sera réellement implémentée dans le véhicule (Autonomie, 2011).

1.3.3.2 Méthodes de modélisation

Dans les travaux de (Lhomme, 2007), trois principaux formalismes ont été identifiés pour la modélisation de véhicules hybrides :

- ◆ **Bond Graph** : Le Bond Graph ou « graphe de liaisons » a été créé par le MIT de Boston aux Etats-Unis dans les années 1955. Le Bond Graph est aujourd'hui utilisé par de nombreuses entreprises comme Alstom, PSA, Renault, etc. Ce formalisme permet de représenter graphiquement les transferts énergétiques entre les composants d'un système physique. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir représenter un système multi physique, c'est-à-dire que les composants de natures différentes (mécanique, électrique, hydraulique, etc.) peuvent être représentés selon un formalisme commun. Le comportement d'un organe est caractérisé par deux variables généralisées : l'effort et le flux. La puissance instantanée échangée entre éléments est exprimée par le produit de ces deux variables. Le Bond Graph est une représentation à priorité structurelle (Gawthrop, et al., 2007).

- ◆ **Graphe Informationnel Causal** : Le Graphe Informationnel Causal (GIC) a été développé dans les années 1990 par deux laboratoires français : le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle (LEEI) de Toulouse et le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille. Le GIC vise à connecter des éléments d'un système dont on possède la connaissance fonctionnelle. Les relations entre variables sur le graphe n'étant pas affichées, cela permet d'avoir une vision d'ensemble du système plus synthétique.
- ◆ **Représentation énergétique macroscopique** : La Représentation Energétique Macroscopique (REM) a été développée par le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille en France dans les années 2000. Ce formalisme est basé sur deux outils de modélisation : le Graphe Informationnel Causal précédemment décrit et les Systèmes Multimachines Multiconvertisseurs (SMM). La REM est une extension macroscopique du GIC plus lisible avec une symbolisation explicite des couplages énergétiques grâce aux caractéristiques du SMM (Allegre, 2010).

Ces outils de modélisation sont adaptés à la simulation d'un système prédéfini car ils s'appuient sur une modélisation détaillée de chaque organe de la chaîne de traction. Cependant, dans le cadre de la conception d'un véhicule électrique hybride, plusieurs inconvénients peuvent être soulevés :

- le panel de solutions explorées est limité en raison de choix prématurés sur la tension du réseau de bord, sur le type de moteur thermique, sur le couple maximum de la machine électrique, etc. ;
- le temps de calcul est important en raison de la simulation fine du comportement de chaque élément.

Pour ces raisons, une modélisation adimensionnelle par flux de puissance a été développée par (Dupriez-Robin, 2010) :

- ◆ **Modélisation par flux de puissance** : La modélisation par flux de puissance est fondée théoriquement sur le Bond Graph. Cependant, au lieu de caractériser le comportement d'un organe par le couple effort - flux, seule la puissance, produit des deux variables précédentes, est considérée. Chaque organe est alors caractérisé par son rendement en fonction de la puissance réduite en sortie du composant. Cette modélisation de type statique est déduite de cartographies PSAT représentant typiquement le duo couple – vitesse pour un organe mécanique et le couple tension – intensité pour les composants électriques.

1.3.3.3 Choix de la modélisation

L'objectif de cette étude étant de proposer une méthodologie dans le contexte du dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule hybride, sans choix a priori des éléments constitutants, il nous est apparu souhaitable de réduire raisonnablement l'espace de décision à parcourir par l'algorithme d'optimisation. Nous proposons donc d'utiliser la modélisation par flux de puissance afin de modéliser la chaîne de traction par une approche backward. Nous détaillerons cette modélisation et l'approche pour obtenir les modèles de chaque organe de la chaîne de traction dans le Chapitre 3.

1.3.4 STRATEGIES DE GESTION DE L'ENERGIE

Dans le cas d'un véhicule conventionnel, la puissance nécessaire à son mouvement n'est fournie que par le moteur thermique. Celui-ci est commandé directement par la pédale d'accélération, qui sera enfoncée ou relâchée par le conducteur de manière intuitive pour réguler la vitesse du véhicule.

Dans le cas d'un véhicule électrique hybride, le problème est plus complexe. La chaîne de traction est en effet composée de deux sources d'énergie : le réservoir de carburant et la batterie. Une loi de gestion de l'énergie doit donc être introduite afin de répartir la puissance demandée, via la pédale d'accélération, entre ces deux sources.

La qualité de la stratégie de gestion choisie détermine l'efficacité du véhicule hybride. En effet, une mauvaise gestion de l'énergie pourrait conduire à une surconsommation du véhicule hybride par rapport à un véhicule conventionnel. La recherche de la meilleure stratégie de gestion de l'énergie en termes de ressources nécessaires, d'optimisation et de facilité d'implantation a conduit au développement de nombreuses méthodes. Une première manière de classifier les différentes stratégies est de considérer la gestion de la batterie (Scordia, 2004) :

- ♦ **Etat de charge libre (depleting)** : l'état de charge de la batterie est laissé libre lors de la mission du véhicule tout en restant dans les limites préconisées par le constructeur. Ce mode de fonctionnement nécessite la recharge de la batterie à un moment ou à un autre grâce au réseau électrique ou au moteur thermique fonctionnant en groupe électrogène.
- ♦ **Etat de charge contrôlé (sustaining)** : l'état de charge de la batterie est contrôlé de manière à ce qu'il revienne à sa valeur initiale en fin de mission. Ainsi, il n'est pas nécessaire de faire appel au réseau électrique pour recharger la batterie. Cependant, ce mode de gestion n'est possible que si la mission du véhicule est connue à l'avance et que la loi de gestion hors-ligne a fait l'objet d'une optimisation globale.

Une seconde manière de classifier les différentes approches a été proposée par (Salmasi, 2007) et est présentée en Figure 1.28 (Hankache, 2008). Deux principales catégories sont observées à savoir les stratégies hors ligne ou en ligne.

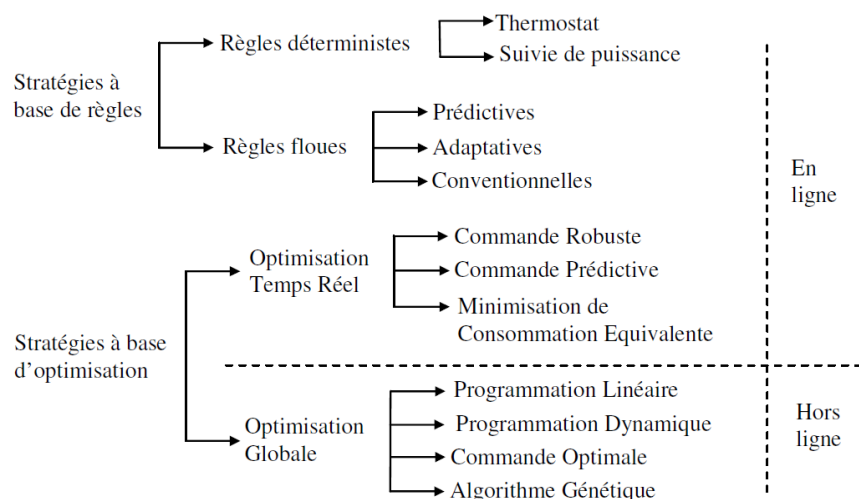


Figure 1.28 Classification des diverses stratégies de gestion de l'énergie dans un véhicule hybride (Hankache, 2008)

1.3.4.1 Lois de gestion hors ligne

Une stratégie de gestion de l'énergie est dite hors ligne lorsque la mission du véhicule est connue au préalable et que la meilleure loi de distribution de l'énergie entre les deux sources d'un véhicule électrique hybride, sur ce parcours particulier, peut ainsi être recherchée. Il existe deux principales méthodes :

- ♦ **Programmation dynamique** : Elle est basée sur le principe de Bellman et permet de résoudre un problème pour lequel une décision doit être prise à chaque étape. A chaque instant de la mission du véhicule, les décisions possibles sont évaluées par la somme du coût présent et du coût futur attendu. Celui-ci étant supposé connu, la résolution de la programmation dynamique consiste en une récurrence inverse dans le temps (Scordia, 2004).

Cette méthode nécessite une discrétisation de l'espace temporel et de l'état d'énergie. Plus le pas de discrétisation est petit, plus la solution est proche de l'optimum mais plus le temps de calcul est important. Un compromis doit donc être fait entre la précision et le temps de simulation (Dupriez-Robin, 2010).

- ♦ **Commande optimale** : Elle est basée sur le principe de Pontriaguine et minimise l'Hamiltonien du système. Celui-ci est fonction de la trajectoire de commande optimale, de la trajectoire d'état optimale et de la trajectoire de co-état optimale. L'avantage de cette méthode est un temps de calcul réduit par rapport à la programmation dynamique (Delprat, 2002). Cependant, la condition de l'optimum global est moins garantie avec la commande optimale. De plus, une difficulté de cette méthode est l'implantation de contraintes (Hankache, 2008).

1.3.4.2 Lois de gestion en ligne

Une stratégie de gestion de l'énergie est dite en ligne lorsque le trajet parcouru par le véhicule est inconnu a priori. La stratégie de gestion de l'énergie doit donc répondre en temps réel à la demande instantanée de puissance sans connaissance préalable du futur besoin en énergie. Une solution optimale étant quasiment impossible dans ce cas, l'enjeu est de trouver la stratégie qui s'en approchera le plus.

1.3.4.2.1 Stratégies à base de règles

- ♦ **Règles déterministes** : Les règles déterministes sont très utilisées de part leur simplicité et leur facilité d'implémentation. Dans cette catégorie, la méthode « Thermostat » peut être citée à titre d'exemple : l'état de charge de l'élément de stockage est maintenu entre des bornes supérieure et inférieure prédéfinies. Cependant, cette stratégie ne peut pas toujours satisfaire la demande en puissance du véhicule et aucune notion de minimisation de la consommation de carburant n'est prise en compte.

D'autres lois empiriques reposent sur un découpage du plan vitesse-couple du moteur thermique afin de faire fonctionner chaque source d'énergie à son rendement optimal. Ces

lois peuvent être obtenues après étude des résultats d'optimisation comme décrit dans les travaux (Wu, et al., 2002) et (Lin, et al., 2003).

Ces stratégies étant par définition à état de charge libre, une pénalisation de la déviation de l'état de charge entre le début et la fin de la mission doit être mise en place.

- ♦ **Règles floues** : Ces règles présentent l'avantage d'utiliser des règles linguistiques simples permettant de traduire facilement le savoir faire d'un expert pour répondre à une problématique spécifique. La notion de logique floue permet d'associer à chacune des variables identifiées des coefficients d'appartenance à des sous-ensembles flous prenant valeur dans l'intervalle $[0 ; 1]$, quantifiant ainsi l'incertitude sur la variable. Mis en œuvre par (Hankache, 2008), le système de décision à base de règles floues permet d'identifier la puissance instantanée à fournir par une pile à combustible pour un état de charge donné des super-capacités et une puissance de traction demandée.

1.3.4.2.2 Stratégies à base d'optimisation

- ♦ **Minimisation de consommation équivalente** : Cette stratégie de gestion de l'énergie est basée sur la théorie de la commande optimale. Dans cette méthode, la batterie est considérée comme un réservoir de carburant auxiliaire et on cherche à minimiser l'énergie totale prélevée dans les deux réservoirs. Présentée dans (Paganelli, et al., 2002), cette stratégie a été mise en œuvre par de nombreux auteurs, notamment (Rousseau, 2008) qui souligne la difficulté du paramétrage de cette méthode.
- ♦ **Réseaux de neurones** : Une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les réseaux de neurones permet de commander le moteur thermique et le moteur électrique en fonction de plusieurs paramètres comme la puissance demandée aux roues, le régime du moteur thermique, l'état de charge de la batterie, etc. C'est une solution attrayante de part la légèreté de sa structure (suite d'additions et de multiplications) pour un système embarqué, mais cette méthode est coûteuse en termes de temps de calcul car elle nécessite une phase d'entraînement au préalable. Ainsi (Scordia, 2004) entraîne le réseau de neurones sur une loi hors ligne optimale déterminée grâce à la programmation dynamique.

1.3.4.3 Synthèse des diverses stratégies

L'optimisation globale, donnant lieu à une gestion de l'énergie hors ligne, permet de déterminer la stratégie de gestion de l'énergie optimale sur un profil de puissance donné. Cependant, elle exige une connaissance au préalable de la mission du véhicule, ce qui n'est pas réellement possible. De plus, les temps de calcul sont très importants.

L'objectif de notre étude étant de développer une méthode de pré-dimensionnement s'appuyant sur la considération d'une grande variété de cycles de conduite du véhicule, une gestion de l'énergie réaliste et légère en termes de ressources informatiques est requise. Nous avons donc opté pour une stratégie de gestion de l'énergie à base de règles déterministes que nous décrirons dans le Chapitre 3.

1.3.5 DIMENSIONNEMENT D'UN VEHICULE

1.3.5.1 Dimensionnement selon les performances

Quel que soit le type de véhicule à concevoir, un cahier des charges spécifiant les contraintes en performance est souvent établi. Dans une étude visant à comparer les différentes architectures de véhicules hybrides plug-in, (Freyermuth, et al., 2008) puis (Karbowski, et al., 2009) définissent les performances standards que doit assurer le véhicule afin d'effectuer son dimensionnement :

- assurer le cycle UDDS en mode tout-électrique,
- assurer un état de charge supérieur à 30% après 10 miles en mode tout-électrique sur le cycle UDDS,
- accélérer de 0 à 60 mph (96,6 km/h) en moins de 9,3 s
- franchir une pente de 6% à 65 mph (104,6 km/h) avec un chargement supplémentaire de 500 kg
- atteindre une vitesse maximum supérieure à 110 mph (177 km/h)

Dans ces conditions, la puissance de la batterie est dimensionnée de manière à assurer le cycle de conduite UDDS en mode tout-électrique et à récupérer toute l'énergie cinétique. De son côté, le moteur thermique est dimensionné pour assurer le franchissement de la pente de 6% à 65 mph. Enfin, la capacité de la batterie est dimensionnée de manière à propulser le véhicule en mode tout-électrique sur 10 miles suivant le cycle de conduite UDDS.

De même, l'Université du Texas A&M a développé un logiciel de simulation V-ELPH pour faciliter la conception et l'analyse des véhicules électrique et hybride. L'article (Rahman, et al., 1999) présente la démarche de dimensionnement d'un véhicule hybride parallèle en se basant sur des contraintes en performance. Ainsi, le moteur thermique est dimensionné de manière à assurer une vitesse de 140 km/h en mode tout-thermique et la puissance du moteur électrique est calculée pour maintenir une vitesse de 160 km/h en mode tout-électrique. La batterie, quant à elle, est dimensionnée de manière à assurer une accélération de 0 à 100 km/h en 13 s tout en minimisant son poids.

Cette méthode permet de dimensionner les organes de puissance de manière rapide et simple. Cependant, le choix a priori des contraintes en performance donne lieu à un dimensionnement limite qui ne présente en aucun cas un caractère optimal par rapport à l'utilisation du véhicule en conditions réelles. De plus, un dimensionnement limite implique une masse de composants non optimisée qui affecte les performances du véhicule.

Deux démarches de dimensionnement sont alors possibles :

- Partir d'un véhicule conventionnel déjà existant et modifier sa chaîne de traction en ajoutant un moteur électrique. Le moteur thermique pourra alors faire l'objet d'une diminution de sa cylindrée que l'on appelle « downsizing » ou être conservé à sa taille d'origine pour être utilisé avec ou sans bridage.
- Optimiser le dimensionnement du véhicule hybride de manière systémique sans a priori.

1.3.5.2 Dimensionnement par downsizing

La démarche de « downsizing » est souvent choisie car elle permet d'utiliser des caractérisations de composants existants (Scordia, 2004). En effet, un constructeur automobile choisit généralement un moteur thermique déjà éprouvé et fiable. L'un des problèmes majeurs posés par les véhicules électriques hybrides est donc le dimensionnement de la batterie (Chan, 2007). L'enjeu de la conception dans ce cas est d'optimiser la batterie ou les autres composants de stockage.

Dans l'étude (Dubray, 2002) concernant un bus hybride série, la base de dimensionnement choisie est un moteur thermique sous-dimensionné par rapport au véhicule conventionnel. Une batterie a été ajoutée afin d'obtenir la puissance maximale du bus ainsi qu'une autonomie de quelques kilomètres en mode tout électrique.

Cependant, ce choix assez arbitraire du moteur thermique peut poser question. En effet, il est reconnu qu'un véhicule électrique est approprié à un usage urbain et qu'un véhicule thermique est adapté à un parcours autoroutier. Il apparaît que le taux d'hybridation du véhicule serait fonction de son usage et il semble donc intéressant de considérer le couple {batterie ; moteur thermique} pour une étude de dimensionnement.

La plupart des concepteurs dimensionnent donc les véhicules de manière manuelle et analytique alors qu'une conception systémique est requise pour un problème aussi complexe (Wu, et al., 2011).

1.3.5.3 Dimensionnement systémique

Dans le cadre du dimensionnement systémique, plusieurs techniques d'optimisation ont été explorées.

- ♦ **Plan d'expériences** : les auteurs (Assanis, et al., 1999) ont choisi plusieurs dimensionnements de moteur thermique, moteur électrique et batterie sur le principe du plan d'expériences et les ont comparés sur le critère de la consommation de carburant. Parmi les consommations minimales locales obtenues par ces dimensionnements, le minimum est considérée global et le dimensionnement correspondant est retenu. L'évaluation de la consommation de carburant est effectuée sur les cycles SAE J1711 FUDS (urbain) et FHDS (extra-urbain). Le plan d'expériences a été utilisé plus récemment par (Bernard, et al., 2009) pour dimensionner un véhicule à pile à combustible.
- ♦ **Algorithme génétique** : l'étude (Zhengli, et al., 2005) utilise un algorithme génétique pour choisir les différents dimensionnements possibles compte tenu de l'architecture, de la stratégie de gestion de l'énergie et du cycle de conduite choisis. La fonction objectif évalue les émissions de polluants et la consommation de carburant. Cependant, cet algorithme d'optimisation nécessite le paramétrage des coefficients de sélection, croisement et mutation, ce qui peut s'avérer délicat.

- ♦ **Algorithme chaotique** : dans l'article (Wu, et al., 2011), les auteurs cherchent à dimensionner les composants d'un véhicule hybride plug-in selon un algorithme d'optimisation à base de chaos en minimisant le coût de la chaîne de traction et en imposant des contraintes en performance. Le cycle de conduite utilisé pour cette étude est le standard UDDS.

Le point commun à ces études est l'utilisation d'un ou de quelques cycles standards pour la conception d'un véhicule hybride. La représentativité de ces cycles ayant été discutée dans la section précédente, peu d'études cependant considèrent le dimensionnement en fonction de la mission du véhicule, mis à part pour des véhicules spécifiques comme un camion à ordures (Ravey, et al., 2010) ou un train (Akli, 2008). A noter pourtant l'étude (Rahman, et al., 1999) dans laquelle les sources d'énergie sont dimensionnées de manière analytique sur les cycles standards de cinq continents différents pour conclure que ces profils de référence ne sont pas assez réalistes et que l'inclinaison de la route doit être prise en compte dans la conception d'un véhicule.

1.3.5.4 Synthèse des méthodes de dimensionnement

Comme le souligne (Wu, et al., 2011), un dimensionnement systémique est nécessaire au vu de la complexité du problème de conception d'un véhicule électrique hybride. D'autre part, l'étude du dimensionnement vis-à-vis d'un grand nombre de cycles de conduite requiert une optimisation légère en termes de temps de calcul. Le plan d'expériences a donc été choisi pour mener à bien la conception d'un véhicule en fonction de son usage.

Notre étude sera donc placée dans le cas d'un dimensionnement en fonction :

- d'un cycle de conduite réaliste sans s'imposer de contrainte limite supplémentaire en performance,
- d'une multitude de cycles plutôt que d'un cycle spécifique,
- de cycles prenant en compte l'inclinaison de la route,
- d'une optimisation systémique sans a priori sur les composants.

1.4 CONCLUSION

Comme le souligne (Guzzella, et al., 2005), la conception d'un véhicule électrique hybride repose sur au moins trois choix : le choix de l'architecture, le choix du dimensionnement et le choix de la stratégie de gestion de l'énergie. Ces trois problématiques ne sont bien sûr pas indépendantes et les méthodologies d'optimisation systématiques les considérant toutes restent rares. Parmi celles-ci, l'étude (Scordia, 2004) utilise des cycles de conduite standards pour évaluer la consommation de carburant du véhicule.

Cet autre paramètre qu'est le cycle de conduite est moins souvent pris en compte. (Wu, et al., 2011) montrent pourtant la sensibilité de l'optimisation du dimensionnement à « l'agressivité » du cycle de conduite choisi pour mener l'étude.

Dans ce mémoire, nous proposons une méthode de conception « haut niveau » prenant en compte trois des quatre paramètres du problème :

- l'usage du véhicule en termes de mission de conduite,
- le dimensionnement des composants de la chaîne de traction,
- l'architecture du véhicule électrique hybride.

Le quatrième paramètre du problème, à savoir la stratégie de gestion de l'énergie, se doit d'être adaptée à la structure du véhicule et au dimensionnement de la chaîne de traction.

L'originalité de la démarche proposée réside dans le fait de considérer une famille de missions réalistes d'un véhicule afin d'évaluer le potentiel d'une architecture et d'effectuer le dimensionnement approprié. Cette démarche permet d'enlever le caractère arbitraire des choix d'architecture, de dimensionnement et de mission sur lesquelles le véhicule est évalué.

Dans ce chapitre, nous avons posé les problématiques de la conception d'un véhicule électrique hybride. La problématique de la modélisation de l'usage d'un véhicule sera abordée dans le Chapitre 2. Le modèle de la chaîne de traction, composée d'un moteur thermique, d'une batterie et d'une ou deux machines électriques, ainsi que la stratégie de gestion de l'énergie seront définis pour chacune des structures série et parallèle dans le Chapitre 3. Enfin, le Chapitre 4 proposera une méthode de dimensionnement des composants d'un véhicule hybride.

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA MISSION D'UN VEHICULE

Chapitre 2	Modélisation de la mission d'un véhicule	45
2.1	Introduction.....	47
2.2	Acquisition d'informations	48
2.2.1	<i>Le Géo-Positionnement par Satellite (GPS).....</i>	<i>48</i>
2.2.2	<i>Indicateurs de caractérisation des missions.....</i>	<i>48</i>
2.2.2.1	Calcul du profil de puissance	48
2.2.2.2	Potentiel d'hybridation de puissance	49
2.2.2.3	Potentiel d'hybridation énergétique.....	50
2.2.3	<i>Mission urbaine mesurée</i>	<i>51</i>
2.2.4	<i>Mission extra-urbaine mesurée.....</i>	<i>53</i>
2.2.5	<i>Comparaison des missions mesurées aux cycles de conduite standards.....</i>	<i>55</i>
2.3	Outils de Modélisation d'un processus temporel	59
2.3.1	<i>Les méthodes d'intelligence artificielle</i>	<i>59</i>
2.3.1.1	Réseau de neurones artificiels	59
2.3.1.2	Logique floue.....	60
2.3.2	<i>Les méthodes statistiques</i>	<i>60</i>
2.3.2.1	Séries temporelles et modèles de la famille ARMA	60
2.3.2.2	Modélisation stochastique	63
2.3.2.3	Modélisation d'une chaîne de Markov	64
2.3.3	<i>Comparaison des méthodes et choix du modèle</i>	<i>65</i>
2.4	Modélisation matricielle de Markov	66
2.4.1	<i>Propriété de Markov</i>	<i>66</i>
2.4.2	<i>Définition des matrices de transition</i>	<i>66</i>
2.4.2.1	Matrice de nombres de transitions.....	66
2.4.2.2	Matrice de Markov	66
2.4.3	<i>Exemple d'estimation des matrices de transition</i>	<i>67</i>
2.4.3.1	Matrice de nombres de transitions.....	68
2.4.3.2	Matrice de Markov	68
2.5	Modélisation du profil de puissance.....	69
2.5.1	<i>Application aux profils de puissance mesurés.....</i>	<i>69</i>
2.5.2	<i>Simulations et analyses du modèle.....</i>	<i>71</i>
2.5.2.1	Algorithme de simulation	71
2.5.2.2	Simulation de missions urbaines.....	72
2.5.2.3	Simulation de missions extra-urbaines	75
2.5.3	<i>Conclusion sur la modélisation du profil de puissance</i>	<i>77</i>
2.6	Modélisation de la mission du véhicule.....	78
2.6.1	<i>Choix du nombre d'états de la modélisation.....</i>	<i>78</i>
2.6.2	<i>Application aux missions mesurées</i>	<i>79</i>
2.6.3	<i>Simulations et analyses du modèle.....</i>	<i>81</i>
2.6.3.1	Algorithme de simulation	81
2.6.3.2	Simulation de missions urbaines.....	81
2.6.3.3	Simulation de missions extra-urbaines	84
2.6.4	<i>Synthèse de la modélisation de la mission d'un véhicule</i>	<i>86</i>
2.7	Conclusion	88

2.1 INTRODUCTION

Notre objectif est d'optimiser le dimensionnement des composants d'un véhicule électrique hybride en tenant compte de la consommation probable de puissance, c'est-à-dire en intégrant les comportements du véhicule les plus réalistes avec toute leur diversité. C'est pourquoi la plupart des cycles de conduite de référence vus au chapitre précédent ne conviennent pas à notre application.

En effet, l'étude d'un véhicule requiert idéalement une « infinité » de cycles de conduite, basés sur des mesures en conditions réelles et incluant l'inclinaison de la route. Notre laboratoire n'ayant pas cette base de données conséquente en sa possession, un modèle de l'usage d'un véhicule reprenant les trois caractéristiques citées précédemment devra être mis en place afin de simuler des profils divers mais cohérents d'utilisation d'un véhicule.

La démarche adoptée dans ce chapitre est la suivante :

- acquisition d'informations concernant le véhicule et son usage réel,
- modélisation de l'usage du véhicule via son profil de puissance demandée aux roues,
- simulation de profils de puissance stochastiques représentant l'usage réel du véhicule.

2.2 ACQUISITION D'INFORMATIONS

2.2.1 LE GEO-POSITIONNEMENT PAR SATELLITE (GPS)

Afin d'acquérir des informations sur l'usage d'un véhicule, le système de positionnement mondial ou Géo-Positionnement par Satellite (GPS) semble intéressant. Cette technologie utilise une constellation d'au moins 24 satellites qui émettent les signaux micro-ondes. Le système permet à un récepteur GPS de déterminer sa position (latitude, longitude, altitude) à un instant donné. A partir de ces informations, il est possible de déterminer la vitesse et l'accélération du récepteur GPS ainsi que l'inclinaison de la voie sur laquelle il évolue. Le principal avantage de ce système est qu'il ne demande aucune modification ou installation particulière à bord du véhicule. Seule la fréquence d'acquisition du GPS doit être suffisante pour suivre correctement les évolutions du véhicule lors de son déplacement.

Pour cette étude, un GPS Garmin eTrex HC dont la fréquence d'acquisition des données est de 1 Hz a été utilisé afin d'effectuer différentes campagnes de mesures. Selon le constructeur, la précision de mesure sur la position du véhicule est de 10 m (cf. Annexe C). La précision de l'altimètre est quant à elle de ± 3 m après étalonnage. A partir du relevé de la vitesse du véhicule à chaque seconde, le profil d'accélération en est déduit. De même, le profil d'altitude mesuré permet de calculer le profil d'inclinaison de la route (cf. Annexe D).

2.2.2 INDICATEURS DE CARACTERISATION DES MISSIONS

Deux coefficients introduits par (Akli, 2008) ont été considérés afin d'évaluer et comparer les missions entre elles. Ce jeu d'indicateurs vient en complément des puissances maximum et moyenne couramment utilisées pour le dimensionnement d'une chaîne de traction.

2.2.2.1 Calcul du profil de puissance

A partir des profils en vitesse, accélération et inclinaison de la route ainsi mesurés, l'équation mécanique du véhicule (1.1) introduite au Chapitre 1 permet de calculer la puissance demandée au niveau des roues du véhicule. Les coefficients du modèle mécanique du véhicule de référence utilisé pour cette étude ont été identifiés et sont présentés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Caractéristiques du véhicule

Paramètre	Valeur
Surface frontale A_f	2,7 m ²
Coefficient de frottement aérodynamique C_w	0,25
Coefficient de résistance des roues au roulement C_r	0,018
Masse du châssis du véhicule $m_{\text{châssis}}$	1400 kg

La convention de signe utilisée pour les profils de puissance dans tout ce mémoire est la suivante (convention générateur) :

$$\begin{cases} p(t) \geq 0 & \text{consommation d'énergie ou décharge de l'élément de stockage} \\ p(t) < 0 & \text{récupération d'énergie ou charge de l'élément de stockage} \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.2.2 Potentiel d'hybridation de puissance

Le premier indicateur, le potentiel d'hybridation de puissance (*PHP*), traduit la réduction potentielle de la taille du générateur d'énergie primaire que permettrait une hybridation par stockage. Généralement, l'hybridation par stockage vise à diminuer la taille du générateur primaire afin de réduire la consommation, la pollution, le coût et l'encombrement. Le potentiel d'hybridation de puissance est formulé de la façon suivante où $p(t)$ est le profil de puissance :

$$P_{moy} = \frac{1}{(t_f - t_0)} \int_{t_0}^{t_f} p(t) dt \quad (2.2)$$

$$P_{max} = \max_{t \in [t_0, t_f]} (p(t)) \quad (2.3)$$

$$PHP = \begin{cases} 1 - \frac{P_{moy}}{P_{max}} & \text{si } P_{moy} \geq 0 \text{ et } P_{max} > 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.4)$$

Cette définition implique que $PHP \in [0, 1]$, quelle que soit la mission considérée. Un *PHP* nul caractérise une mission strictement défavorable à l'hybridation alors qu'un *PHP* unitaire caractérise une mission fortement favorable à l'hybridation.

(Akli, 2008) illustre le sens physique de l'indicateur *PHP* en considérant deux missions théoriques m_1 et m_2 représentées en Figure 2.1 et Figure 2.2 par leurs profils de puissance $p_1(t)$ et $p_2(t)$ respectivement. Il apparaît de manière intuitive que la mission m_1 est plus favorable à l'hybridation que la mission m_2 . En effet, la puissance moyenne est plus éloignée de la puissance maximale pour la mission m_1 , contrairement à la mission m_2 . Ainsi, la source de puissance dimensionnée au (P_{max}) de la mission fonctionnerait plus souvent à sa capacité limite dans le cas de la mission m_2 que dans le cas de la mission m_1 . Cette observation est confirmée par le calcul des potentiels d'hybridation de puissance où PHP_1 est supérieur à PHP_2 .

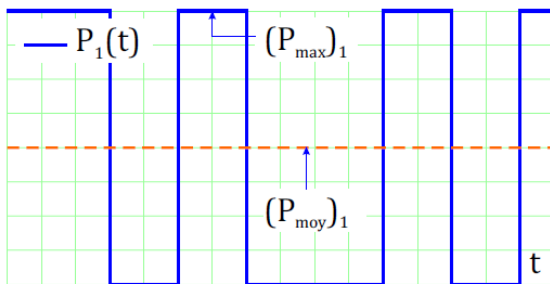


Figure 2.1 Mission m_1 ; $PHP = 50\%$ (Akli, 2008)

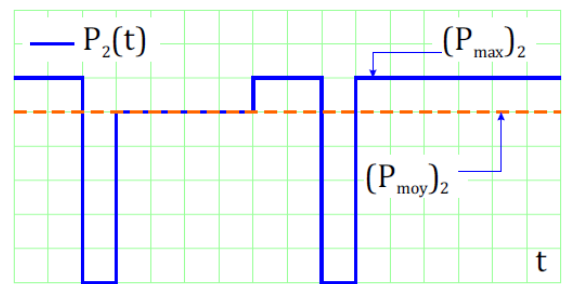


Figure 2.2 Mission m_2 ; $PHP < 20\%$ (Akli, 2008)

2.2.2.3 Potentiel d'hybridation énergétique

Le second indicateur, le potentiel d'hybridation énergétique (*PHE*), est l'analogue du potentiel d'hybridation de puissance sur le plan énergétique. Dans cette phase d'analyse des missions, la nature des systèmes de stockage pouvant servir à l'hybridation n'est pas prise en compte afin de découpler l'analyse des missions des contraintes technologiques liées aux différents systèmes de stockage. Ainsi le système de stockage d'énergie est supposé idéal en charge et en décharge. En considérant que le générateur d'énergie primaire fournit de façon constante la puissance moyenne de la mission, l'équation (2.5) permet de considérer l'évolution de l'énergie $E_s(t)$ dans le dispositif de stockage.

$$E_s(t) = - \int_{t_0}^t (p(\tau) - P_{moy}) d\tau, \quad \forall t \in [t_0, t_f] \quad (2.5)$$

Il est alors possible d'en déduire l'énergie utile E_u que devrait contenir le dispositif de stockage pour assurer cette mission selon l'équation (2.6).

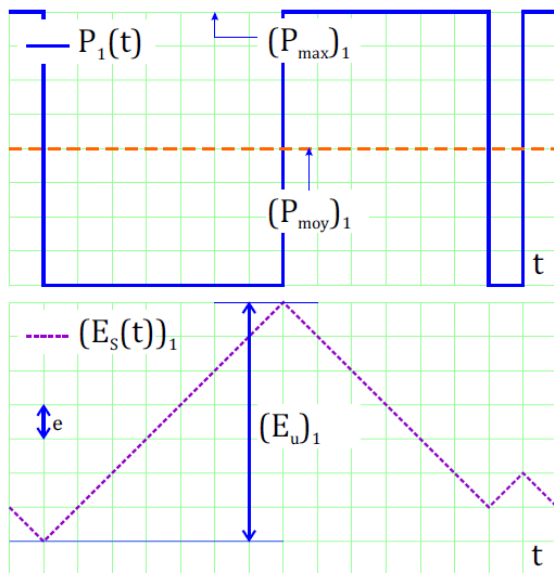
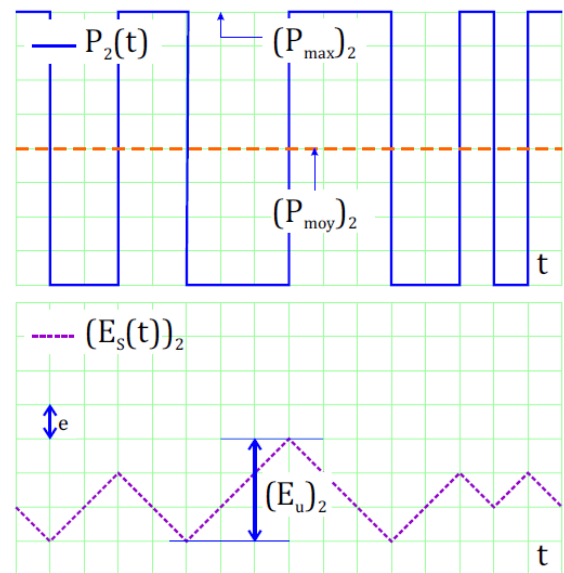
$$E_u = \max_{t \in [t_0, t_f]} (E_s(t)) - \min_{t \in [t_0, t_f]} (E_s(t)) \quad (2.6)$$

Ainsi, plus la mission comprendra de longues phases de charge/décharge du dispositif de stockage, plus l'énergie E_u devra être importante. A l'inverse, plus la fréquence et la régularité des cycles de charge/décharge de la mission sont élevées, plus l'énergie utile à stocker sera faible. De cette constatation est venue l'idée de formuler le potentiel d'hybridation énergétique *PHE* de façon à illustrer ces deux notions de fréquence et de régularité. Pour cela, le potentiel d'hybridation énergétique est assimilé à une fréquence fictive définie par :

$$PHE = \begin{cases} \frac{P_{max}}{E_u} & \text{si } E_u \neq 0 \text{ et } P_{max} > 0 \\ +\infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.7)$$

Cette définition implique que $PHE \in [0, +\infty]$, quelle que soit la mission considérée. L'indicateur *PHE* est ainsi dissocié de toute considération liée à la durée de la mission et évalue la facilité ($PHE = +\infty$) ou la difficulté ($PHE = 0$) à l'hybridation d'une mission.

Dans la thèse (Akli, 2008), l'indicateur *PHE* est illustré en considérant deux nouvelles missions théoriques m_1 et m_2 représentées en Figure 2.3 et Figure 2.4 respectivement. Ces missions ont des puissances maximales et des potentiels d'hybridation de puissance identiques mais des énergies utiles à stocker différentes. La mission m_1 requiert une capacité de stockage plus grande que la mission m_2 ce qui la rend moins favorable à l'hybridation par rapport à la mission m_2 .


Figure 2.3 Mission m_1 : $PHP = 50\%$, $E_u = 7e$ (Akli, 2008)

Figure 2.4 Mission m_2 : $PHP = 50\%$, $E_u = 3e$ (Akli, 2008)

2.2.3 MISSION URBAINE MESUREE

Une première campagne de mesures a été réalisée par une auto-école sur 9 jours ouvrables dans des conditions urbaines à Nantes. Vingt-deux trajets ont été enregistrés, chacun avec un élève conducteur différent. Au total, plus de 700 km ont été parcourus à une vitesse moyenne de 26,4 km/h. D'après le profil de vitesse représenté en Figure 2.5, cette mission urbaine mesurée spécifique est majoritairement composée de trajets limités à 50 km/h mais quelques tronçons à 70 km/h et des passages sur le périphérique limité à 90 km/h sont aussi observés. Les pointillés verticaux délimitent les différents trajets de durées variables entre 229 s et 13 534 s. Le profil d'accélération, déduit du profil de vitesse, est présenté en Figure 2.6. Le profil d'inclinaison de la route, illustré en Figure 2.7, observe des valeurs de pente allant de -8,5 % à 9,5 % ce qui pourrait correspondre au passage d'un pont ou à un démarrage en côte. Le profil de la puissance aux roues calculée à partir du triplet {vitesse ; accélération ; inclinaison} est présenté en Figure 2.8.

Les caractéristiques de la mission urbaine sont récapitulées dans le Tableau 2.2. Les valeurs minimum, moyenne et maximum sont reportées pour chacune des variables constituant la mission, à savoir la vitesse, l'accélération et l'inclinaison de la route. L'énergie consommée a été calculée à partir du profil de la puissance aux roues ce qui permet de calculer la consommation énergétique en kWh aux 100 kilomètres. Les indicateurs PHP et PHE montrent un fort potentiel à l'hybridation de puissance mais un faible potentiel à l'hybridation énergétique.

Concernant le PHE de 1,0 mHz calculé sur l'ensemble de la mission enregistrée, c'est-à-dire sur les trajets mis bout à bout, on s'aperçoit qu'il est très inférieur aux PHE calculés pour chacun des trajets allant de 3,3 mHz à 63,9 mHz. En effet, le PHE considère l'énergie utile au stockage E_u pour une puissance du générateur d'énergie primaire égale à la puissance moyenne sur le trajet spécifié. Or les puissances moyennes varient suivant les trajets enregistrés, ce qui explique les meilleurs PHE sur les trajets spécifiques par rapport à celui calculé sur l'ensemble de la mission

où le générateur d'énergie primaire n'est pas adapté à tous les trajets. Cette remarque souligne l'importance d'adapter le générateur d'énergie primaire et l'organe de stockage à la mission du véhicule.

Le dernier paramètre calculé est le taux d'énergie récupérable par rapport à l'énergie à fournir pour effectuer la mission. Il permettra de comparer les missions entre elles.

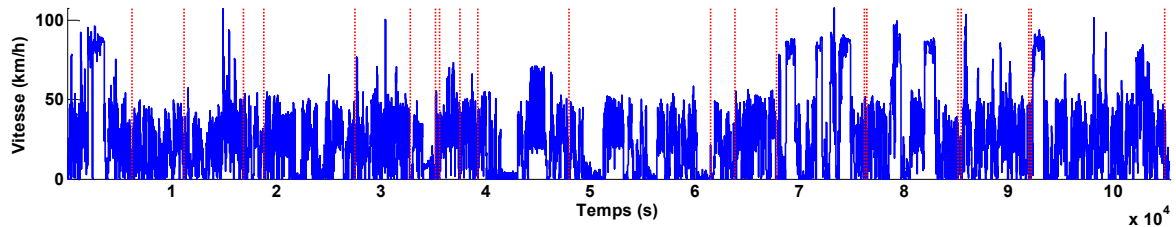


Figure 2.5 Profil de la vitesse de la mission urbaine mesurée

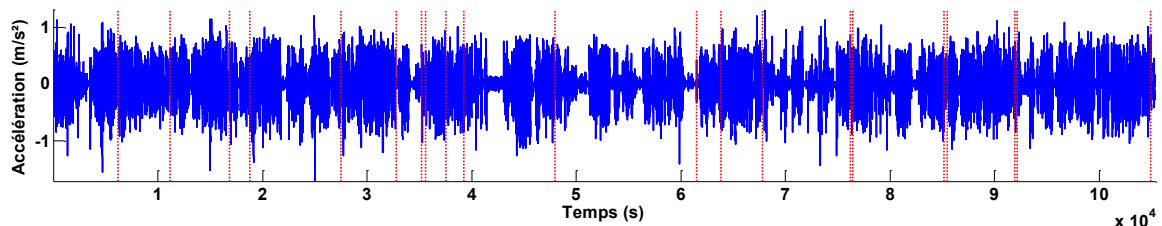


Figure 2.6 Profil de l'accélération de la mission urbaine mesurée

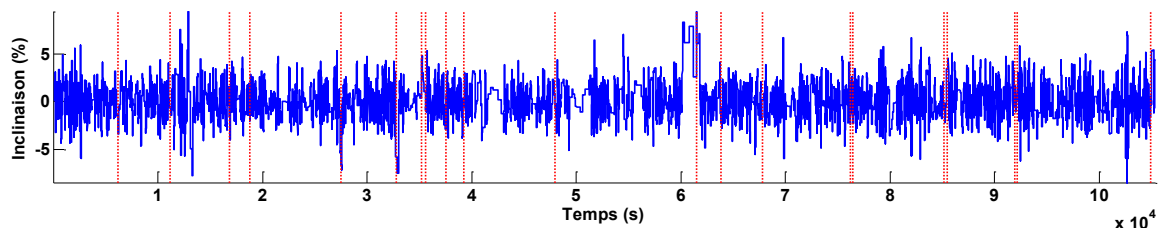


Figure 2.7 Profil de l'inclinaison de la route de la mission urbaine mesurée

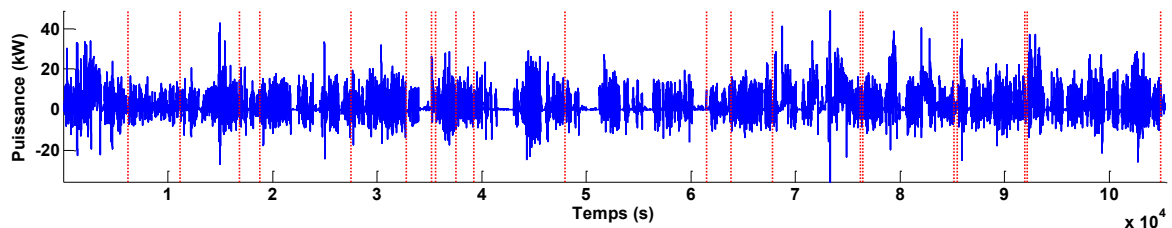


Figure 2.8 Profil de la puissance aux roues calculée à partir des mesures GPS

Tableau 2.2 Caractéristiques de la mission urbaine mesurée

Grandeur	Valeur			Unité
	Minimum	Moyenne	Maximum	
Vitesse du véhicule	0,0	26,4	107,9	km/h
Accélération	-1,7	0,0	1,3	m/s ²
Inclinaison de la route	-8,5	0,2	9,5	%
Puissance aux roues	-35,5	2,7	49,0	kW
Durée totale de la mission mesurée	29h 15min 40s (105 340s)			s
Intervalle des durées des 22 trajets	[229 ; 13 534]			
Energie consommée aux roues	79,42			kWh
Distance parcourue	772			km
Consommation énergétique	10,29			kWh/100km
PHP sur l'ensemble de la mission	94,5			%
Intervalle des <i>PHP</i> des 22 trajets	[84,7 ; 95,0]			
PHE sur l'ensemble de la mission	1,0			mHz
Intervalle des <i>PHE</i> des 22 trajets	[3,3 ; 63,9]			
Energie récupérable / à fournir	19.1 / 98.5 (19.4 %)			kWh

2.2.4 MISSION EXTRA-URBAINE MESUREE

Une deuxième campagne de mesures a été réalisée sur 4 allers-retours entre St Nazaire et Rennes. Cette mission mesurée est donc la concaténation de 8 enregistrements, soit plus de 12 heures de mesures pour un total de 1 031 kilomètres parcourus. Ce trajet représente une mission extra-urbaine avec de courtes portions urbaines pour sortir et entrer des agglomérations, des passages routiers et de la voie rapide limitée à 110 km/h comme présenté sur la Figure 2.9.

Le Tableau 2.3 récapitule les caractéristiques de la mission extra-urbaine mesurée. Le profil en accélération de cette mission présente une dynamique plus faible que celle de la mission urbaine mesurée, notamment sur les portions de voie rapide. L'inclinaison de la route reste dans des intervalles équivalents alors que la puissance aux roues augmente en moyenne en raison de vitesses trois fois plus élevées que les vitesses urbaines. Les potentiels d'hybridation de cette mission extra-urbaine sont moins favorables en termes de puissance mais davantage en termes d'énergie que ceux de la mission urbaine.

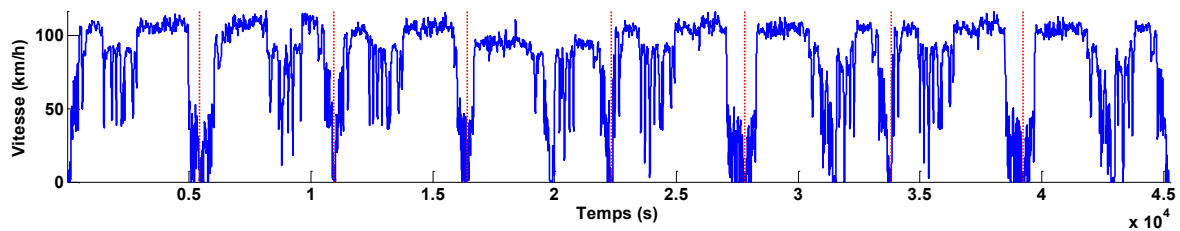


Figure 2.9 Profil de la vitesse de la mission extra-urbaine mesurée

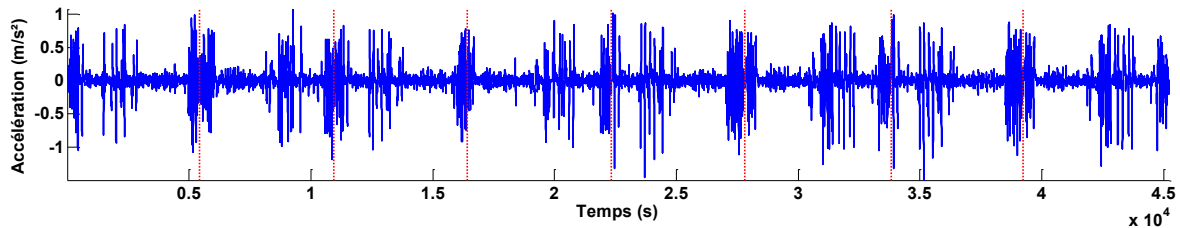


Figure 2.10 Profil de l'accélération de la mission extra-urbaine mesurée

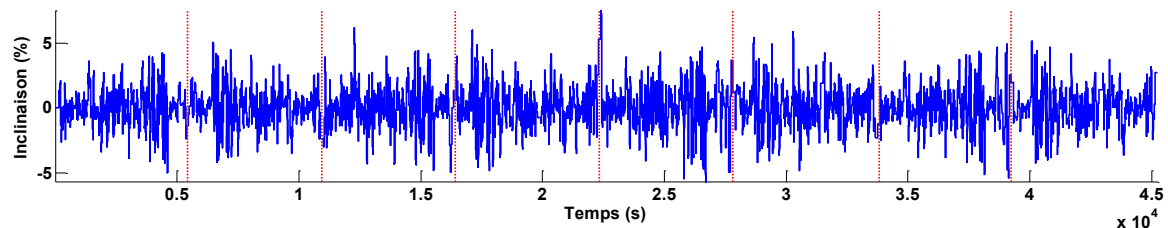


Figure 2.11 Profil de l'inclinaison de la route de la mission extra-urbaine mesurée

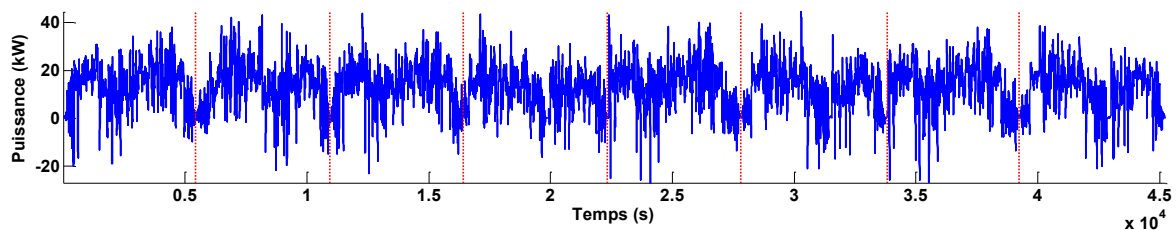


Figure 2.12 Profil de la puissance aux roues calculée à partir des mesures GPS

Tableau 2.3 Caractéristiques de la mission extra-urbaine mesurée

Grandeur	Valeur			Unité
	Minimum	Moyenne	Maximum	
Vitesse du véhicule	0,0	82,1	117,1	km/h
Accélération	-1,5	0,0	1,1	m/s ²
Inclinaison de la route	-5,7	0,1	7,5	%
Puissance aux roues	-26,9	12,8	44,5	kW
Durée totale de la mission mesurée	12h 33min 42s (45 222s)			s
Intervalle des durées des 8 trajets	[5424 ; 5989]			
Energie consommée aux roues	160,2			kWh
Distance parcourue	1 031			km
Consommation énergétique	15,54			kWh/100km
Potentiel d'Hybridation de Puissance	71,4			%
Intervalle des <i>PHP</i> des 8 trajets	[64,1 ; 74,1]			
Potentiel d'Hybridation Energétique	2,2			mHz
Intervalle des <i>PHE</i> des 8 trajets	[2,9 ; 4,8]			
Energie récupérable / à fournir	5,172 / 165.4 (3,1 %)			kWh

2.2.5 COMPARAISON DES MISSIONS MESUREES AUX CYCLES DE CONDUITE STANDARDS

Le Tableau 2.4 synthétise les caractéristiques des cycles standards européens, des cycles Artemis ainsi que de nos missions mesurées. Le profil de l'inclinaison de la route n'étant pas défini pour les cycles standards, une pente nulle a été considérée pour calculer la puissance requise par ces missions.

En termes de vitesse du véhicule, la mission urbaine mesurée se rapproche plus du standard européen NEDC qui allie quatre portions urbaine (ECE) et une portion extra-urbaine (EUDC). D'un autre côté, comparée aux standards Artemis, la mission mesurée est plus proche de l'urbain malgré une vitesse maximum proche de l'extra-urbain en raison de passages sur le périphérique nantais. La mission extra-urbaine mesurée, quant à elle, est assez proche du standard EUDC et est comprise entre les missions Artemis extra-urbaine et autoroutière.

En termes d'accélération, la conduite pendant les missions mesurées s'avère un peu plus agressive que celle des standards européens en valeurs maximum. Les standards ne semblent donc pas assez contraignants pour représenter un style de conduite réel. Cependant ces valeurs d'accélération sont quasiment inférieures de moitié comparées à celles des cycles Artemis. Le style de conduite retenu pour les cycles Artemis semble en effet assez sportif avec une accélération pour l'urbain de $2,9 \text{ m/s}^2$, soit 0 à 100 km/h en 9,5 s, supérieure à celle de l'extra-urbain. Le calcul de l'accélération devrait être lissé sur trois secondes.

En termes de puissance moyenne et minimum, la mission urbaine mesurée est proche du cycle Artemis urbain. La puissance maximale, quant à elle, serait plus proche des ordres de grandeurs du cycle Artemis extra-urbain, une nouvelle fois en raison de passages sur le périphérique nantais. Concernant la mission extra-urbaine mesurée et toujours en termes de puissance, elle est légèrement plus contraignante que le standard EUDC mais moins que le cycle Artemis extra-urbain en valeurs maximales.

Le calcul de la consommation énergétique en kWh aux cent kilomètres permet de montrer que les missions mesurées sont dans les mêmes ordres de grandeur que les standards européens et Artemis.

La comparaison des *PHP* et des *PHE* montrent sans surprise qu'un parcours urbain est plus favorable à l'hybridation qu'un trajet extra-urbain. Les potentiels d'hybridation de puissance et énergétique des missions urbaine et extra-urbaine mesurées sont bien dans les mêmes ordres de grandeur que ceux des standards européens et Artemis, excepté pour les *PHE* de la mission extra-urbaine mesurée qui se distinguent par leur faiblesse.

Le pourcentage d'énergie récupérable par rapport à celle à fournir est, quant à lui, plus faible pour les missions mesurées à catégorie de route donnée. En effet, les 19,4 % de la mission urbaine mesurée sont bien loin des 44,2 % du cycle Artemis urbain. De même, les 3,1 % de la mission extra-urbaine sont cinq fois moins élevés par rapport aux 14,9 % du standard EUDC.

Tableau 2.4 Comparaison des caractéristiques des missions mesurées aux cycles de conduite standards

Grandeur		Standards			Artemis			Missions mesurées	
		ECE	EUDC	NEDC	Urbain	Extra-urbain	Auto-route	Urbaine	Extra-urbaine
Vitesse du véhicule (km/h)	Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Moy	18,2	63,9	33,6	17,5	60,3	99,5	26,4	82,1
	Max	50,0	120,1	120,1	57,7	111,5	150,4	107,9	117,1
Accélération (m/s ²)	Min	-0,9	-1,4	-1,4	-3,2	-4,1	-3,4	-1,7	-1,5
	Moy	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Max	1,1	0,85	1,1	2,9	2,4	1,9	1,3	1,1
Inclinaison de la route (%)	Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-8,5	-5,7
	Moy	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
	Max	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,5	7,5
Puissance aux roues (kW)	Min	-8,7	-24,7	-24,7	-36,9	-57,8	-94,9	-35,5	-26,9
	Moy	1,7	8,6	4,1	2,0	7,6	19,5	2,7	12,8
	Max	16,4	40,3	40,3	32,1	50,7	73,7	49,0	44,5
Durée de la mission	0h	0h	0h	0h	0h	0h	0h	29h	12h
	3min	6min	19min	15min	16min	17min	15min	15min	33min
	21s	32s	41s	21s	21s	49s	40s	40s	42s
Energie aux roues (kWh)		0,097	0,94	1,33	0,51	2,06	5,80	79,4	160,2
Distance parcourue (km)		1,01	6,95	11,0	4,5	16,4	29,6	772	1 031
Consommation énergétique (kWh/100km)		9,55	13,51	12,05	11,40	12,54	19,63	10,29	15,54
Potentiel d'Hybridation de Puissance <i>PHP</i> (%)		89,4	78,6	90,0	93,79	85,1	73,5	[84,7 ; 95,0]	[64,1 ; 74,1]
Potentiel d'Hybridation Énergétique <i>PHE</i> (mHz)		77,2	28,7	15,7	70,6	34,9	15,9	[3,3 ; 63,9]	[2,9 ; 4,8]
Energie récupérable (kWh)		0,04	0,16	0,33	0,40	0,55	0,62	19,10	5,17
Energie à fournir (kWh)		0,14	1,10	1,65	0,91	2,61	6,42	98,52	165,38
(récupérable / à fournir)		(29,4 %)	(14,9 %)	(19,7 %)	(44,2 %)	(21,0 %)	(9,7 %)	(19,4 %)	(3,1 %)

Afin de comparer plus en détails la distribution des puissances de chaque mission, la représentation par densité de probabilité est introduite. Celle-ci permet d'illustrer la probabilité d'apparition de chacune des puissances au regard de toute la mission.

La comparaison des densités de probabilité de puissance des missions urbaines en Figure 2.13 montre d'une part une bonne cohérence entre le cycle Artemis et la mission mesurée. Cette dernière présente une probabilité plus forte pour les puissances à fournir et moins forte pour les puissances récupérables. D'autre part, le cycle standard ECE semble beaucoup moins réaliste avec des pics de probabilité autour de 3 kW et 5 kW que l'on ne retrouve pas dans les cycles Artemis et mesuré. Ces pics de probabilité s'expliquent par l'allure de la mission avec des accélérations constantes et des paliers à vitesse constante ce qui engendre des phases à puissance constante.

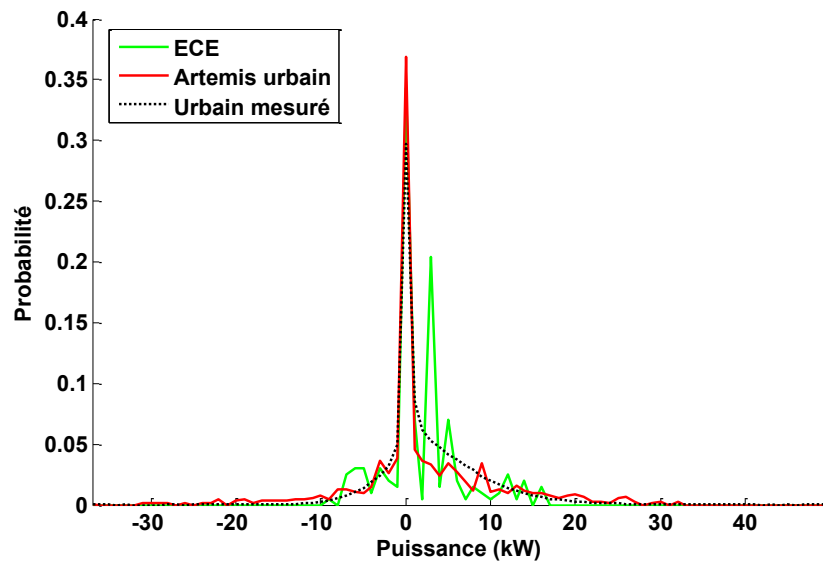


Figure 2.13 Comparaison des densités de probabilité de puissance des missions urbaines

Les mêmes remarques sont valables pour la comparaison des densités de probabilité de puissance des missions extra-urbaines en Figure 2.14. Le cycle standard EUDC présente des pics de probabilité localisés pour certaines puissances ce qui n'est pas réaliste. La mission mesurée quant à elle présente une plus forte probabilité pour des puissances autour de 20 kW contrairement au cycle Artemis extra-urbain dont les puissances sont plus concentrées autour de 10 kW.

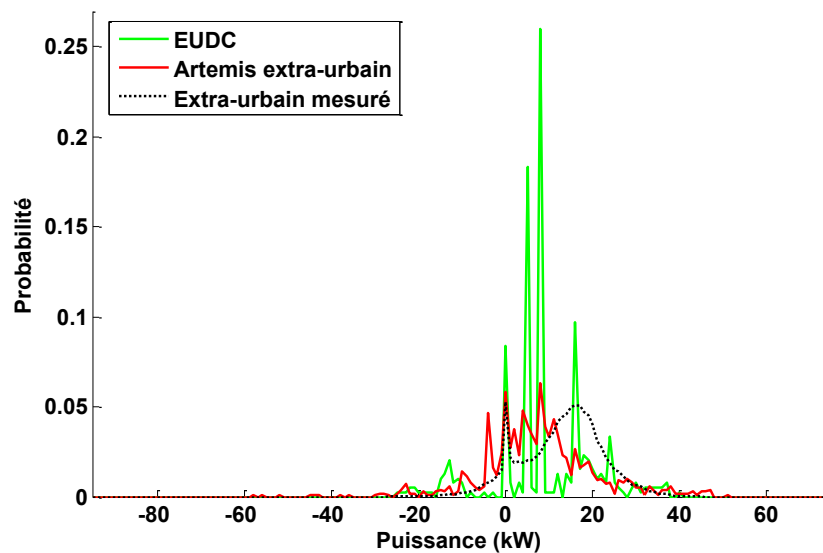


Figure 2.14 Comparaison des densités de probabilité de puissance des missions extra-urbaines

Finalement, la Figure 2.15 permet de visualiser les fonctions de répartition (ou probabilités cumulées) des puissances de chacune des missions afin de les comparer entre elles. L'allure « en escalier » des cycles standards est moins réaliste que celle des cycles Artemis ou mesurés. En

effet, les standards européens sont composés de rampes d'accélération et de décélération linéaires ainsi que de plateau à vitesse constante. Ceci engendre de fortes probabilités pour des puissances spécifiques comme nous l'avons vu dans les Figure 2.13 et Figure 2.14 d'où cette allure en escalier des probabilités cumulées.

La fonction de répartition de la mission urbaine mesurée est bien dans les mêmes ordres de grandeur que les standards urbains alors que la mission extra-urbaine mesurée se placerait plutôt entre les standards extra-urbains et le cycle Artemis autoroute. Les missions mesurées contiennent visiblement moins de puissances négatives, donc de puissances récupérables, que les standards comme nous l'avons évoqué dans le Tableau 2.4.

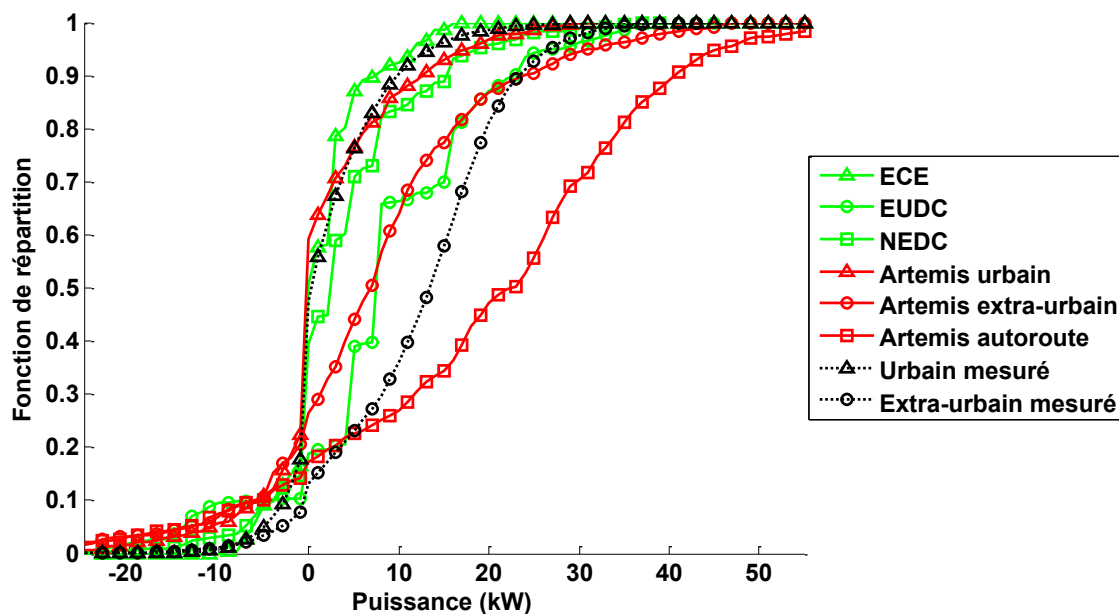


Figure 2.15 Comparaison des fonctions de répartition des missions mesurées aux cycles standards

En conclusion, ces campagnes de mesures fournissent une base de données intéressante pour développer la modélisation de la mission d'un véhicule. En effet, les profils mesurés sont plus réalistes que les standards européens et ils sont cohérents avec les cycles Artemis. De plus, cette base de données est riche de plusieurs heures de mesures contrairement aux standards qui ont une durée d'une quinzaine de minutes. Dans la prochaine section, nous allons donc étudier les outils susceptibles de modéliser ce processus temporel qu'est la mission d'un véhicule.

2.3 OUTILS DE MODELISATION D'UN PROCESSUS TEMPOREL

De nombreux outils mathématiques sont disponibles pour établir le modèle d'un processus temporel. Selon (Rahman, et al., 1993), ces méthodes peuvent être classées en deux groupes :

- les méthodes d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones ou la logique floue,
- les méthodes statistiques avec les séries temporelles, la modélisation probabiliste ou les matrices de Markov.

2.3.1 LES METHODES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

2.3.1.1 Réseau de neurones artificiels

Un réseau de neurones artificiels (ANN : Artificial Neural Network) est une structure algorithmique s'appuyant sur le fonctionnement du système nerveux humain. Il est capable « d'apprendre » à représenter des relations fonctionnelles complexes difficiles à décrire sous une forme analytique de systèmes non linéaires ou de systèmes variables en fonction du temps (Sorin, et al., 2001). L'inconvénient de cette méthode est la phase d'apprentissage qui nécessite une base de données assez importante sur le problème à résoudre. Cependant, cette phase d'entraînement donne la capacité à un ANN de « comprendre » les relations complexes entre les vecteurs de données d'entrée et de sortie.

Un neurone artificiel est un processeur élémentaire qui reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont du réseau comme exposé sur la Figure 2.16. Un poids w est associé à chaque entrée afin de représenter la force de la connexion. Chaque neurone est doté d'une sortie unique, qui se ramifie pour alimenter un nombre variable de neurones en aval du réseau.

Les réseaux de neurones ont notamment été exploités afin d'effectuer la prévision des consommations électriques à court terme du réseau de distribution taïwanais (Ho, et al., 1992). Entraînés sur une loi hors ligne optimale, ils ont aussi permis d'implanter une stratégie de gestion de l'énergie en ligne (Scordia, 2004) comme vu au Chapitre 1.

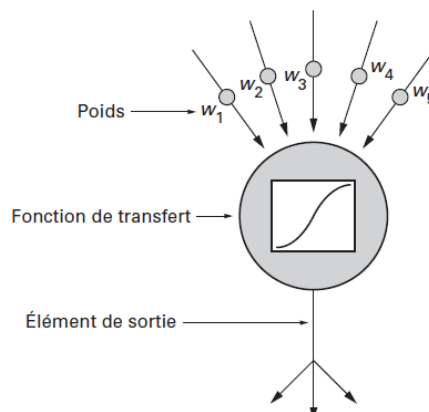


Figure 2.16 Neurone artificiel (Sorin, et al., 2001)

2.3.1.2 Logique floue

La logique floue est un mode de logique basé sur le système de raisonnement humain qui permet d'apprécier des données de manière approximative. Elle est utilisée en premier lieu pour caractériser des grandeurs physiques de manière approchée d'où la présence du terme « flou » dans la dénomination.

Ces quantifications floues sont caractérisées par une fonction d'appartenance dont un exemple est donné en Figure 2.17. Une pièce éclairée par une intensité lumineuse de 1000 lux est qualifiée de « très lumineuse » et de « pas du tout sombre » d'après cet exemple.

La logique floue n'est pas une méthode de prévision à part entière, mais est en revanche très utilisée pour modifier d'autres méthodes de prévision comme certains modèles temporels ou les réseaux de neurones artificiels (Dash, et al., 1996). La logique floue est généralement considérée comme une alternative aux probabilités.

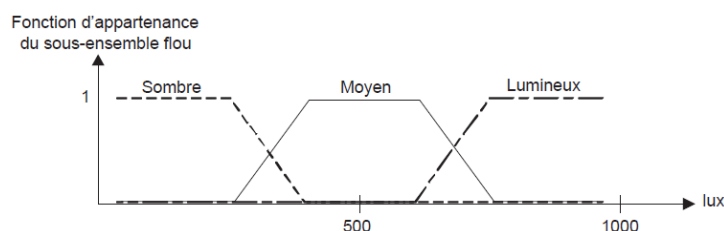


Figure 2.17 Exemple d'application de la logique floue : qualification de la luminosité

2.3.2 LES METHODES STATISTIQUES

2.3.2.1 Séries temporelles et modèles de la famille ARMA

Dans des domaines aussi variés que sont la météorologie, l'économie, la biologie, la médecine ou encore le génie électrique, un certain nombre de phénomènes sont l'objet de variations temporelles pouvant être décrites par le biais d'une série temporelle. Sa formulation revêt une importance considérable pour l'analyse et la compréhension des phénomènes en cause ainsi que l'étude des facteurs qui en déterminent les variations.

2.3.2.1.1 Introduction & définition

Une série temporelle permet d'étudier des données ou observations d'événements relevées à un temps spécifique t . L'une de ses particularités repose sur la propriété d'autocorrélation dans le sens où la valeur de chaque observation est dépendante des valeurs qui la précèdent.

L'objectif de l'analyse d'une série temporelle est de pouvoir déterminer un modèle statistique capable de décrire aux mieux les données observées et de faire la prédiction des prochains événements susceptibles de se produire.

Dans le cas général, une série temporelle peut être identifiée par la somme de trois composantes :

- une composante moyenne, pour caractériser la tendance générale du signal temporel,
- une composante saisonnière, pour prendre en compte la périodicité possible du phénomène,
- une composante aléatoire, pour caractériser le comportement stochastique du processus.

L'association de ces trois composantes forme le signal complet. Une condition essentielle de la modélisation des séries temporelles est la stationnarité. Un processus aléatoire est dit stationnaire si toutes ses propriétés statistiques sont invariantes dans le temps.

Dans sa thèse, (Miègeville, 1999) a utilisé la notion de séries temporelles pour établir un modèle prévisionnel de l'évolution temporelle des harmoniques produit par une installation électrique.

2.3.2.1.2 Modèles autorégressif et à moyenne mobile

Le modèle autorégressif (AR) permet de prédire la valeur future d'un processus par rapport à une ou plusieurs valeurs antérieures, selon l'ordre n du modèle et à un bruit blanc $b_{(k)}$ près. Son principe de fonctionnement est présenté sur la Figure 2.18 où $y_{(k)}$ est la sortie du système à l'instant kTe , où k est un entier et Te la période d'échantillonnage, telle que :

$$y_{(k)} = -a_1 y_{(k-1)} - a_2 y_{(k-2)} - \dots - a_n y_{(k-n)} + b_{(k)} \quad (2.8)$$

$$\text{avec } A_{(z)} = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \quad (2.9)$$

Ce modèle est très courant et a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques, notamment dans le cadre de prévisions sur des consommations de puissance (Miègeville, 1999), (Huang, 1997), (Mbamalu, et al., 1993), (Noureddine, et al., 1992).

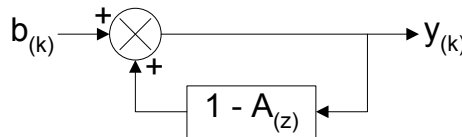


Figure 2.18 Schéma fonctionnel d'un modèle autorégressif

Le modèle à moyenne mobile MA (Moving Average), quant à lui, permet de prédire la sortie par rapport à la valeur d'un bruit blanc au même instant ou plusieurs instants précédents, selon l'ordre n du modèle. Son schéma de fonctionnement est décrit sur la Figure 2.19 où $b_{(k)}$ est un bruit blanc et $y_{(k)}$ est la sortie du système à l'instant kTe telle que :

$$y_{(k)} = b_{(k)} + c_1 b_{(k-1)} + c_2 b_{(k-2)} + \dots + c_n b_{(k-n)} \quad (2.10)$$

$$\text{avec } C_{(z)} = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_n z^{-n} \quad (2.11)$$

Il est rare d'appliquer ce modèle seul dans le domaine des prévisions de puissance. En effet, il est souvent utilisé en complément du modèle AR pour donner le modèle ARMA décrit dans le paragraphe suivant.

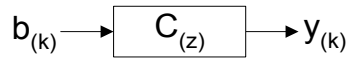


Figure 2.19 Schéma fonctionnel d'un modèle à moyenne mobile

2.3.2.1.3 Modèles ARMA, ARIMA, SARIMA et ARCH

Les deux précédents modèles AR et MA sont simples mais nécessitent parfois un grand nombre de paramètres pour obtenir un ajustement correct des données. Aussi, peut-il être intéressant d'appliquer un modèle mixte dit modèle ARMA (Auto Regressive Moving Average) permettant de décrire des processus stationnaires pour lesquels il existe un bruit blanc. Son schéma de fonctionnement est décrit sur la Figure 2.20 où $b_{(k)}$ représente un bruit blanc et $y_{(k)}$ est la sortie du système à l'instant kT_e telle que :

$$y_{(k)} = b_{(k)} + c_1 b_{(k-1)} + c_2 b_{(k-2)} + \dots + c_n b_{(k-n)} - a_1 y_{(k-1)} - a_2 y_{(k-2)} - \dots - a_n y_{(k-n)} \quad (2.12)$$

Dans l'article (Nowicka-Zagrajek, et al., 2002), ce modèle est appliqué à la modélisation et à la prévision du marché de l'énergie en Californie.

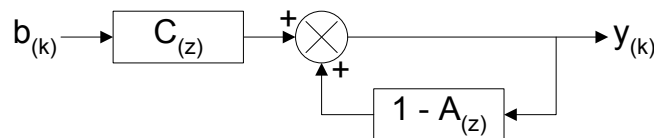


Figure 2.20 Schéma fonctionnel d'un modèle ARMA

Le modèle intégré du type ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) s'applique à un processus originellement non stationnaire nécessitant une différenciation de la série temporelle. Ce modèle a été utilisé pour effectuer des prévisions de consommations électriques (Gönen, 1984).

Le modèle SARIMA (Seasonnal Auto Regressive Integrated Moving Average) s'applique dès lors que la série est très saisonnière dans le cas d'une forte périodicité (mensuelle, annuelle, etc.) (Kareem, et al., 2006).

Le modèle ARCH (Auto Regressive Conditionnally Heteroscedastic) a été introduit pour palier à une observation empirique non prise en compte par les précédents modèles, à savoir la volatilité conditionnelle d'une série (Chen, et al., 2006).

2.3.2.2 Modélisation stochastique

Dans sa thèse (Delanoë, 2008), Jérôme Delanoë a répondu à la problématique du dimensionnement du réseau électrique alimentant le système embarqué d'un véhicule terrestre, problématique proche de celle de la présente thèse. La modélisation probabiliste utilisée a permis de caractériser le comportement variable et aléatoire des charges connectées. Un algorithme de Monte-Carlo permettait ensuite de simuler le réseau et d'obtenir une représentation probabiliste de la puissance consommée par celui-ci.

2.3.2.2.1 Identification du modèle

Le but d'un modèle stochastique est de caractériser de façon statistique le comportement aléatoire d'un système. Dans l'exemple choisi, il s'agit de la puissance absorbée par des charges électriques. Cette grandeur peut être considérée aléatoire et être identifiée sous la forme d'une distribution de probabilités.

Les étapes de construction d'un modèle stochastique sont les suivantes :

- ◆ Acquisition d'informations concernant la grandeur à modéliser. Dans le cas où une campagne de mesures sur le système peut être effectuée, la période d'échantillonnage devra être suffisante et la représentativité des mesures devra être assurée.
- ◆ Traitement statistique des données. Cette étape consiste à calculer les fréquences d'apparition des différentes valeurs, par exemple de puissance, pour aboutir à un histogramme des fréquences.
- ◆ Identification mathématique du comportement de la grandeur selon des lois de probabilité. Suivant la complexité du problème, l'histogramme des fréquences peut être identifié à une ou plusieurs lois de probabilité. Une loi Gamma permet de modéliser la puissance absorbée par une charge dans l'exemple de la Figure 2.21.

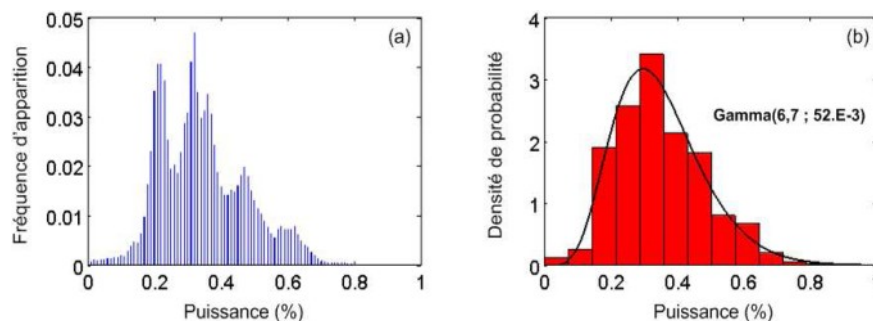


Figure 2.21 Fréquence d'apparition (a) et densité de probabilité (b) de la puissance absorbée par une charge (Delanoë, 2008)

2.3.2.2.2 Simulation stochastique

Une façon d'exploiter les modèles stochastiques est d'utiliser un algorithme stochastique dit de Monte Carlo (MC). Le principe repose sur la loi des grands nombres et sur le fait qu'un grand nombre d'expériences fait tendre les fréquences d'apparition d'un événement vers sa probabilité

d'occurrence. L'algorithme de MC génère artificiellement des expériences afin d'obtenir le comportement probable d'un système.

En effet, le modèle stochastique identifié précédemment peut être soumis à des tirages aléatoires permettant de simuler les puissances absorbées par les charges de manière aléatoire. Celles-ci permettent de déduire une puissance totale « possible » du réseau qui constitue une expérience générée artificiellement. En répétant cette étape un grand nombre de fois, les puissances totales produites permettent de déduire le comportement en puissance du réseau dans son ensemble et ainsi d'évaluer le dimensionnement requis.

2.3.2.3 Modélisation d'une chaîne de Markov

2.3.2.3.1 Les chaînes de Markov

Les chaînes de Markov sont des processus stochastiques à temps discret dont l'évolution est régie par la propriété de Markov qui stipule que l'état futur du processus ne dépend que de l'état présent et non pas du passé. Cette structure extrêmement simple suffit à générer une grande variété de comportements. Les chaînes de Markov trouvent donc des applications dans de nombreux domaines comme, par exemple, la biologie, la physique, la sociologie et les sciences de l'ingénieur, où elles donnent des réponses qualitatives aussi bien que quantitatives aux problèmes posés (Brémaud, 2009). Ces chaînes de Markov peuvent être modélisées par une matrice du même nom.

2.3.2.3.2 La matrice de Markov

La matrice de Markov contient les probabilités de transition de l'état présent de la chaîne de Markov à son état futur. Ainsi ce modèle conserve les informations statistiques du processus stochastique mais aussi ses caractéristiques dynamiques. A partir de cette matrice il est ensuite possible de générer de manière stochastique une infinité de chaînes de Markov qui ont les mêmes caractéristiques que la chaîne d'origine.

Dans la littérature du Génie Electrique, la thèse (Ignatova, 2006) présente une étude dans laquelle la matrice de Markov est utilisée pour représenter statistiquement des signaux électriques sans perte importante d'information. Cet outil est ensuite utilisé pour reconstruire le signal et prédire son comportement futur.

Une autre application de ce modèle, vue dans le Chapitre 1 précédent, est l'optimisation de la stratégie de gestion de l'énergie basée sur le modèle de Markov de la mission d'un véhicule hybride (Kolmanovsky, et al., 2002) (Lin, et al., 2004) (Johannesson, et al., 2009).

2.3.3 COMPARAISON DES METHODES ET CHOIX DU MODELE

Le Tableau 2.5 synthétise les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de modélisation décrites précédemment.

Tableau 2.5 Comparaison des méthodes de modélisation d'un profil de puissance

Méthode	Avantages	Inconvénients
Réseaux de neurones artificiels	<ul style="list-style-type: none"> • Robuste aux données bruitées • Adapté à la modélisation d'une grande variété de comportement 	<ul style="list-style-type: none"> • Boîte noire • Difficulté d'interprétation des résultats • Ne permet pas de générer des profils aléatoires divers
Logique floue	<ul style="list-style-type: none"> • Assez intuitif 	<ul style="list-style-type: none"> • N'est pas une méthode de prévision à part entière
Séries temporelles / ARMA	<ul style="list-style-type: none"> • Conservation de la dynamique temporelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Implique une dépendance du processus aux états passés
Modèle probabiliste	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de conserver les caractéristiques statistiques des données mesurées • Très léger en termes d'espace mémoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne prend pas en compte l'évolution temporelle de la grandeur à modéliser
Modèle matriciel de Markov	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de conserver les caractéristiques statistiques ainsi que dynamiques des données mesurées • Permet de générer des profils aléatoires divers 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne permet pas d'extrapoler les données mesurées, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de simuler un état qui n'a pas été mesuré

Les réseaux de neurones artificiels ne correspondent pas à notre besoin car ils ne permettent pas de générer des profils aléatoires. De même, la logique floue n'étant pas une méthode de prévision à part entière, cette méthode ne correspond pas à notre problématique.

Concernant les méthodes statistiques, la méthode basée sur les séries temporelles ne semble pas appropriée à la modélisation et à la simulation du profil de puissance d'un véhicule par exemple. En effet, le système doit montrer une dépendance forte aux états passés.

Finalement, l'avantage du modèle probabiliste, comparé au modèle matriciel de Markov, est sa légèreté d'implémentation mais il ne permet pas de prendre en compte la dynamique du processus à modéliser comme le fait Markov. Pour ces raisons, la modélisation matricielle de Markov a été retenue pour la suite des travaux.

2.4 MODELISATION MATRICIELLE DE MARKOV

En mathématiques, un processus de Markov est un processus stochastique possédant la propriété de Markov : l'état futur du processus ne dépend que de l'état présent et non pas du passé. Une chaîne de Markov est un processus de Markov à temps discret qui peut donc être modélisée par des matrices de transition : la matrice de nombre de transitions et la matrice de Markov.

2.4.1 PROPRIÉTÉ DE MARKOV

Une suite de variables aléatoires $\{X_n\}_{n \geq 0}$ à valeurs dans l'espace dénombrable E est appelé processus stochastique à temps discret à valeurs dans E . L'ensemble E est l'espace d'état, dont les éléments seront notés $i, j, k \dots$. Lorsque $X_n = i$, le processus est dit être dans l'état i au temps n (Brémaud, 2009).

Ce processus $\{X_n\}_{n \geq 0}$ est appelé chaîne de Markov si pour tout entier $n \geq 0$ et tous les états $i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i, j \in E$,

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (2.13)$$

2.4.2 DÉFINITION DES MATRICES DE TRANSITION

Les matrices de transition sont des matrices positives particulières. Deux types de matrice peuvent être distinguées : la « matrice de nombres de transition » et la « matrice de Markov ».

2.4.2.1 Matrice de nombres de transitions

La matrice de nombres de transition permet de modéliser une chaîne de Markov en enregistrant le nombre de transitions entre les différents états. Les termes r_{ij} de cette matrice R représentent alors le nombre de transitions de l'état i à l'état j , et sont donc des nombres entiers positifs :

$$R = \{r_{ij}\}_{i,j \in E} \quad \text{où } r_{ij} \geq 0 \quad (2.14)$$

Chaque ligne i de la matrice R contient l'histogramme des états possibles que la variable peut prendre à partir de sa valeur i .

2.4.2.2 Matrice de Markov

Le comportement d'une chaîne de Markov peut aussi être décrit par la matrice de Markov M défini en (2.15). Chaque élément de cette matrice p_{ij} représente la probabilité de transition d'un état donné i (indice correspondant aux lignes de la matrice) à un autre état j (indice

correspondant aux colonnes de la matrice). Puisque les termes de la matrice de Markov M représentent des probabilités, leurs valeurs sont réelles et bornées entre 0 et 1 :

$$M = \{p_{ij}\}_{i,j \in E} \quad (2.15)$$

$$\text{où } p_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i), \quad 0 \leq p_{ij} \leq 1 \quad (2.16)$$

La Figure 2.22 montre un processus de Markov à trois états schématiquement représenté par un graphe orienté des transitions entre les états. Les cercles figurent les trois états $\{E_1; E_2; E_3\}$ et les arcs orientés sont renseignés par la probabilité de transition p_{ij} de l'état i à l'état j correspondante.

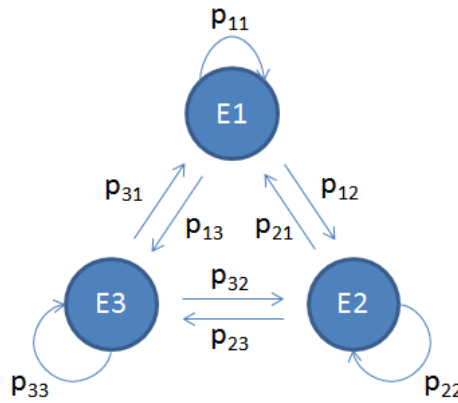


Figure 2.22 Graphe de transition d'un système à trois états

Ainsi, le système étant à l'état E_1 , la probabilité qu'il reste dans cet état est noté p_{11} . La probabilité que le système passe de l'état E_1 à l'état E_2 est noté p_{12} , et ainsi de suite.

A partir de chacun de ses états, une grandeur peut prendre un état différent ou conserver son état. En conséquence, la somme des termes de chaque ligne est exactement égale à l'unité. Autrement dit, chaque ligne de la matrice M représente une densité de probabilité vérifiant la propriété :

$$\sum_{k \in E} p_{ik} = 1 \quad (2.17)$$

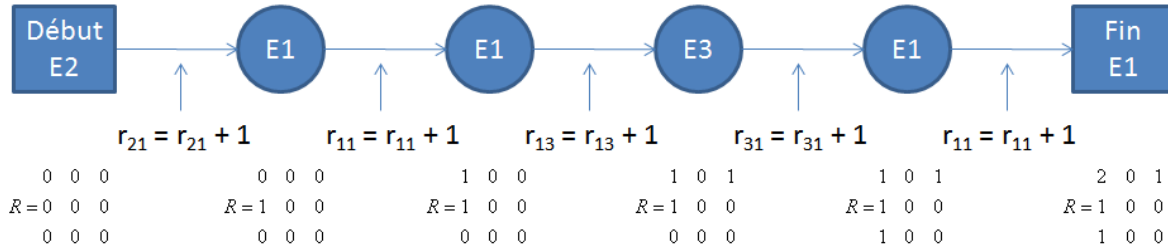
2.4.3 EXEMPLE D'ESTIMATION DES MATRICES DE TRANSITION

Afin de mieux illustrer la structure des matrices de transitions, prenons l'exemple d'une variable discrète définie par $x = [2 \ 1 \ 1 \ 3 \ 1 \ 1]$. Elle se caractérise par trois états $\{E_1 : x = 1; E_2 : x = 2; E_3 : x = 3\}$. En conséquence les matrices de transition correspondantes sont constituées de trois lignes et trois colonnes.

2.4.3.1 Matrice de nombres de transitions

La matrice de nombres de transitions est estimée à partir des données mesurées. A chaque intervalle de temps, le terme de la matrice correspondant à la transition entre l'état présent et l'état suivant est incrémenté de 1.

La variable passe de son état initial E_2 à l'état E_1 , par conséquent le terme r_{21} est incrémenté. A l'instant suivant, la variable reste dans l'état E_1 , donc une unité est ajoutée au terme correspondant à cette transition r_{11} . Et ainsi de suite comme le montre la Figure 2.23.



Ainsi la matrice de nombre de transitions de la variable est estimée à :

$$R = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

2.4.3.2 Matrice de Markov

L'algorithme classique d'estimation de la matrice de Markov (Anderson, et al., 1957) consiste à l'établir à partir de la matrice de nombres de transitions décrite au paragraphe précédent.

En effet, la probabilité de transition de l'état i à l'état j est estimée en divisant chaque terme r_{ij} par la somme des éléments de la ligne i correspondante :

$$\hat{M}(i, j) = \hat{p}_{ij} = \frac{r_{ij}}{n_i} \text{ avec } n_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (2.19)$$

où \hat{M} et \hat{p}_{ij} sont des estimateurs de M et p_{ij} , n_i est la somme des termes de la ligne i et n représente le nombre possible d'états.

Considérant l'exemple précédent, la matrice de Markov obtenue est la suivante :

$$M = \begin{pmatrix} 2/3 & 0 & 1/3 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

2.5 MODELISATION DU PROFIL DE PUISSANCE

La théorie mathématique de Markov a été développée dans la section précédente, soulignant la souplesse d'implémentation de ce modèle. Celui-ci est maintenant applicable à notre problème de modélisation de la mission d'un véhicule. Pour cela, deux matrices de Markov ont été construites à partir des deux profils de puissance déduits des mesures en milieux urbain et extra-urbain.

2.5.1 APPLICATION AUX PROFILS DE PUISSANCE MESURES

L'analyse de la mission urbaine a montré que la plage de variation de la puissance s'étalait de -36 kW à 49 kW. En affectant un état tous les 1kW, une matrice 86×86 cartographiant le passage de la puissance actuelle à la puissance suivante est ainsi obtenue. A partir du profil de puissance présenté en Figure 2.8, les probabilités de transition d'un état à un autre sont calculées, conduisant à l'estimation de la matrice de Markov représentée en Figure 2.24.

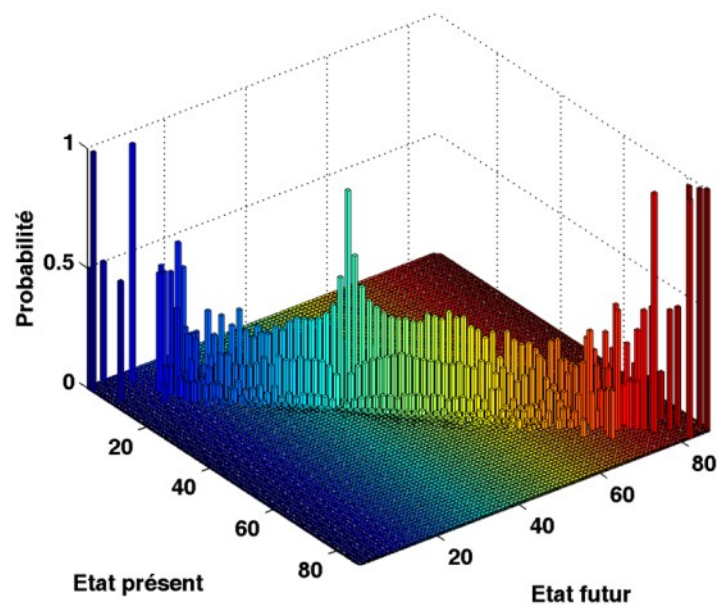


Figure 2.24 Matrice de Markov de la puissance calculée à partir des mesures urbaines

La matrice révèle une structure à tendance diagonale, indiquant que d'un état donné, la puissance transite vers les états proches ou reste dans le même état. En effet la puissance instantanée est une grandeur continue liée à la dynamique du véhicule et la fréquence d'échantillonnage d'une seconde permet de suivre ses évolutions.

Les probabilités les plus importantes de la matrice de Markov se situent principalement aux extrémités de la matrice. En effet la puissance arrive rarement dans ces quelques états extrêmes, il n'existe ainsi qu'un nombre restreint de transitions possibles, d'où une probabilité proche de l'unité si le nombre de transitions à partir de ces états est très réduit.

Le même procédé a été appliqué au profil de puissance extra-urbain illustré en Figure 2.12. La plage de variation de la puissance s'étalant de -27 kW à 44 kW, la matrice obtenue est une matrice carrée 71×71 présentée en Figure 2.25.

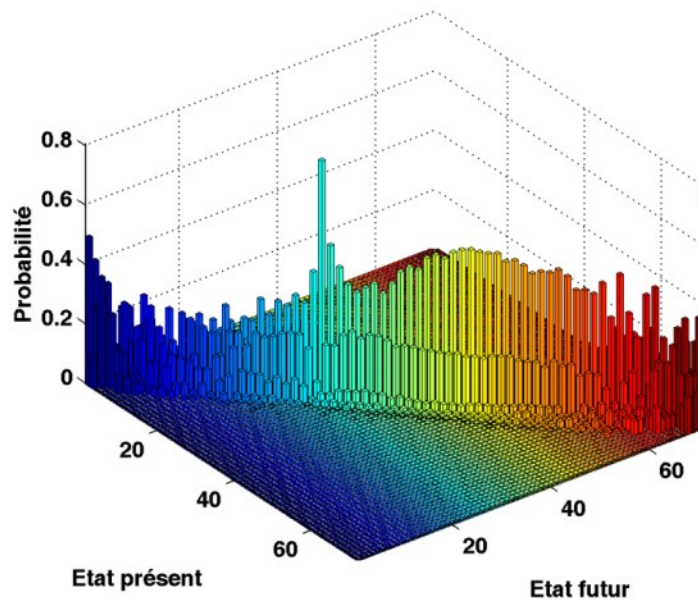


Figure 2.25 Matrice de Markov de la puissance calculée à partir des mesures extra-urbaines

La tendance diagonale ainsi que les probabilités importantes aux extrémités de la matrice sont retrouvées dans cette matrice. Les probabilités de transitions sont en moyenne plus élevées pour les états d'indices supérieurs à 27, contrairement à la matrice urbaine. L'indice n°27 correspondant à une puissance de 0 kW, cette remarque souligne que le profil de puissance extra-urbain modélisé présente moins de freinage récupératif que le profil urbain.

La matrice de Markov obtenue pour la mission urbaine est plus significative d'un point de vue statistique que celle de la mission extra-urbaine. En effet, la campagne de mesure en milieu urbain présente plus de 29h d'enregistrement lorsque la campagne en milieu extra-urbain n'en présente que 12h. Cependant, c'est une bonne base de départ pour l'étude de la modélisation de la mission d'un véhicule.

2.5.2 SIMULATIONS ET ANALYSES DU MODELE

2.5.2.1 Algorithme de simulation

La simulation d'un profil de puissance, à partir de son modèle stochastique de Markov, obéit à l'algorithme de la Figure 2.26. La variable temps t , l'état présent i et la puissance P_{sim} commencent par être initialisés. Dans notre cas, l'état initial $i_{début}$ correspond à une puissance nulle soit à l'arrêt du véhicule. A chaque pas de temps, trois étapes permettent de tirer aléatoirement la puissance instantanée future et de mémoriser le résultat.

La première étape consiste à tirer aléatoirement une valeur équiprobable k entre 0 et 1 sur une loi uniforme $U[0 ; 1]$.

Dans une deuxième étape, cette probabilité k permet de tirer aléatoirement l'état futur j à partir de la fonction de répartition inverse F_i^{-1} correspondant à l'état présent i . Pour rappel, la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice de Markov représente la densité de probabilité de transition entre l'état présent i et les états futurs. La fonction de répartition F_i des états futurs s'obtient en effectuant la somme cumulée des probabilités de transition de l'état i vers les états suivants. A titre d'exemple, la densité de probabilité de l'état présent $i = 38$ est représentée par l'histogramme en Figure 2.27. La fonction de répartition des états futurs associée à cet état, correspondant à une puissance de 10 kW, est représentée en Figure 2.28. La probabilité générée aléatoirement $k = 0,92$ donne alors la puissance future $P_{sim}(t + \Delta t) = 11\text{kW}$.

La puissance future P_j correspondant à l'état j est mémorisée dans la troisième étape. Le processus est relancé jusqu'à ce que la durée de simulation souhaitée soit atteinte.

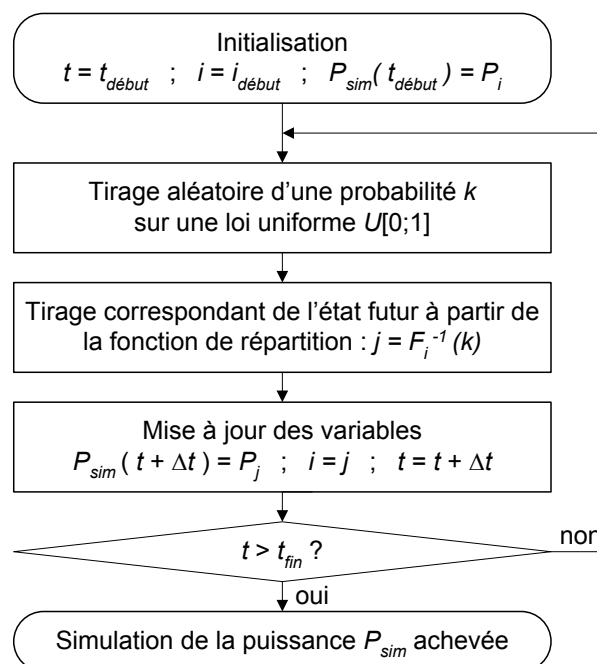


Figure 2.26 Algorithme de simulation d'un profil de puissance aléatoire

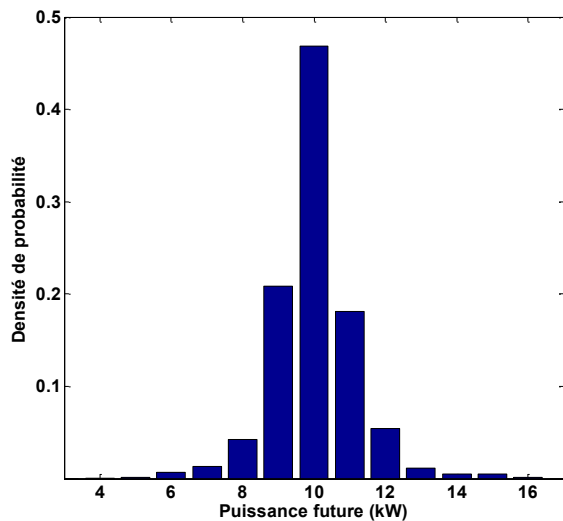


Figure 2.27 Densité de probabilité f_{38} avec $P_{sim}(t)=10\text{kW}$

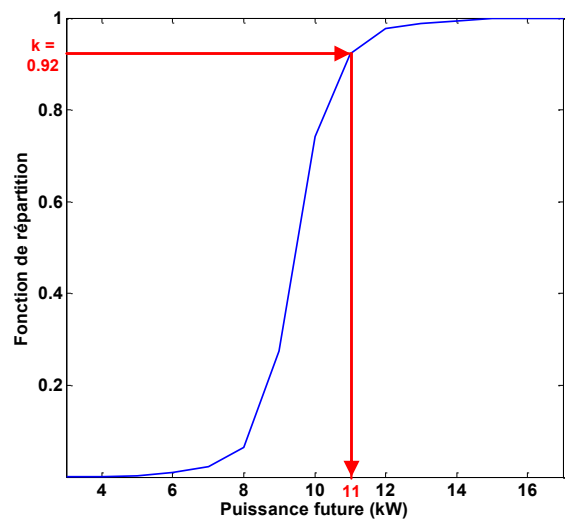


Figure 2.28 Fonction de répartition F_{38} avec $P_{sim}(t) = 10\text{kW}$ et $P_{sim}(t + \Delta t) = 11\text{kW}$ pour $k = 0.92$

2.5.2.2 Simulation de missions urbaines

L'algorithme précédent a permis de générer un ensemble de 1 000 profils de puissance simulés à partir du modèle de Markov de la mission urbaine. Le profil de puissance mesuré est rappelé en Figure 2.29 pour référence et trois exemples de profils simulés sont donnés en Figure 2.30, Figure 2.31 et Figure 2.32.

Les phases d'arrêt ou d'embouteillage visibles sur le profil de puissance mesuré, entre 41000 s et 43000 s par exemple, ne semblent pas être reproduites en simulation. Cette différence provient du fait qu'une phase d'arrêt nécessite une succession de transitions de la puissance nulle à elle-même. La probabilité de cette succession de transitions particulière est très faible car l'hypothèse de Markov veut qu'un état futur du processus temporel ne dépende que de l'état présent. En effet, même si la probabilité de rester dans l'état correspondant à un arrêt est de 90 %, la probabilité de tirer aléatoirement le même état futur soixante fois de suite vaut $0,9^{60}$ soit moins de 0,2 %.

Sur ces trois exemples de simulation, la valeur maximum de la puissance mesurée de 49,7 kW n'a pas été générée dans l'exemple n°2 alors qu'elle a été reproduite par deux fois dans l'exemple n°3. Ceci démontre la capacité du modèle de Markov à prendre en compte le comportement aléatoire du profil de puissance et à générer une infinité de scénarii possibles obéissant aux caractéristiques probabilistes identifiés lors de la modélisation.

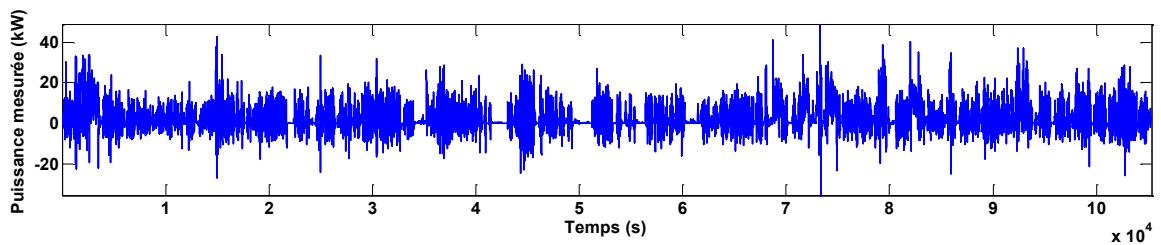


Figure 2.29 Profil de la puissance mesurée urbaine

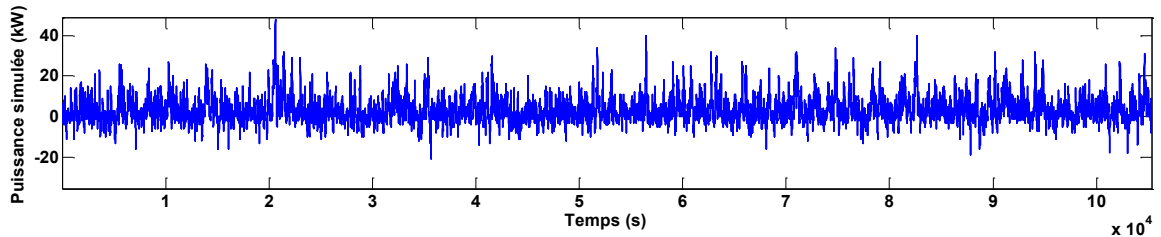


Figure 2.30 Exemple de profil de la puissance simulé n°1

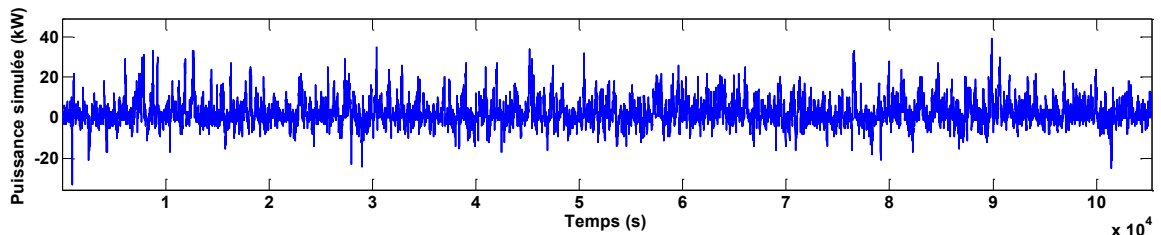


Figure 2.31 Exemple de profil de puissance simulé n°2

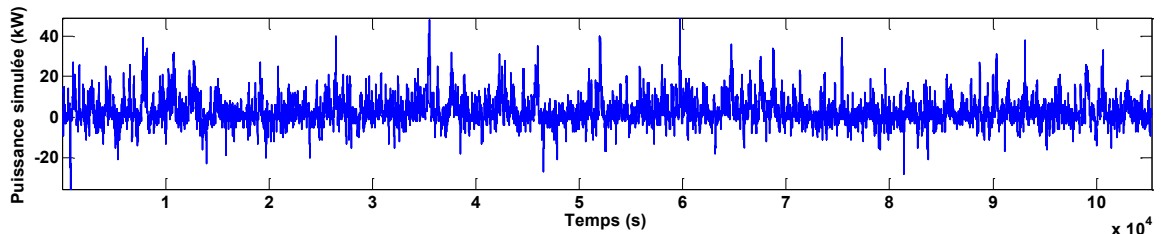


Figure 2.32 Exemple de profil de puissance simulé n°3

Sur les 1000 profils de puissance simulés, l'énergie consommée est comprise entre un minimum de 57,3 kWh et un maximum de 98,4 kWh. La moyenne de ces énergies est de 77,9 kWh, valeur comparable à l'énergie consommée de 79,4 kWh lors de la mission mesurée.

D'un point de vue statistique, la densité de probabilité de la puissance simulée est très proche de celle de la puissance réellement consommée, comme le montre la Figure 2.33. De même, l'ensemble des puissances reconstruites possède la même dynamique que la puissance issue des mesures. En effet, elles sont visiblement proches et la comparaison est appuyée par la Figure 2.34 où la dérivée des puissances simulées a la même répartition statistique que celle de la puissance calculée à partir des mesures.

Afin de bien visualiser la diversité des profils de puissance simulés par rapport à celui mesuré, les fonctions de répartition de trois exemples de simulation et celle de la mesure ont été superposées à l'enveloppe de l'ensemble des simulations décrite par les limites haute et basse de la probabilité à puissance donnée en Figure 2.35. Pour une meilleure visibilité, un agrandissement, présenté en Figure 2.36, a été effectué.

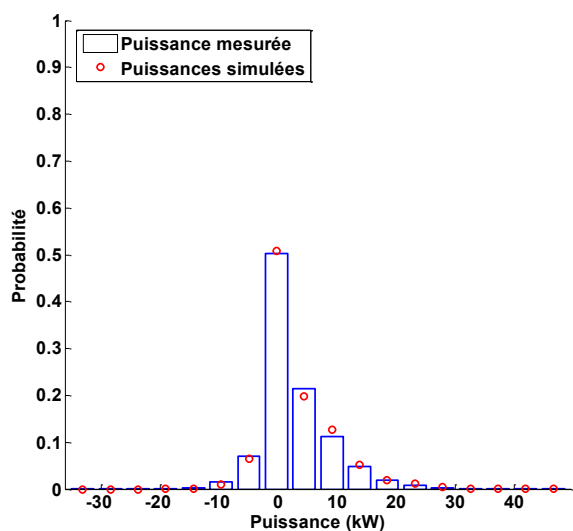


Figure 2.33 Histogramme des profils de puissance mesuré et simulés

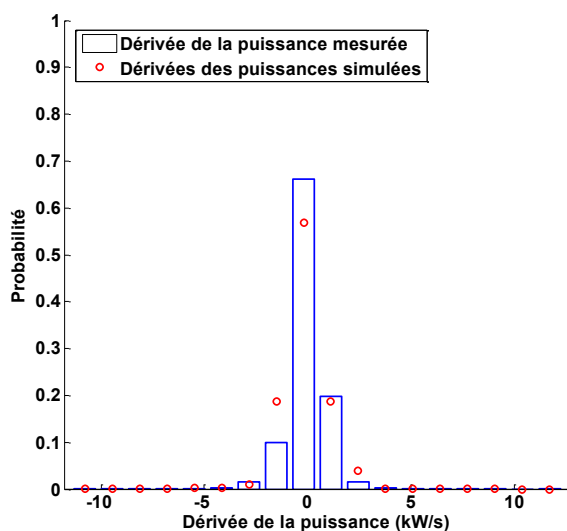


Figure 2.34 Histogramme des profils des dérivées de puissance mesuré et simulés

L'enveloppe des simulations englobe bien la mesure et les trois profils de puissance simulés 1, 2 et 3, donnés à titre d'exemple, sont bien distribués autour du profil de puissance calculé à partir des mesures. La probabilité que la puissance sur chacun des 1000 profils simulés soit inférieure ou égale à 10 kW est comprise entre 88 % et 93 %.

Afin de comparer les profils de puissance simulés par rapport à ceux des standards, leurs fonctions de répartition sont présentées en Figure 2.37 avec un agrandissement en Figure 2.38. Ces graphiques sont composés des probabilités cumulées de quatre types de données : le cycle standard ECE, le cycle Artemis urbain, la mission urbaine mesurée et l'enveloppe de l'ensemble des simulations. Pour des puissances positives, la limite haute de l'enveloppe se rapproche de la caractéristique du standard ECE alors que la limite basse rejoint presque le cycle Artemis. Le cycle Artemis se démarque par de plus fortes probabilités pour les puissances négatives élevées.

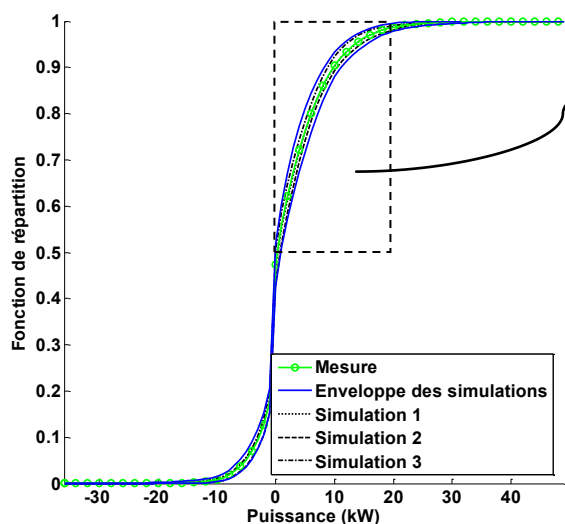


Figure 2.35 Fonctions de répartition de trois exemples de simulation urbaine

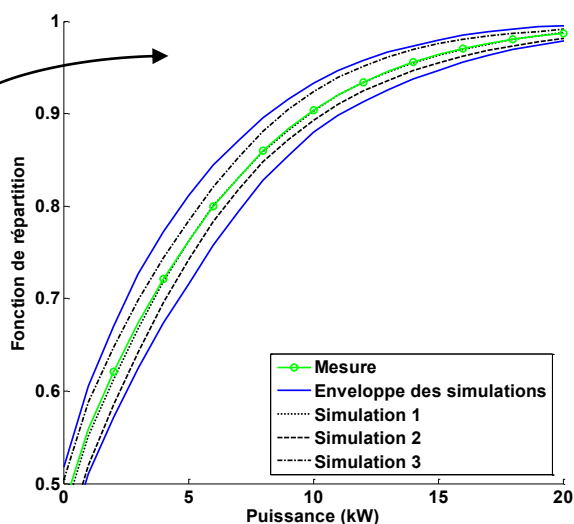


Figure 2.36 Agrandissement des fonctions de répartition de trois exemples de simulation urbaine

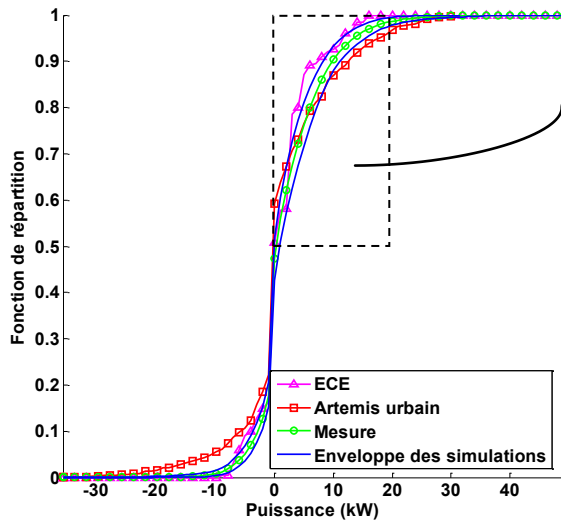


Figure 2.37 Fonctions de répartition des profils de puissance urbains

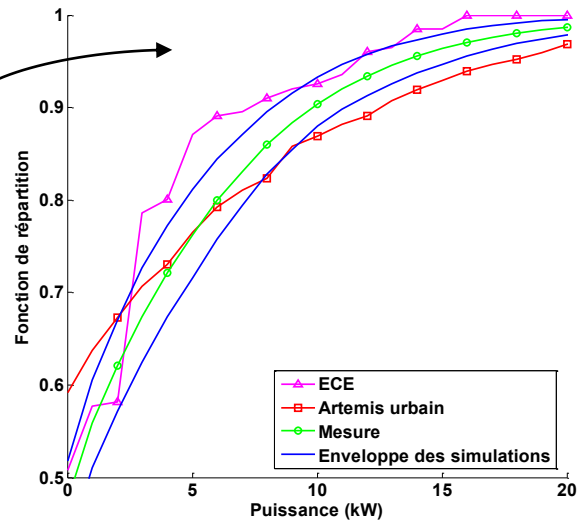


Figure 2.38 Agrandissement des fonctions de répartition des profils de puissance urbains

2.5.2.3 Simulation de missions extra-urbaines

De la même manière, un ensemble de 1 000 profils de puissance a été généré à partir du modèle de Markov de la mission extra-urbaine. Le profil de puissance mesuré est représenté en Figure 2.39 pour référence et trois exemples de profils simulés sont donnés en Figure 2.40 à Figure 2.42. Le caractère aléatoire des simulations obtenues à partir du modèle de Markov est bien retrouvé dans ces exemples.

En termes d'énergies consommées sur les 1000 profils de puissance simulés, la valeur minimum vaut 131,1 kWh et la maximum 193,0 kWh. La moyenne des énergies consommées est de 159,4 kWh, valeur comparable à l'énergie consommée lors de la mission mesurée qui vaut 160,2 kWh.

En termes statistiques, l'histogramme des puissances simulées dans leur ensemble montre en Figure 2.43 une bonne concordance avec l'histogramme de la puissance mesurée. De même, en termes de dynamique de la puissance, l'histogramme des dérivées de puissance simulée est assez proche de celui des mesures comme le montre la Figure 2.44.

Les fonctions de répartition des missions extra-urbaines montrent une dispersion plus grande sur la Figure 2.45 que les missions urbaines. Alors que l'enveloppe des simulations urbaines englobait quasiment les missions européennes et Artemis urbaines, celle des simulations extra-urbaines n'englobe pas les standards extra-urbains. En effet, comme déjà illustré dans la Figure 2.14, les probabilités sont plus grandes sur les faibles puissances pour les standards.

D'après la Figure 2.46, la simulation 1 est en bonne concordance avec la mesure ce qui montre que le modèle de Markov permet de reproduire la mission mesurée de manière satisfaisante. Les simulations 2 et 3 quant à elles montrent des exemples de missions réalistes possibles présentant une répartition des puissances demandées plus ou moins proche de la puissance calculée à partir de la mesure.

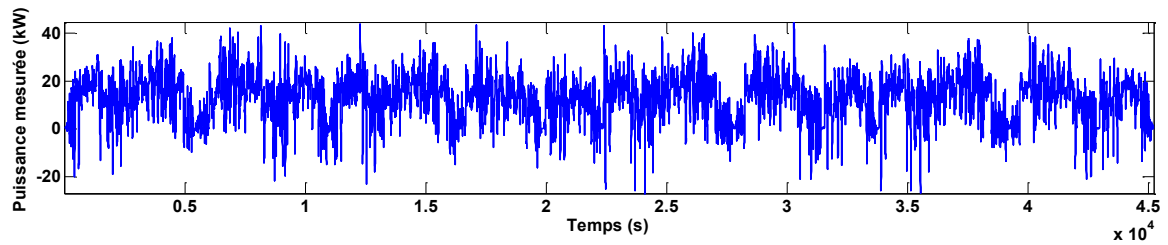


Figure 2.39 Profil de la puissance mesurée extra-urbaine

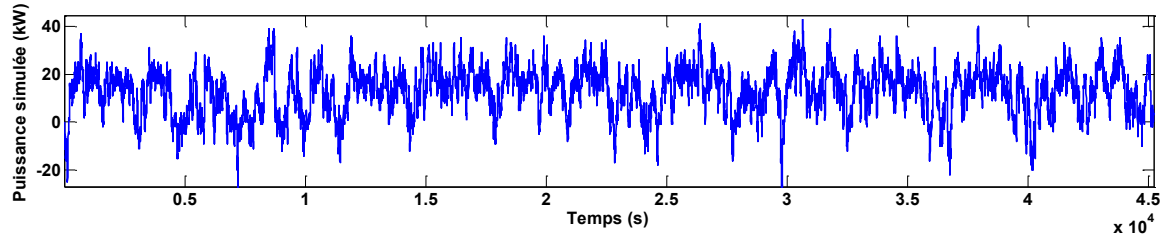


Figure 2.40 Exemple de profil de la puissance simulé n°1

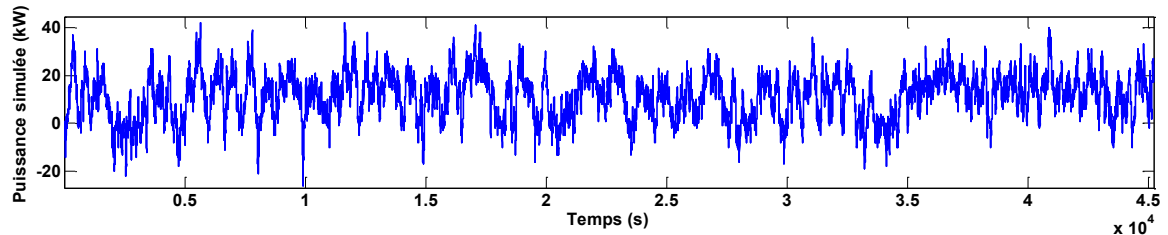


Figure 2.41 Exemple de profil de la puissance simulé n°2

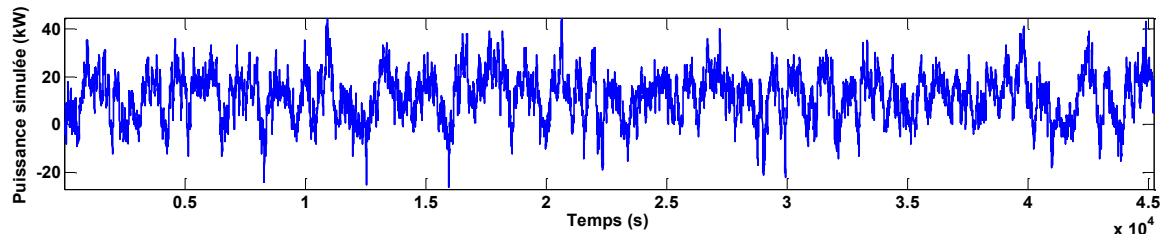


Figure 2.42 Exemple de profil de la puissance simulé n°3

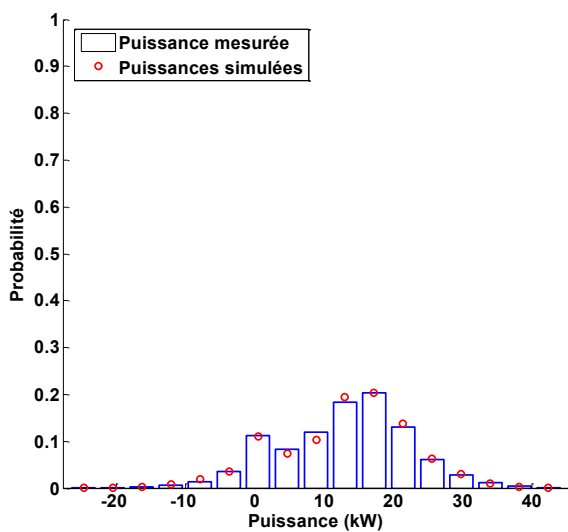


Figure 2.43 Histogramme des profils de puissance mesuré et simulés

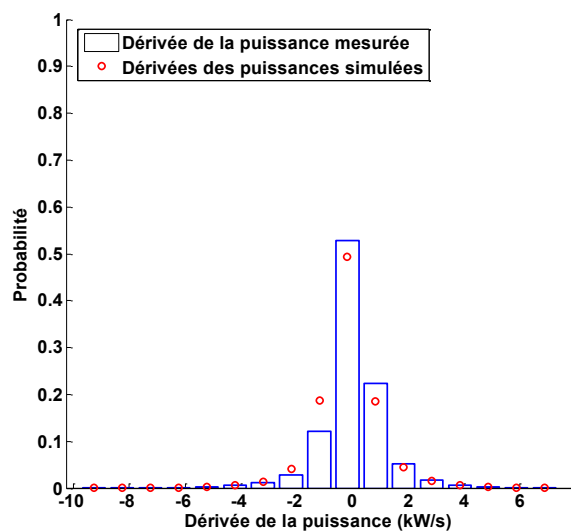


Figure 2.44 Histogramme des profils des dérivés de puissance mesuré et simulés

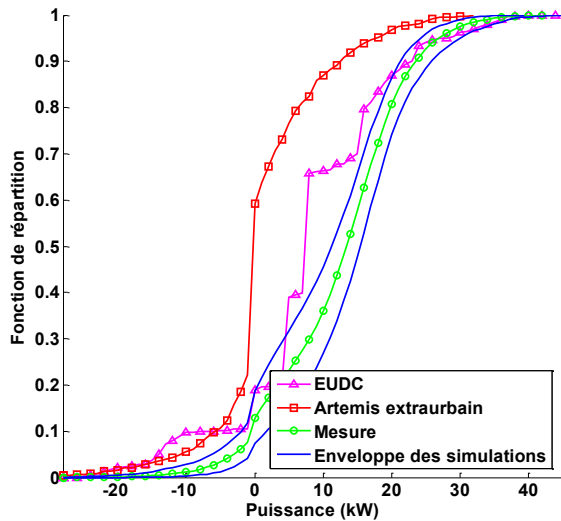


Figure 2.45 Fonctions de répartition des profils de puissance extra-urbains

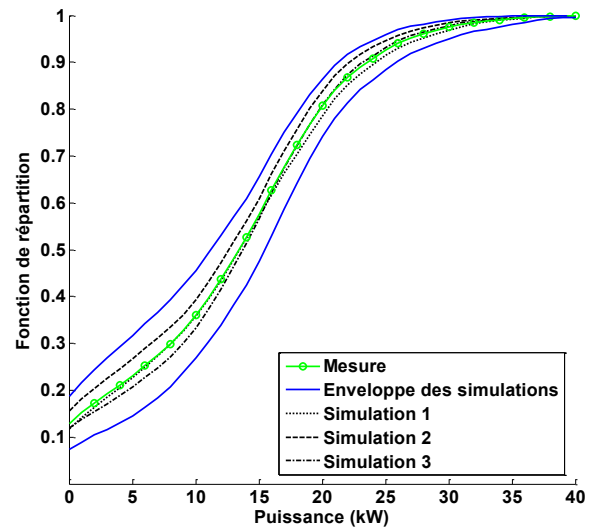


Figure 2.46 Fonctions de répartition de trois exemples de simulation extra-urbaine avec agrandissement

2.5.3 CONCLUSION SUR LA MODELISATION DU PROFIL DE PUISSANCE

La modélisation par matrice de Markov permet de générer un nombre infini de profils de puissance respectant les propriétés statistiques du profil issu des mesures. Ainsi il est possible de créer artificiellement et rapidement une base de données contenant un grand nombre de profils différents mais ayant des caractéristiques stochastiques communes. Ces profils peuvent utilement être employés pour dimensionner la chaîne de traction en intégrant une certaine diversité dans l'usage possible du véhicule.

Cependant, ce modèle implique de fixer la masse du véhicule pour en déduire le profil de puissance à modéliser. Or la masse dépend directement du dimensionnement des composants de la chaîne de traction. Cela signifie qu'une hypothèse doit être faite sur le dimensionnement et donc la masse pour mettre en œuvre ce modèle de l'usage du véhicule. Or nous souhaitons nous affranchir de ce choix a priori.

Une solution est de conserver dans le modèle toutes les informations de la mission du véhicule, à savoir les trois profils de vitesse, accélération et inclinaison de la route. Ainsi, le profil de puissance pourra être mis à jour en fonction du dimensionnement des composants comme le montre la Figure 2.47 suivante.

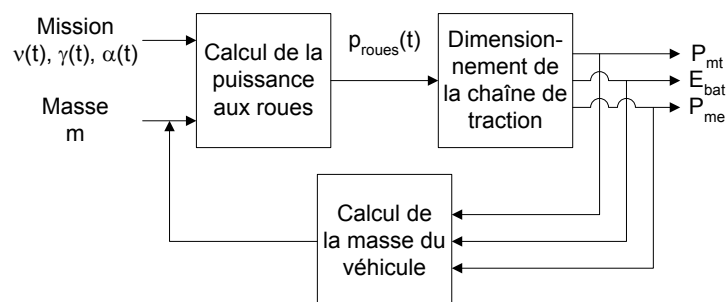


Figure 2.47 Mise à jour de la masse du véhicule en fonction du dimensionnement

2.6 MODELISATION DE LA MISSION DU VEHICULE

Les limites de la modélisation du profil de puissance ont été démontrées. Ainsi, nous proposons une nouvelle modélisation de la mission d'un véhicule, composée des trois variables {vitesse ; accélération ; inclinaison} corrélées entre elles, se basant sur la même formulation de Markov. Ce modèle nécessite la redéfinition de la notion d'état : précédemment, un état de la matrice correspondait à une valeur de la puissance P_i . Maintenant, un état est défini par le trio $\{v_i ; \gamma_i ; \alpha_i\}$.

Une possibilité aurait été de modéliser chacune des trois variables par une matrice de Markov séparée. Cependant, la corrélation entre les variables n'aurait pu être reproduite à la simulation. Grâce à la présente formulation, un état improbable tel que {haute vitesse ; faible accélération ; forte inclinaison positive} ne pourra donc pas survenir sur un trajet autoroutier.

A notre connaissance, cette modélisation n'a pas été traitée dans la littérature sous la présente forme. En effet, des variantes ont été présentées dans le paragraphe 1.3.2.3 du Chapitre 1, mais aucune ne prenait en compte l'inclinaison de la route.

2.6.1 CHOIX DU NOMBRE D'ETATS DE LA MODELISATION

La modélisation d'une chaîne de Markov composée de trois variables nécessite une étude plus approfondie du nombre de classes, correspondant au nombre d'états du modèle, à déterminer pour chacune des variables. En effet, le nombre de classes doit être un compromis entre précision et légèreté du modèle.

Dans un premier temps, la résolution des mesures de la mission nous permet de déterminer le nombre maximal d'états par variable. En effet, un nombre d'états élevé ne serait pas cohérent avec une mauvaise résolution sur la variable.

- ◆ Les mesures de la vitesse relevées à l'aide du GPS ont une résolution de 0,01 km/h. La plage de variation de la vitesse allant de 0 à 130 km/h, le nombre de classes maximal $nb_{vit_{max}}$ est donc :

$$nb_{vit_{max}} = \frac{130}{0,01} = 13000$$

- ◆ En ce qui concerne la résolution de la variable accélération, celle-ci étant calculée à partir de la vitesse, elle dépend de la résolution de la vitesse : 0,01 km/h soit 0,003 m/s. Les mesures étant effectuées toutes les secondes, la résolution de l'accélération est de 0,003 m/s². La plage de variation variant de -2 à 2 m/s², le nombre maximal de classes est donc :

$$nb_{acc_{max}} = \frac{4}{0,003} = 1440$$

- ♦ La résolution sur l'angle d'inclinaison de la route dépend de la résolution des mesures d'altitude, soit 0,1 m. Le calcul de l'angle est effectué à partir de l'altitude interpolée sur une base de 100 m, et le résultat est converti en pourcent :

$$\alpha_{(\%) } = \left(\frac{diff(alt)}{100} \right) * 100$$

La résolution de l'altitude est donc de 0,1 m. La plage de variation de l'angle d'inclinaison allant de -6 à 6 %, le nombre maximal de classes est donc :

$$nb_{inc_{max}} = \frac{12}{0,1} = 120$$

Dans un second temps, un plan d'expérience est effectué pour déterminer les nombres de classes optimaux en fonction de l'erreur relative en termes de puissance. Cette erreur est calculée entre le profil en puissance déterminé à partir des mesures, et le profil calculé à partir des variables échantillonnées, c'est-à-dire prenant en compte l'erreur introduite par la mise en classes des trois variables. Le critère de choix a été établi sur 3 facteurs :

- 1) l'erreur relative en puissance maximale engendrée par ce classement : $\leq 3 \%$
- 2) l'erreur relative en puissance moyenne : $\leq 1 \%$
- 3) le nombre d'états possible : minimisation pour un modèle le plus léger possible

D'après ce plan d'expérience, les nombres de classes optimaux pour la mission urbaine sont les suivants :

$$nb_{vit_{urbain}} = 40 \text{ (pas de 3,25 km/h)} ; nb_{acc_{urbain}} = 80 ; nb_{inc_{urbain}} = 50$$

Théoriquement, il y aurait donc $40 \times 80 \times 50 = 160\,000$ états possibles. Cependant seuls les états apparaissant au cours de la mission mesurée sont utiles à la modélisation. Leur nombre peut donc être réduit à 19 805 états soit une diminution de 88 %.

Concernant la mission extra-urbaine, les nombres de classes optimaux sont les suivants :

$$nb_{vit_{extra-urbain}} = 50 ; nb_{acc_{extra-urbain}} = 80 ; nb_{inc_{extra-urbain}} = 50$$

Théoriquement, il y aurait donc $50 \times 80 \times 50 = 200\,000$ états possibles. En ne considérant que les états apparaissant au cours de la mission mesurée, ce nombre est restreint à 12 800 états soit une réduction de 94 %.

Cette étude pour le choix du nombre d'états de la modélisation mériterait d'être conduite en prenant en compte la précision plutôt que la résolution des mesures.

2.6.2 APPLICATION AUX MISSIONS MESUREES

Maintenant que les nombres d'états ont été définis pour chacune des missions, les matrices de Markov sont construites sur le même principe que précédemment à l'exception près qu'un état représente maintenant le trio de variables de la mission et non plus la puissance consommée. Quelques correspondances entre l'indice de l'état et les trois variables sont présentées dans le Tableau 2.6.

Le modèle obtenu pour la mission urbaine est donc une matrice de Markov carrée $19\,805 \times 19\,805$. Celle-ci cartographie le passage de l'état présent, caractérisé par le trio $\{v_i; \gamma_i; \alpha_i\}$, à l'état futur $\{v_j; \gamma_j; \alpha_j\}$. L'inter-corrélation entre ces variables est donc bien préservée.

La Figure 2.48 présente la matrice de Markov modélisant la mission urbaine. Elle a été réduite à une matrice d'une centaine d'états pour une meilleure lisibilité. Ici, l'allure de la matrice dépend grandement de l'arrangement des états dans la table de correspondance et non plus de la continuité des variables. Cependant, la structure de la matrice observe une allure diagonale ce qui signifie que le système transite vers des états voisins ou reste dans le même.

Tableau 2.6 Définition des états de la mission urbaine

Indice de l'état	Vitesse (km/h)	Accélération (m/s ²)	Inclinaison (%)
1	0.00	-0.32	-4.91
2	0.00	-0.32	-4.71
3	0.00	-0.28	-4.91
4	0.00	-0.28	-4.71
5	0.00	-0.28	-4.50
6	0.00	-0.21	-4.91
7	0.00	-0.21	-4.50
8	0.00	-0.21	-3.67
⋮	⋮	⋮	⋮
2536	0.00	0.00	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮
4478	49.05	-1.05	-1.17
⋮	⋮	⋮	⋮
15589	89.93	-0.28	0.49
⋮	⋮	⋮	⋮
19802	109.01	0.21	-0.13
19803	109.01	0.25	-0.13
19804	109.01	0.29	-0.13
19805	109.01	0.33	-0.13

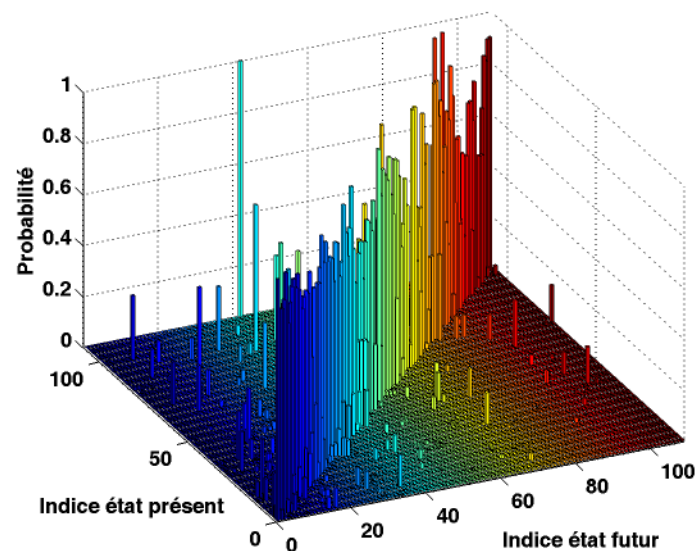


Figure 2.48 Matrice de Markov de la mission urbaine réduite à cent états

2.6.3 SIMULATIONS ET ANALYSES DU MODELE

2.6.3.1 Algorithme de simulation

La simulation d'une mission aléatoire est réalisée grâce à un algorithme très similaire au précédent et présenté en Figure 2.49. Connaissant l'état présent i , l'état futur j est tiré aléatoirement à partir de la fonction de répartition inverse F_i^{-1} issue de la matrice de Markov. Les valeurs de {vitesse ; accélération ; inclinaison} correspondantes sont enregistrées et le processus est répété jusqu'à obtenir le temps de simulation désiré. Une phase supplémentaire, non incluse dans cet algorithme, sera alors nécessaire pour obtenir le profil de puissance correspondant à la mission simulée pour une masse de véhicule donnée.

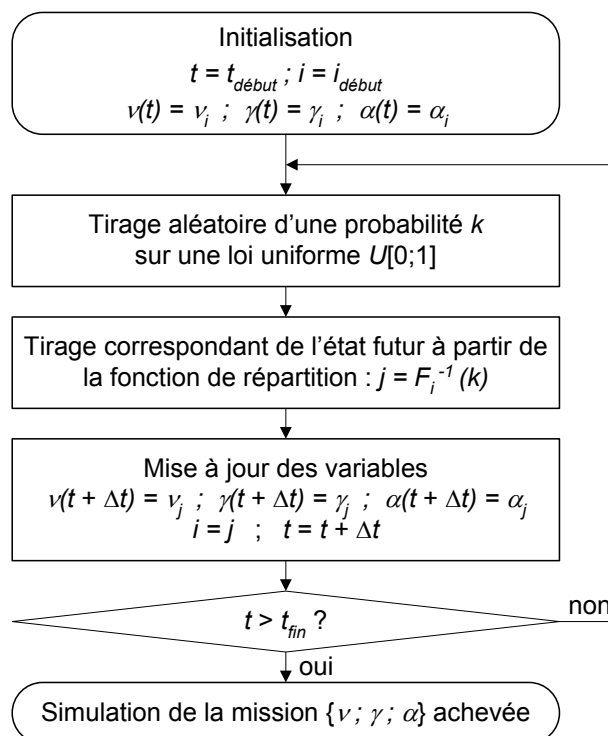


Figure 2.49 Algorithme de simulation d'une mission aléatoire

2.6.3.2 Simulation de missions urbaines

L'algorithme précédent a permis de simuler un ensemble de 1000 missions urbaines à partir de la matrice de Markov modélisant la mission mesurée. Contrairement à la modélisation du profil de puissance au paragraphe 2.5.2.2 dans laquelle la durée de la mesure avait été conservée pour les simulations, ici la durée de simulation a été fixée à 20 minutes. En effet, c'est un temps moyen admis pour une mission urbaine.

Un exemple de mission simulée est présenté en Figure 2.50. Le profil de vitesse respecte bien l'ordre de grandeur de la vitesse d'un véhicule en milieu urbain. Contrairement à l'observation faite lorsque seul le profil de puissance était modélisé par une matrice de Markov,

des phases d'arrêts sont bien reproduites en simulation. Le profil d'accélération simulé a été superposé au profil calculé à partir de la vitesse simulée afin de valider le respect de la corrélation des variables par le modèle. La légère différence entre les deux profils d'accélération provient de la différence entre la résolution du profil de vitesse et celle du profil d'accélération simulée. Enfin, le profil de la puissance aux roues a été déduit des profils des trois variables de la mission.

En termes statistiques, la densité de probabilité des puissances simulées, tous profils confondus, est très proche de celle de la puissance réellement consommée, comme le montre la Figure 2.51. De plus, les puissances reconstruites possèdent la même dynamique que la puissance issue des mesures. En effet, la dérivée des puissances simulées a les mêmes caractéristiques stochastiques que la puissance calculée à partir des mesures comme observé en Figure 2.52. Par comparaison aux simulations issues de la modélisation du profil de puissance, ces résultats montrent une meilleure représentation de la puissance avec la modélisation de la mission du véhicule composée des trois variables.

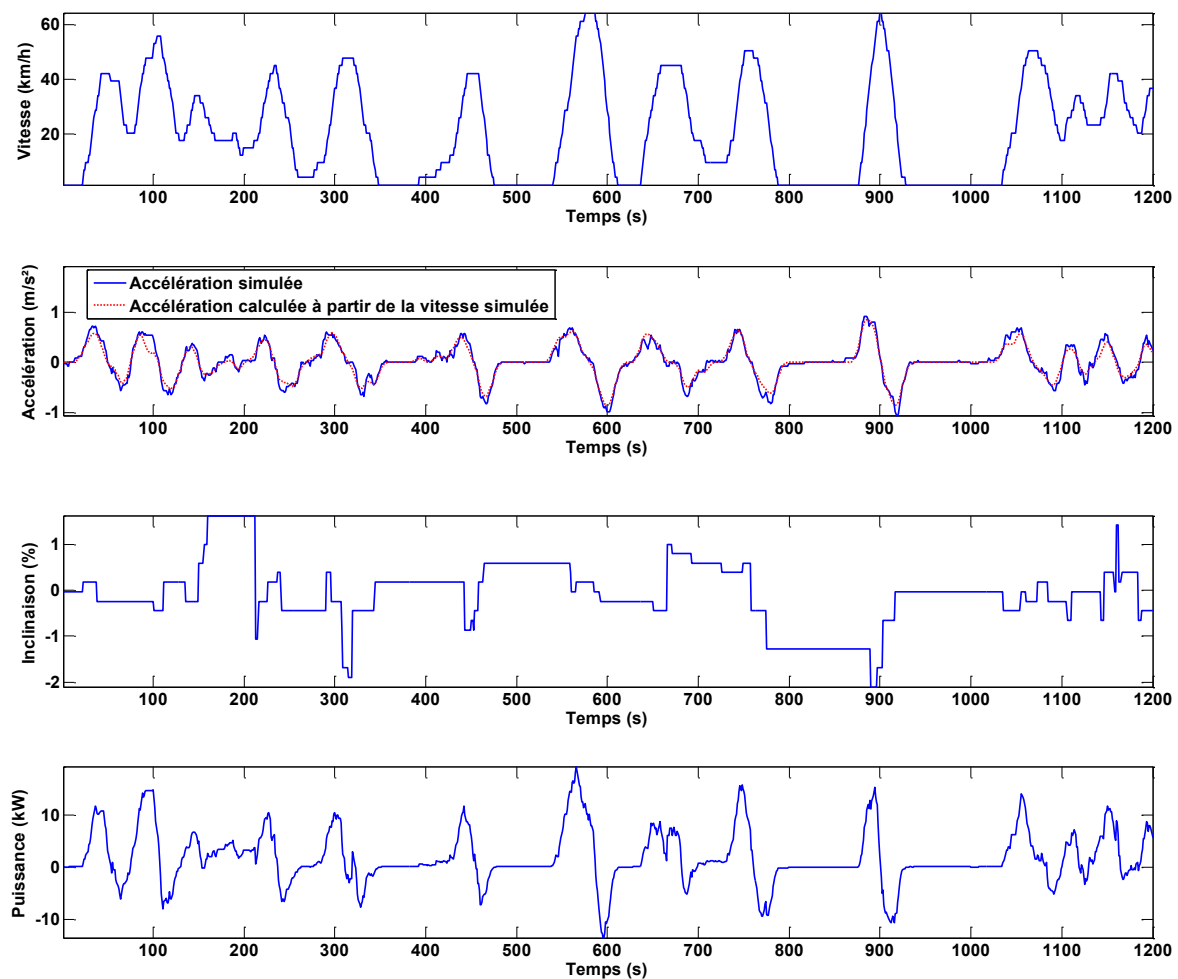


Figure 2.50 Exemple de mission urbaine simulée

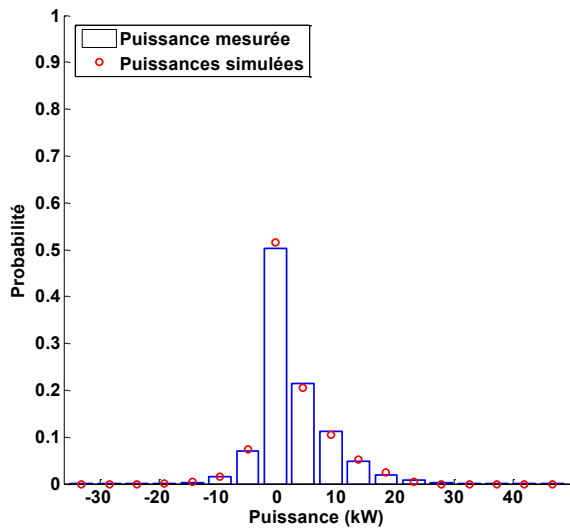


Figure 2.51 Histogramme des profils de puissance urbaine mesurée et simulés

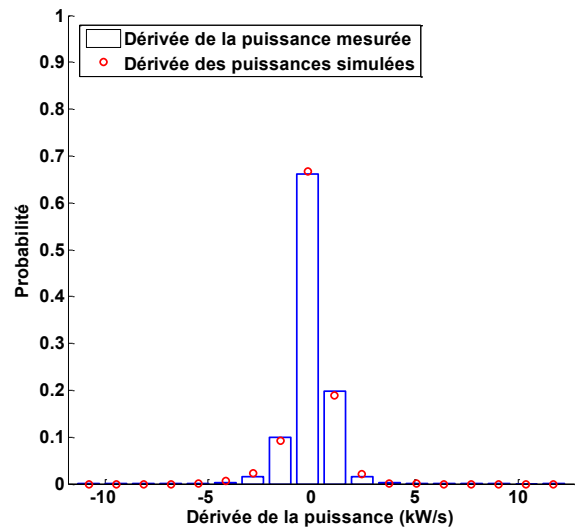


Figure 2.52 Histogramme des profils des dérivés de puissance urbaine mesurée et simulés

Comme démontré précédemment, les missions simulées sont proches de la mission mesurée en termes de probabilités de puissance. Le modèle de Markov permet donc de reproduire des missions proches de la mesure mais aussi d'augmenter la base de données avec des missions réalistes quoique non mesurées.

Afin d'avoir un aperçu de la diversité des profils simulés, les fonctions de répartition relatives à la vitesse du véhicule sont présentées en Figure 2.58. Cette figure est composée de trois types de données : les standards ECE et Artemis urbain, la mesure réalisée en condition de conduite réelle et les profils simulés. Concernant les simulations, trois exemples de missions sont donnés et l'enveloppe des 1000 missions est décrite par les limites haute et basse en trait plein. Ces limites permettent de déclarer que la probabilité qu'une vitesse simulée soit inférieure ou égale à 90 km/h est comprise entre 0,9 et 1.

D'après cette figure, les profils de vitesse des standards sont distribués différemment par rapport au profil de vitesse mesuré. Celle-ci présente moins de vitesses nulles et plus de vitesses supérieures à 50 km/h. Cependant les limites des simulations enveloppent les standards. Concernant les trois exemples de mission, la simulation 1 est très proche de la mesure alors que les profils de vitesse fournis par les simulations 2 et 3 sont bien distribués autour de la vitesse mesurée.

Une même analyse peut être effectuée à propos des fonctions de répartition des profils en puissance représentées en Figure 2.59. La simulation 1 est quasiment confondue avec la mesure ce qui montre bien que le modèle de Markov permet de reproduire la mission mesurée. Quant aux simulations 2 et 3, elles montrent des exemples possibles de missions réalistes demandant plus ou moins les mêmes valeurs de puissance que la mission réelle.

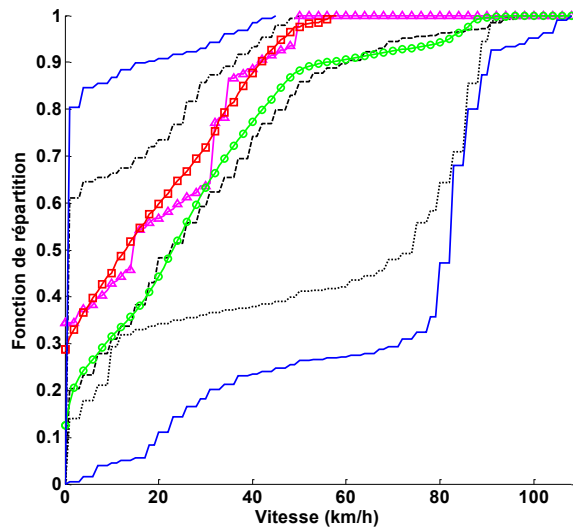


Figure 2.53 Fonctions de répartition des profils de vitesse urbains

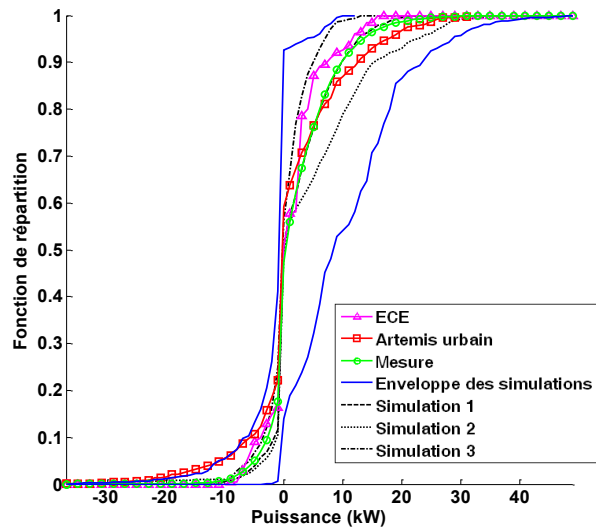


Figure 2.54 Fonctions de répartition des profils de puissance urbains

2.6.3.3 Simulation de missions extra-urbaines

De manière similaire, le même processus de simulation a été appliqué à la mission extra-urbaine et un ensemble de 1000 missions a été généré.

Un exemple de mission simulée est présenté en Figure 2.55. Une première remarque concerne l'allure des profils de vitesse, accélération et inclinaison qui sont cohérents avec les profils mesurés (Figure 2.9 à Figure 2.11). En effet, les accélérations les plus importantes sont retrouvées pour des vitesses urbaines et routières sur la plage allant de 2000s à 2500s, alors qu'elles sont faibles sur autoroute entre 3400s et 4700s par exemple. De plus, la puissance aux roues calculée à partir de cette mission présente le même intervalle de valeurs que la puissance calculée à partir des mesures GPS.

La puissance calculée à partir des trois variables $\{v; \gamma; \alpha\}$ simulées précédemment a les mêmes propriétés statistiques que la puissance calculée à partir des mesures GPS, comme le montre la Figure 2.56. De plus, la dynamique de la puissance est respectée en termes de dérivée de puissance puisque les histogrammes sont quasiment confondus en Figure 2.57.

L'étude des fonctions de répartition en termes de vitesse sur la Figure 2.58 et de puissance sur la Figure 2.59 montre une même capacité du modèle de Markov à reproduire les profils mesurés et à augmenter la base de données avec des profils réalistes. En effet les trois exemples de simulations sont bien répartis autour de la mesure et les enveloppes englobent quasiment les caractéristiques des cycles de conduite standards.

Finalement, l'Annexe B présente la corrélation entre les trois variables de la mission mesurée. La conservation de cette corrélation grâce au modèle de Markov est bien validée sur un exemple de mission simulée.

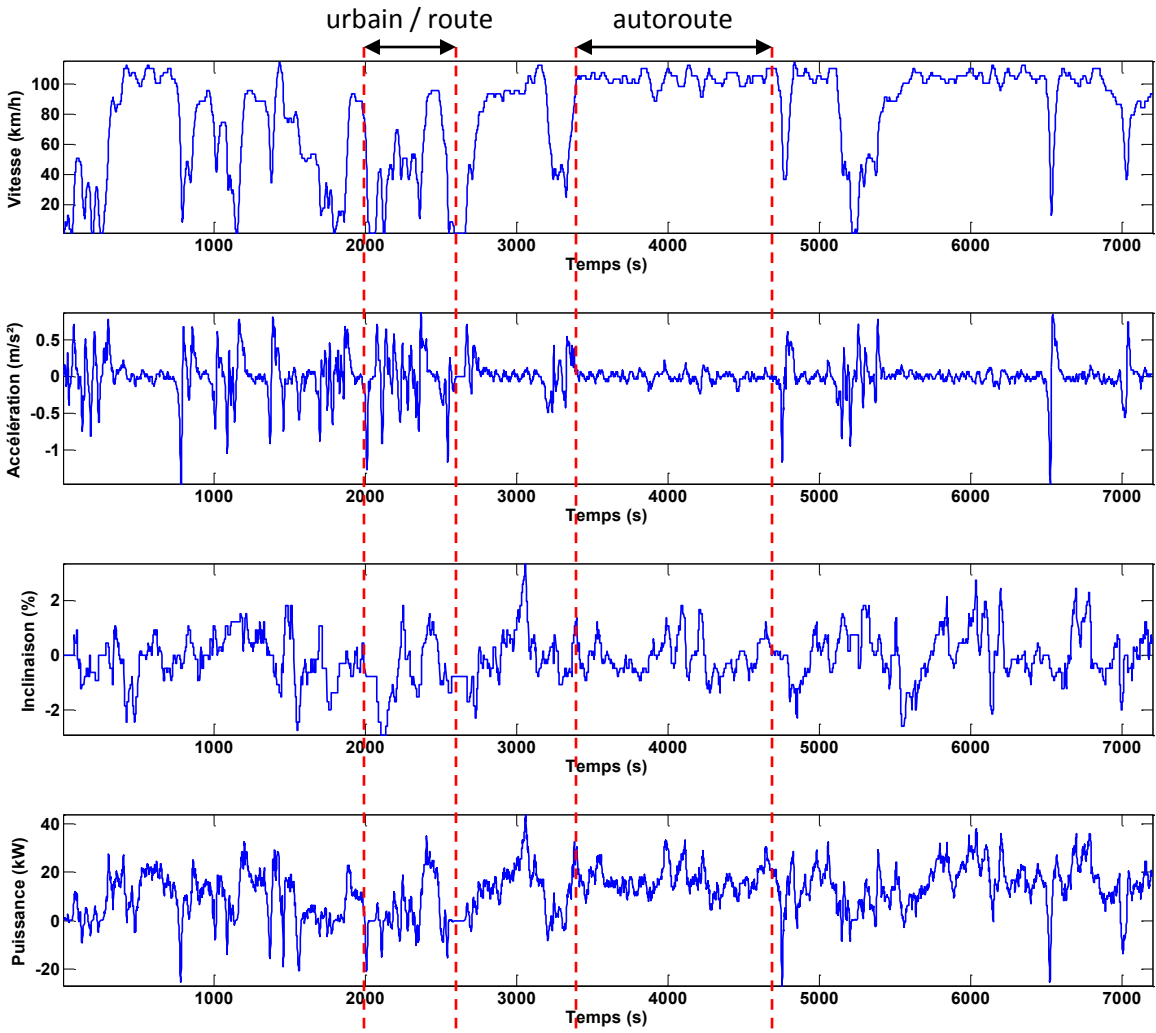


Figure 2.55 Exemple de mission extra-urbaine simulée

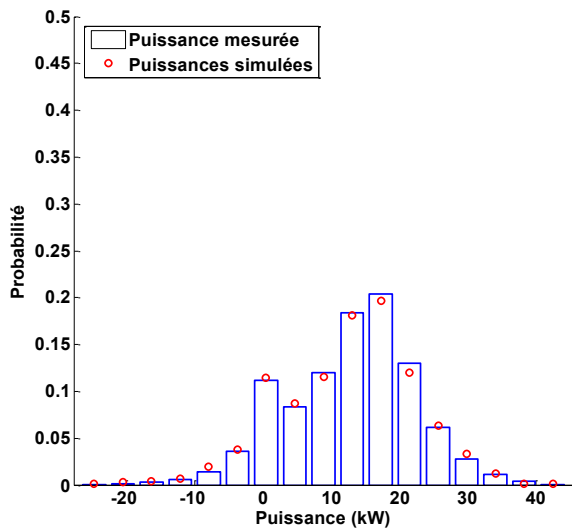


Figure 2.56 Histogramme des profils de puissance extra-urbaine mesuré et simulés

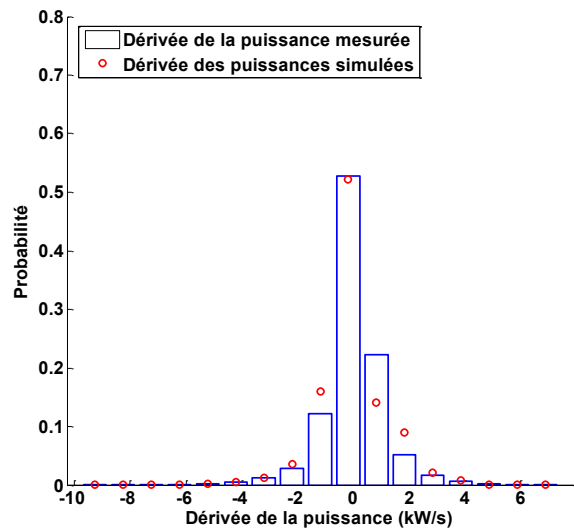


Figure 2.57 Histogramme des profils des dérivés de puissance extra-urbaine mesuré et simulés

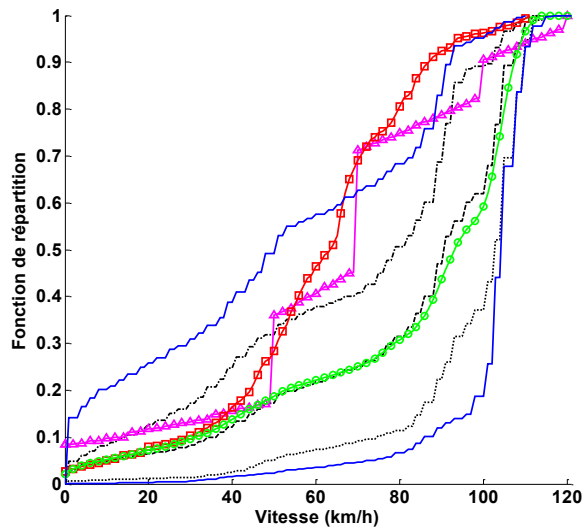


Figure 2.58 Fonctions de répartition des profils de vitesse urbains

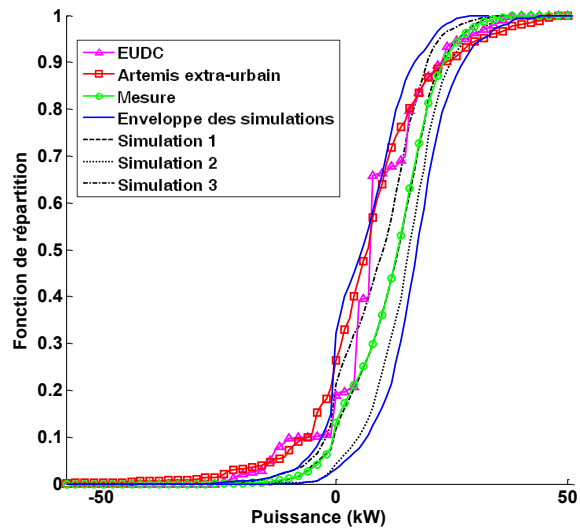


Figure 2.59 Fonctions de répartition des profils de puissance urbains

2.6.4 SYNTHÈSE DE LA MODÉLISATION DE LA MISSION D'UN VÉHICULE

Les résultats précédents ont démontré la capacité du modèle de Markov à simuler des missions de véhicule propres aux types de conduite en milieux urbain et extra-urbain. Afin de compléter cette analyse, la distribution des différentes missions en fonction des potentiels d'hybridation de puissance PHP et d'énergie PHE est illustrée en Figure 2.60. Pour chacun des types de mission, trois catégories de mission sont décrites : l'ensemble des 1000 missions simulées, la mission mesurée dans son entier et l'ensemble des trajets composants la mission mesurée. Cette figure requiert plusieurs remarques.

Dans un premier temps, les deux types de mission se distinguent assez bien l'un de l'autre. Les missions urbaines présentent des potentiels d'hybridation plus élevés sur les plans puissance et énergie. Cependant, quelques missions urbaines sont proches de certaines missions extra-urbaines simulées ce qui rend la limite entre les deux difficile à établir précisément.

Dans un deuxième temps, la comparaison entre les potentiels d'hybridation des trois types de mission (trajet mesuré, mission mesurée et mission simulée) est intéressante. D'une part, concernant les missions extra-urbaines, les potentiels d'hybridation des missions simulées sont du même ordre de grandeur que ceux de la mesure dans son entier ou découpée en trajets. D'autre part, concernant les missions urbaines, les PHP des simulations respectent aussi le même ordre de grandeur que ceux de la mission mesurée et des trajets. Quant aux PHE , leurs valeurs pour les trajets et les simulations sont à peu près dans la même plage de variation, cependant le PHE de la mission mesurée est très faible comparé aux potentiels d'hybridation énergétique des trajets, comme expliqué dans la partie précédente 2.2.3. En effet, certains trajets semblent moins bien reproduits en simulation car leur durée est sensiblement supérieure ou inférieure à celle fixée à vingt minutes pour les simulations. La durée de la mission semble donc être un paramètre important à prendre en compte.

Dans un dernier temps, les missions mesurées semblent ne pas être les plus « dimensionnantes ». En effet, un certain nombre de missions simulées sont plus contraignantes, avec des potentiels d'hybridation moins favorables. Ceci souligne l'intérêt du processus de simulation de missions du véhicule dans le cadre d'une étude de conception d'un véhicule hybride.

Pour conclure, la modélisation d'une mission par matrice de Markov permet non seulement de générer un nombre infini de missions réalistes et ainsi d'augmenter la base de données utile pour le dimensionnement d'un véhicule, mais aussi de conserver la corrélation entre les trois variables {vitesse ; accélération ; inclinaison} permettant d'intégrer la masse du véhicule, variant en fonction de son dimensionnement, dans le calcul de la puissance aux roues. Une perspective serait de prendre en compte le caractère aléatoire de la durée de la mission en la caractérisant par une loi probabiliste et en générant des missions de durées aléatoires.

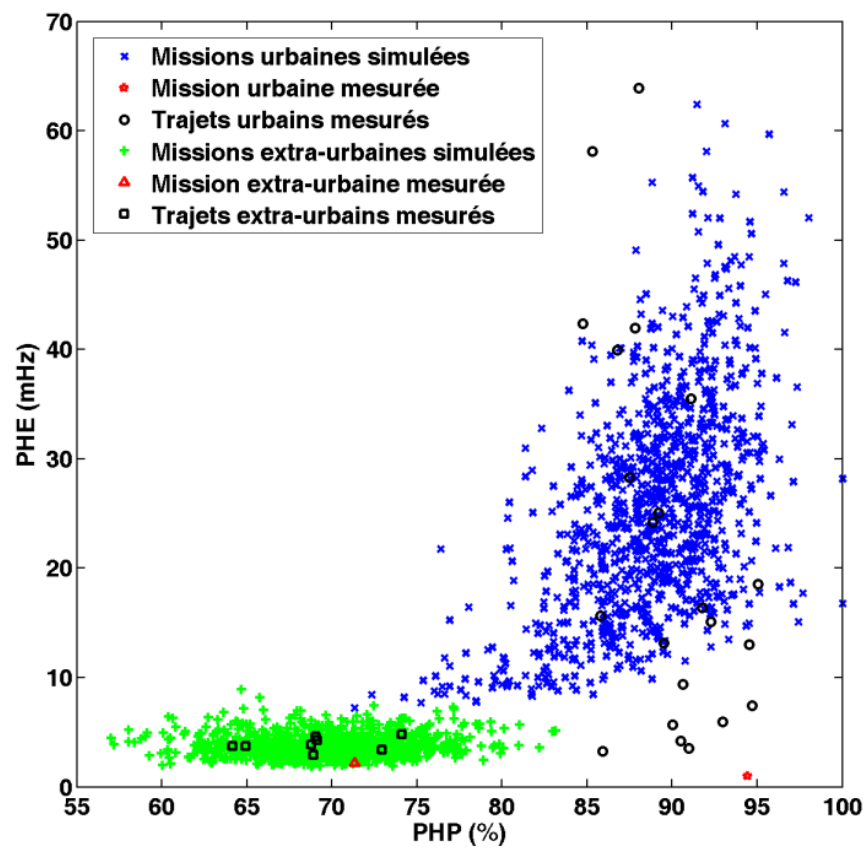


Figure 2.60 Distribution des missions en fonction de leurs potentiels d'hybridation

2.7 CONCLUSION

Ce chapitre propose une méthode de modélisation de la mission d'un véhicule à l'aide de la matrice de Markov.

Deux types de missions ont été considérés : urbaine pour une auto-école et extra-urbaine avec des trajets St Nazaire - Rennes. Une campagne de mesures réalisée avec un dispositif GPS a permis de recueillir une base de données intéressante et statistiquement représentative pour le processus de modélisation.

Le modèle choisi repose sur la matrice de Markov et permet de conserver les caractéristiques stochastiques de la mission ainsi que la corrélation entre les variables {vitesse ; accélération ; inclinaison}. Ce modèle est assez simple de mise en œuvre et occupe un espace restreint en termes de mémoire malgré la complexité de la mission d'un véhicule à modéliser.

Le processus de simulation permet d'augmenter la base de données mesurée avec des missions réalistes. Le millier de simulations, urbaines et extra-urbaines, ainsi effectuées seront soumises au modèle du véhicule afin de calculer sa consommation de carburant dans le Chapitre 3 et utilisées dans le cadre du dimensionnement d'un véhicule hybride dans le Chapitre 4.

CHAPITRE 3

MODELE D'UN VEHICULE POUR SON DIMENSIONNEMENT

Chapitre 3 Modèle d'un véhicule pour son dimensionnement 89

3.1	Introduction.....	91
3.2	Modélisation du véhicule	92
3.2.1	<i>Variables d'entrée et de sortie du modèle</i>	<i>92</i>
3.2.1.1	Choix du critère d'optimisation pour le dimensionnement.....	92
3.2.1.2	Variables d'optimisation et données d'entrée du modèle	93
3.2.1.3	Modèle du véhicule	93
3.2.2	<i>Approche par les flux de puissance.....</i>	<i>94</i>
3.2.2.1	Choix de la modélisation	94
3.2.2.2	Notations.....	95
3.2.2.3	Exemples de modélisation par les flux de puissance	96
3.3	Modèles génériques adimensionnels des composants.....	98
3.3.1	<i>Modèle de la batterie.....</i>	<i>98</i>
3.3.1.1	Généralités sur la batterie	98
3.3.1.2	Les technologies de batterie	100
3.3.1.3	Choix de la technologie batterie	101
3.3.1.4	Modèle générique adimensionnel de la batterie	102
3.3.2	<i>Modèle de la machine électrique</i>	<i>104</i>
3.3.2.1	Généralités sur la machine électrique	104
3.3.2.2	Les technologies de machines électriques.....	104
3.3.2.3	Modèle générique adimensionnel de la machine électrique	105
3.3.3	<i>Modèle du moteur thermique</i>	<i>108</i>
3.3.3.1	Généralités sur le moteur thermique	108
3.3.3.2	Les technologies de moteur thermique.....	108
3.3.3.3	Modèle générique adimensionnel du moteur thermique	109
3.3.4	<i>Modèle du groupe électrogène</i>	<i>111</i>
3.3.4.1	Modèle de la génératrice pour le groupe électrogène	111
3.3.4.2	Modèle du moteur thermique pour le groupe électrogène	112
3.3.4.3	Modèle du groupe électrogène.....	114
3.4	Stratégie de gestion de l'énergie	115
3.4.1	<i>Stratégie pour la structure série</i>	<i>115</i>
3.4.1.1	Cartographie du rendement de la chaîne de traction.....	116
3.4.1.2	Proposition de stratégie de gestion de l'énergie.....	120
3.4.2	<i>Stratégie pour la structure parallèle.....</i>	<i>124</i>
3.4.2.1	Cartographie du rendement de la chaîne de traction.....	125
3.4.2.2	Proposition de stratégie de gestion de l'énergie.....	128
3.5	Calcul de la consommation.....	131
3.5.1	<i>Calcul de la consommation moyenne de carburant lors d'une mission</i>	<i>131</i>
3.5.2	<i>Application à une mission standard.....</i>	<i>133</i>
3.5.2.1	Consommation d'une structure série	133
3.5.2.2	Consommation d'une structure parallèle	135
3.6	Conclusion	137

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente le modèle d'un véhicule hybride qui sera mis en œuvre lors de l'optimisation du dimensionnement des composants de la chaîne de traction.

Dans une première section, les variables d'entrée et de sortie du modèle seront définies. Le choix de la consommation en carburant du véhicule comme critère d'optimisation sera justifié. Puis la modélisation par les flux de puissance, adoptée dans le chapitre 1, sera développée. Nous montrerons alors que ce modèle permet de s'affranchir de la complexité des caractéristiques des composants telles que la tension du bus DC, les courants de charge et de décharge de la batterie, la vitesse et le couple du moteur thermique, etc.

Dans une deuxième section, les modèles génériques adimensionnels inspirés par (Dupriez-Robin, 2010) seront établis pour chacun des composants de la chaîne de traction : batterie, machine électrique et moteur thermique. Le modèle du groupe électrogène sera établi à partir des modèles d'un moteur thermique et d'une génératrice électrique spécifiquement développés pour cette application.

Dans une troisième section, les stratégies de gestion de l'énergie seront définies pour deux types d'architectures possibles : série et parallèle. Les stratégies proposées reposant sur des règles seront basées sur une étude du rendement global de la chaîne de traction.

Enfin, une dernière section s'intéressera à la méthode de calcul de la consommation en carburant du véhicule. L'application du processus de calcul sera effectuée sur un cycle de conduite standard et les résultats y seront alors analysés.

3.2 MODELISATION DU VEHICULE

L'objet de cette section est de proposer un modèle de véhicule hybride qui sera intégré au processus d'optimisation décrit en Figure 3.1. En vue de définir le modèle requis, les variables et le critère d'optimisation, respectivement entrées et sortie du modèle, doivent être définis au préalable. Les « données d'entrée » du modèle feront référence aux variables qui ne sont pas soumises à l'optimisation.

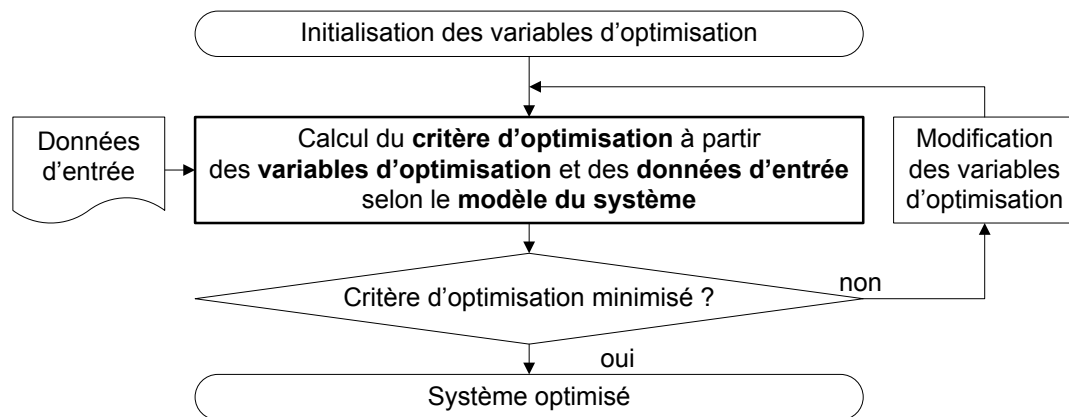


Figure 3.1 Processus d'optimisation d'un système

3.2.1 VARIABLES D'ENTREE ET DE SORTIE DU MODELE

3.2.1.1 Choix du critère d'optimisation pour le dimensionnement

De manière intuitive ou en s'appuyant sur la littérature, de nombreuses grandeurs peuvent être considérées comme critère d'optimisation :

- la masse du véhicule (Souffran, et al., 2010),
- le volume de la chaîne de traction (Jaafar, et al., 2010),
- le temps d'accélération du véhicule (Assanis, et al., 1999)
- le coût de fabrication (Wu, et al., 2011),
- la durée de vie des composants (Akli, 2008),
- le rendement de la chaîne de traction (Hanini, et al., 2008),
- les émissions de polluants (Chanda, 2008),
- la consommation de carburant (Bonnans, et al., 2004), (Liu, et al., 2007), (Sinoquet, et al., 2011), (Souffran, et al., 2011a).

Le critère de la consommation de carburant a été retenu pour cette étude dans la mesure où sa minimisation implique indirectement la minimisation (ou la maximisation selon les cas) des autres critères. Par exemple, la consommation sera d'autant plus faible que la masse du véhicule et les pertes dans la chaîne de traction le seront également. De plus, ce critère permet de calculer le coût du véhicule au kilomètre pour son utilisateur. Il s'avère, pour ces raisons, que ce choix est le plus traité dans la littérature.

3.2.1.2 Variables d'optimisation et données d'entrée du modèle

La consommation de carburant du véhicule ayant été choisie comme critère d'optimisation pour la conception du système, les six variables suivantes ont été identifiées comme entrées du modèle ayant une influence sur ce critère. Parmi ces variables, certaines seront considérées comme des données d'entrée afin de resserrer le cadre de l'étude. En effet tous les choix ne peuvent être (ou alors difficilement) laissés à l'algorithme d'optimisation.

Deux variables d'optimisation ont donc été identifiées pour cette étude :

- ♦ **Le dimensionnement des composants** : la puissance du moteur thermique et l'énergie de la batterie embarquée définissent le degré d'hybridation du véhicule entre le tout thermique et le tout électrique.
- ♦ **La structure du véhicule hybride** : série ou parallèle, ces deux types d'architectures pourront être comparés à l'issue de l'étude.

Les quatre autres variables sont considérées comme des données d'entrée du modèle :

- ♦ **La mission du véhicule** : paramètre principal de cette étude, l'analyse de l'impact de la nature de la mission (urbaine ou extra-urbaine) sur la consommation du véhicule permet l'optimisation du dimensionnement des composants et de la structure du véhicule selon l'usage souhaité.
- ♦ **La stratégie de gestion de l'énergie** : cette donnée dépend de la structure de véhicule choisie et de la complexité de mise en œuvre acceptée. Il existe en effet un grand nombre de stratégies (heuristiques ou optimales) parmi lesquelles la plus adaptée ou la moins contraignante en termes de ressources informatiques doit être identifiée. La stratégie de gestion de l'énergie ne fera pas l'objet d'une optimisation dans le présent mémoire.
- ♦ **La technologie des composants** : cette donnée doit être choisie en fonction du cahier des charges du constructeur entre les carburants essence ou gazole pour le moteur thermique et entre les technologies Plomb, Lithium-ion ou Ni-MH pour la batterie.
- ♦ **Les caractéristiques du châssis** : elles englobent son poids, son coefficient aérodynamique, sa surface frontale ainsi que le coefficient au roulement. Ces caractéristiques dépendent grandement des choix du constructeur lors du design du véhicule. Elles ont été identifiées sur le véhicule particulier ayant servi à la réalisation de la campagne de mesures des missions présentées au Chapitre 2.

3.2.1.3 Modèle du véhicule

Le modèle du véhicule comporte donc une variable de sortie et six variables d'entrée comme représenté en Figure 3.2. Le dimensionnement des composants et la structure du véhicule seront optimisés afin de minimiser la consommation de carburant en fonction de la mission du véhicule. La stratégie de gestion de l'énergie, la technologie des composants et les caractéristiques du châssis seront fixées au préalable.

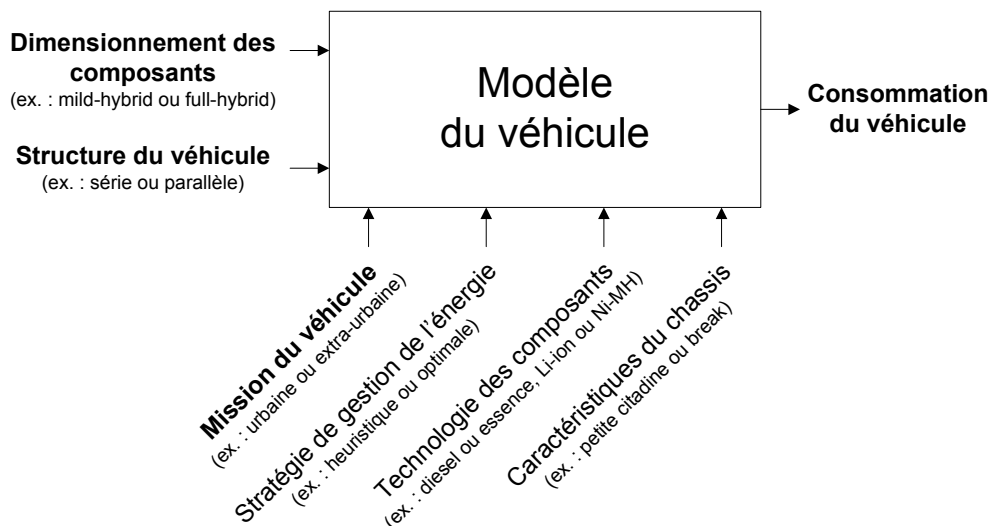


Figure 3.2 Variables d'entrée-sortie du modèle du véhicule

3.2.2 APPROCHE PAR LES FLUX DE PUISSANCE

3.2.2.1 Choix de la modélisation

La modélisation statique des composants déduite de cartographies est traditionnellement utilisée pour la commande « haut niveau » hors ligne de véhicules hybrides (Delprat, 2002) (Scordia, 2004) (Pérez, et al., 2006). Ces modèles sont adaptés pour l'optimisation de la stratégie de gestion de l'énergie. Cependant ils sont basés sur l'expression des points de fonctionnement des organes par deux variables : {couple ; vitesse} pour les composants mécaniques et {tension ; courant} pour les organes électriques. Ceci en fait une modélisation complexe dans un contexte de dimensionnement où l'on doit réduire l'espace de décision à parcourir par l'algorithme d'optimisation. De plus, l'utilisation des deux variables suppose soit d'en fixer une (choix du niveau de tension par exemple), soit de connaître précisément la relation entre ces variables par l'intermédiaire des cartographies. Cette dernière condition impose quasiment le choix a priori d'un matériel donné ce qui peut être contraire à une optimisation globale du système.

Dans ce mémoire, l'objectif est d'optimiser le dimensionnement des différents composants de la chaîne de traction par rapport à un grand nombre de missions du véhicule générées de manière stochastique. Ce processus demande une grande ressource de calcul. Nous cherchons donc la modélisation la plus « légère » possible tout en conservant une bonne précision sur le rendement des organes. Cette précision permettra d'obtenir des résultats réalistes vis-à-vis du critère d'optimisation en termes de consommation de carburant. Nous avons donc choisi la modélisation adimensionnelle par flux de puissance proposée par (Dupriez-Robin, 2010) dans son étude sur le dimensionnement d'un voilier hybride. L'originalité de cette modélisation est qu'elle permet de s'affranchir des paramètres des organes du véhicule qui complexifient le problème de conception. Ainsi chaque organe de puissance est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance demandée par la chaîne de propulsion, ce qui permet de s'affranchir des

caractéristiques {couple ; vitesse} ou {tension ; courant}. Un modèle simplifié de chaque organe permet d'étudier le système dans son ensemble et de résoudre le problème du dimensionnement en fonction de la mission du véhicule.

3.2.2.2 Notations

Trois types de bloc sont définis dans la modélisation par flux de puissance :

- le bloc réservoir d'énergie qui est une source d'énergie ou un espace de stockage,
- le bloc transfert de puissance qui convertit l'énergie d'une nature vers une autre,
- le bloc récepteur d'énergie qui utilise l'énergie.

3.2.2.2.1 Bloc réservoir d'énergie

Les réservoirs d'énergie sont au nombre de deux dans un véhicule hybride :

- le réservoir de carburant,
- le réservoir d'énergie chimique de la batterie.

Ces réservoirs d'énergie sont caractérisés par l'énergie stockée E_{res} et par la puissance de sortie $p_{res,o}(t)$. Leur représentation est donnée en Figure 3.3.



Figure 3.3 Bloc réservoir d'énergie

Le réservoir de carburant et la batterie électrochimique ont toutefois des fonctionnements différents. Au contraire du réservoir de carburant, la batterie peut être rechargée par une puissance $p_{res,o}(t)$ négative. C'est alors à l'algorithme de gestion de l'énergie que revient la tâche de contrôler le niveau de charge de la batterie alors qu'il appartient au conducteur de surveiller le niveau de carburant et d'aller à une station service lorsque celui-ci est trop bas.

3.2.2.2.2 Bloc transfert de puissance

Les différents composants de la chaîne de propulsion assurant un transfert de puissance sont au nombre de trois :

- le moteur thermique,
- la machine électrique (moteur et/ou génératrice),
- la batterie.

En incluant l'électronique de puissance nécessaire à chaque composant, ces derniers sont modélisés par un bloc générique similaire à celui de la Figure 3.4 :

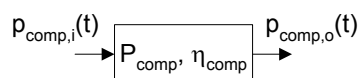


Figure 3.4 Bloc transfert de puissance

P_{comp} est la puissance nominale du composant, $p_{comp,i}(t)$ la puissance d'entrée, $p_{comp,o}(t)$ la puissance de sortie et η_{comp} le rendement de l'organe de puissance, fonction de la puissance de sortie en grandeur réduite $\frac{p_{comp,o}(t)}{P_{comp}}$. La modélisation inverse nous permet de déduire la puissance à fournir $p_{comp,i}(t)$ à partir de la puissance demandée par la charge $p_{comp,o}(t)$. La relation entre ces puissances est définie par l'équation (3.1) :

$$p_{comp,i}(t) = \frac{p_{comp,o}(t)}{\eta_{comp} \left(\frac{p_{comp,o}(t)}{P_{comp}} \right)} \quad (3.1)$$

Les modèles des composants constituant la chaîne de propulsion d'un véhicule hybride seront développés dans la section 3.3 de ce même chapitre.

3.2.2.2.3 Bloc récepteur d'énergie

La chaîne de propulsion ne contient qu'un seul bloc récepteur qui consomme l'énergie : le véhicule lui-même.

En effet, la puissance issue de la chaîne $p_{rec,i}(t)$ est directement connectée aux roues assurant ainsi la propulsion du véhicule. Ce récepteur d'énergie sera ainsi modélisé par le bloc représenté dans la Figure 3.5. Le rendement des organes mécaniques est supposé constant et intégré au bloc.

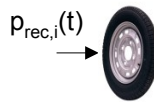


Figure 3.5 Bloc récepteur d'énergie

3.2.2.3 Exemples de modélisation par les flux de puissance

3.2.2.3.1 Véhicule hybride série

Dans le cas du véhicule hybride série représenté dans la Figure 3.6, deux sources d'énergie permettent la propulsion du véhicule : le réservoir de carburant qui produit la puissance p_{carb} et la source d'énergie chimique de la batterie qui produit ou reçoit la puissance p_{chim} . Le bloc récepteur d'énergie est le véhicule, figuré par la roue, qui reçoit ou retourne la puissance mécanique p_{roues} . La chaîne de propulsion comporte enfin quatre composants caractérisés par leur puissance nominale et leur rendement.

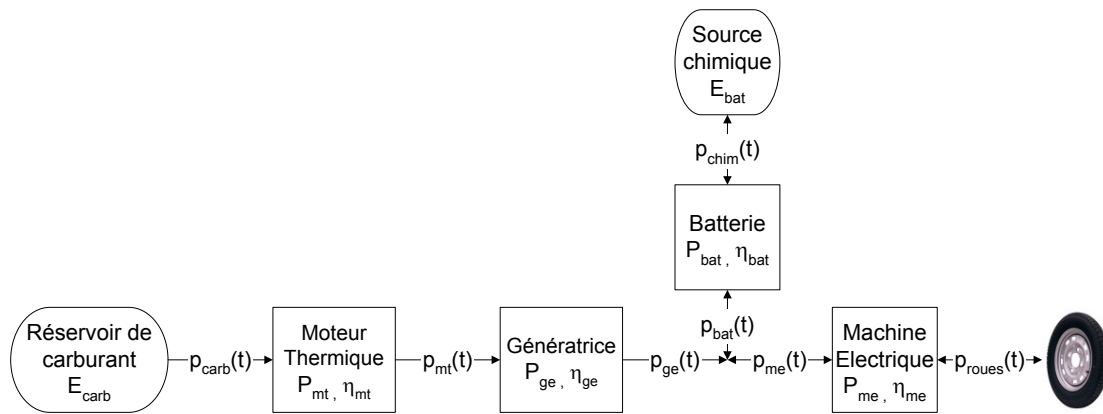


Figure 3.6 Structure hybride série

La distribution de la puissance au nœud commun de couplage entre la génératrice, la batterie et la machine électrique s'effectue grâce à la stratégie de gestion de l'énergie.

3.2.2.3.2 Véhicule hybride parallèle

A la différence de l'architecture série, la structure parallèle ne contient que trois blocs de transfert de la puissance : un moteur thermique, une batterie et une machine électrique. Les deux réservoirs d'énergie et le bloc récepteur sont cependant retrouvés.

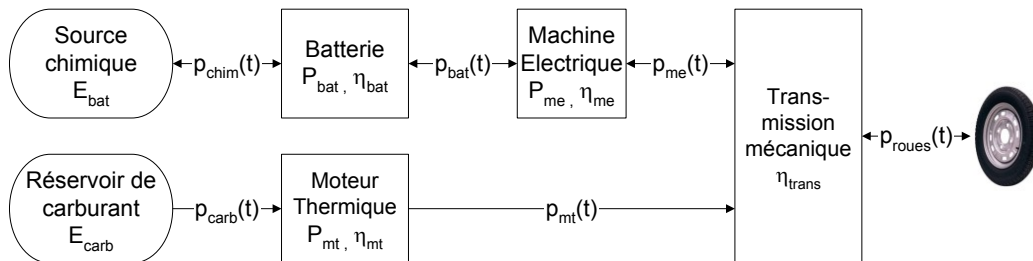


Figure 3.7 Structure hybride parallèle

La modélisation par flux de puissance de la chaîne de propulsion hybride ayant été mise en place, nous allons maintenant nous intéresser à la modélisation de chacun des composants de puissance.

3.3 MODELES GENERIQUES ADIMENSIONNELS DES COMPOSANTS

Afin de s'affranchir d'un choix a priori des composants qui fausserait le problème de conception, un modèle générique adimensionnel est établi pour chaque organe de puissance de la chaîne de traction. Nous nous sommes inspirés pour cela de l'approche proposée dans les travaux de (Dupriez-Robin, 2010) sur la propulsion hybride d'un voilier, moyennant toutefois une adaptation des modèles sur des gammes de puissance cohérentes avec les véhicules terrestres hybrides.

Pour commencer, la référence normative doit être définie afin de travailler en grandeur réduite. La modélisation se basant sur les flux de puissance, cette référence est légitimement fixée à la puissance nominale des composants P_{comp} . De plus, le but étant de pouvoir reproduire les flux de puissance de sortie $p_{comp,o}(t)$ en fonction des flux d'entrée $p_{comp,i}(t)$ de chaque composant, le rendement de celui-ci est à prendre en compte. Ainsi chaque organe de puissance est modélisé par son rendement $\eta_{comp}(t)$ en fonction de la puissance réduite $p_{comp,o}(t)/P_{comp}$.

Dans le cas de la batterie, le point de fonctionnement est imposé par son état de charge SOC , signifiant « State Of Charge » en anglais, et par sa puissance de sortie $p_{bat}(t)$. Le modèle du rendement en fonction de la puissance réduite est donc extrait simplement de la cartographie $\eta_{bat}(t) = f(p_{bat}(t)/P_{bat}, SOC(t))$.

Concernant le moteur thermique et la machine électrique, leurs rendements sont dépendants de leurs points de fonctionnement {vitesse ; couple} s'ils sont reliés à la transmission ou aux roues directement. Pour un moteur donné, nous proposons donc de retenir la moyenne des rendements des points de fonctionnement pour chaque iso-puissance. En nous basant sur un ensemble de cartographies de moteurs de la base de données du logiciel PSAT, le modèle générique adimensionnel sera issu de la moyenne des caractéristiques de chacun des moteurs.

Cependant, dans une application groupe électrogène, les points de fonctionnement du moteur thermique et de la génératrice électrique peuvent être pilotés. Ainsi la loi de pilotage doit être définie pour minimiser la consommation de carburant du groupe électrogène, c'est-à-dire maximiser le rendement de chacun des composants. Leur fonction de transfert en puissance est alors définie par leur courbe de rendement maximal en fonction de leur puissance réduite. Autrement dit, pour chaque puissance réduite, le système de pilotage est considéré capable de se placer au point de fonctionnement {vitesse ; couple} maximisant le rendement des moteurs.

3.3.1 MODELE DE LA BATTERIE

3.3.1.1 Généralités sur la batterie

Une batterie est un accumulateur d'énergie électrochimique réversible qui possède deux modes de fonctionnement :

- la décharge : la batterie transforme l'énergie chimique en énergie électrique, elle fonctionne donc en générateur d'énergie électrique,

- la charge : la batterie est rechargée en convertissant l'énergie électrique en énergie chimique.

Une batterie est composée d'un ensemble de cellules connectées entre elles en série et/ou en parallèle. Ainsi la capacité d'une batterie est conditionnée par le type de cellule choisi et leur nombre. Sur un faible nombre de cellules, cet aspect discret ne permet pas de voir la batterie sous la forme d'un seul bloc, cependant pour un système à forte énergie embarquée comme un véhicule hybride, elle peut être considérée homogène.

Une batterie est alors définie par les quatre paramètres suivants :

- ♦ **La capacité** C_{bat} , habituellement exprimée en Ah, correspond au produit du courant par la durée que l'accumulateur est capable de maintenir sous tension nominale. Dans notre cas, nous raisonnons en termes de puissance plutôt qu'en termes de courant ; la capacité de la batterie E_{bat} correspond alors à l'énergie stockable dans la batterie exprimée en kWh.
- ♦ **L'état de charge** SOE est habituellement exprimé en fonction du courant débité. Cependant, dans notre approche des flux de puissance, l'état de charge sera exprimé par la grandeur notée SOE , signifiant « State Of Energy » en anglais, et calculée en fonction de la puissance débitée selon l'expression (3.2) suivante :

$$SOE(t) = SOE(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t p_{chim}(\tau) d\tau}{E_{bat}}, \quad 0 \leq SOE(t) \leq 1 \quad (3.2)$$

- ♦ **Le taux de (dé)charge** est habituellement défini par le rapport entre le courant de (dé)charge en A et la capacité C_{bat} en Ah. L'unité est le Coulomb (C), ainsi un taux de décharge de 1 C signifie qu'une batterie de capacité 10 Ah peut générer un courant de 10 A pendant une heure. La même batterie peut générer 5 A pendant 2 heures si elle est déchargée à 0.5 C et débitera 20 A pendant 30 minutes si le taux est fixé à 2 C.

Dans le cadre de notre approche par les flux de puissance, ces taux sont exprimés comme le rapport entre la puissance instantanée de la batterie $p_{bat}(t)$ en kW et sa capacité E_{bat} .

Ainsi une batterie de capacité 1 kWh avec un taux maximum de décharge de 10 C pourra fournir une puissance instantanée de 10 kW au maximum pendant 6 minutes et pourra recevoir 5 kW avec un taux maximum en charge de 5 C pendant 12 minutes.

La capacité énergétique de la batterie E_{bat} et ses taux de décharge et de charge maximum, $T_{max,d}$ et $T_{max,c}$ respectivement, définissent donc les puissances instantanées maximales en décharge $P_{bat,d}$ selon (3.3) et en charge $P_{bat,c}$ selon (3.4) :

$$P_{bat,d} = T_{max,d} \times E_{bat} \quad (3.3)$$

$$P_{bat,c} = T_{max,c} \times E_{bat} \quad (3.4)$$

Ces valeurs sont prises comme références pour le modèle adimensionnel de la batterie en fonction de la puissance réduite.

- ♦ **L'énergie massique** (ou énergie spécifique) sE_{bat} d'une batterie, exprimée en Wh/kg, permet de calculer sa masse en fonction de sa capacité selon (3.5) :

$$m_{bat} = \frac{E_{bat}}{sE_{bat}} \quad (3.5)$$

3.3.1.2 Les technologies de batterie

Les fabricants de batterie ont étudié de nombreux couples électrochimiques comme les traditionnels Plomb-acide et Nickel-cadmium (Ni-Cd) et plus récemment les Nickel-hydrure de métal (Ni-MH) et Lithium-ion (Li-ion). Nous n'envisagerons pas dans les applications de cette étude d'autres technologies moins répandues comme le Lithium-polymère, le Lithium-phosphate ou le Sodium-chlorure de nickel, sachant que ces nouvelles technologies pourraient être prises en compte par les mêmes caractéristiques.

3.3.1.2.1 Batterie Plomb-acide

Aujourd'hui, la batterie au plomb est la technologie la plus répandue dans les applications automobiles car elle est la plus mature, la moins onéreuse et la plus facile à recycler (Khaligh, et al., 2010). Cependant, cette technologie présente une énergie massique faible, elle est polluante et son recyclage n'est pas rentable. Elle tend donc à disparaître compte tenu des contraintes environnementales de plus en plus drastiques.

3.3.1.2.2 Batterie Nickel-cadmium

La France est la plus grosse consommatrice de batteries Nickel-Cadmium au monde pour ses véhicules électriques du groupe PSA-Renault (Sun, et al., 2008). Réputées performantes et fiables, les batteries Ni-Cd souffrent cependant d'un effet mémoire et cette technologie est très polluante à cause de sa composante Cadmium. La directive européenne 2006/66/CE interdit d'ailleurs son utilisation dans les accumulateurs portables grand public.

3.3.1.2.3 Batterie Nickel-hydrure de métal

La mauvaise réputation environnementale du Cadmium a conduit au développement de la technologie Ni-MH pour la traction. Cette batterie est appropriée aux applications hybrides à forts régimes et faibles amplitudes de cyclage en raison de ses caractéristiques élevées en capacité, en puissance et en cyclabilité. Cette technologie a été choisie par Toyota pour son véhicule Prius. Cependant elle entraîne un surcoût et tolère moins bien les surcharges et les températures élevées par rapport aux batteries Ni-Cd (Schwarz, et al., 2005).

3.3.1.2.4 Batterie Lithium-ion

La batterie au Lithium a pénétré rapidement les domaines de l'ordinateur portable, du téléphone et semble prometteuse pour une application véhicule hybride en raison de ses énergie et puissance massiques encore jamais atteintes. Cependant, pour que cette technologie se répande, l'amélioration de sa durée de vie et la réduction de son coût est nécessaire (Guzzella, et al., 2005).

3.3.1.2.5 Comparaison des différentes technologies

Divers critères permettent de comparer les technologies de batterie (Sun, et al., 2008) :

- énergie massique,
- énergie volumique,
- puissance massique,
- coût,
- durée de vie en nombre de cycles,
- uniformité de la résistance interne et de la tension en fonction de la charge,
- rendement,
- autodécharge,
- plage de température de fonctionnement,
- sécurité,
- monitoring facile et précis,
- maintenance,
- effet mémoire,
- temps de conservation,
- fiabilité,
- pollution,
- recyclage.

Ces critères permettent de faire le meilleur choix technologique en fonction de l'application. Dans le cadre de cette thèse, les critères retenus sont ceux qui interviennent directement dans la modélisation, à savoir l'énergie et la puissance massique de la batterie. Les technologies de batterie sont en constante évolution depuis les années 2000. Le Tableau 3.1 synthétise les caractéristiques des différentes technologies d'accumulateurs issues de plusieurs sources (Mosdale, 2003), (Schwarz, et al., 2005), (Guzzella, et al., 2005), (Sun, et al., 2008), (Khaligh, et al., 2010).

Tableau 3.1 Comparatif des technologies de batterie

Technologie batterie	Energie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)
Plomb Acide	30-50	110-700
Nickel-cadmium	45-80	120-175
Nickel-hydrure de métal	60-110	190-900
Lithium-ion	100-200	250-1500

3.3.1.3 Choix de la technologie batterie

Au regard du tableau récapitulatif, les accumulateurs Li-ion présentent les meilleures caractéristiques. Un autre intérêt de cette technologie pour les applications aux transports est son énergie volumique ce qui lui permettrait de remplacer la batterie Ni-MH dans le futur (Khaligh, et al., 2010). Pour ces raisons, la technologie Li-ion a été retenue dans les applications de notre étude.

L'énergie massique de la batterie Li-ion est considérée égale à 150 Wh/kg en accord avec l'objectif à 2015 du programme américain de recherche sur les batteries (USABC) pour le véhicule électrique (Sun, et al., 2008).

Une masse de batterie supérieure à 400 kg semble inacceptable dans un véhicule d'environ 1 tonne (Multon, 2001). Nous limiterons donc notre étude à des capacités de batterie allant de 1 kWh minimum à 60 kWh maximum.

Les batteries Li-ion ne supportent pas de longues charges et décharges à des taux supérieurs à 1 C et 2 C respectivement. Cependant, (Peterson, et al., 2010) montrent que ces taux en valeur absolue n'excèdent pas 1 C pendant 80% du temps et 3 C en instantané sur un cycle de conduite réaliste, tout en soulignant que le constructeur garantit un taux de décharge maximum de 20 C. Pour notre application, nous considérerons que la batterie peut exceptionnellement accepter des taux de 5 C en charge et 10 C en décharge sur des durées inférieures à 18 s (Smith, et al., 2006).

Cette étude ne prendra pas en compte les variations de performance de la batterie dues à la température ambiante, au vieillissement ou au cyclage de la batterie.

3.3.1.4 Modèle générique adimensionnel de la batterie

Les opérations de charge et de décharge de la batterie engendrent des pertes. Il s'en suit que le rendement de la batterie est un facteur important à ne pas négliger. Ce dernier dépend de quatre paramètres :

- l'état de charge de la batterie,
- le puissance de charge ou de décharge appliquée,
- le sens de conversion de l'énergie,
- la température.

La base de données PSAT (Argonne National Laboratory) contient la cartographie en rendement d'une batterie Lithium-ion de 75 cellules 6 Ah. Cette cartographie est donnée ci-après en Figure 3.8. Pour cette batterie, l'état de charge est défini entre 30 % et 100 % et la température est considérée supérieure à 41°C pour se placer dans le cas le plus contraignant.

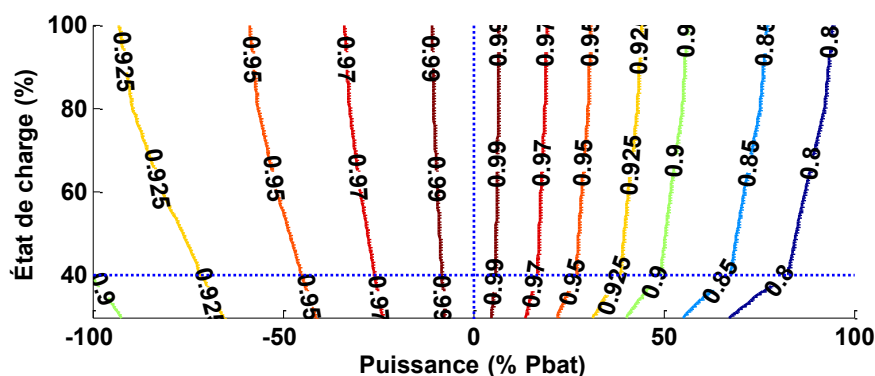


Figure 3.8 Cartographie en rendement d'une batterie Lithium-ion (PSAT)

La puissance réduite en pourcent de P_{bat} n'a pas le même référentiel en charge et en décharge. En effet, 100% de P_{bat} en décharge correspond à $P_{bat,d}$ et -100% de P_{bat} à $P_{bat,c}$.

Comme le fait remarquer (Guzzella, et al., 2005) le rendement de la batterie dépend largement de la puissance demandée mais très peu de l'état de charge. D'après la cartographie précédente, pour un état de charge supérieur à 40%, les rendements de la batterie en charge et décharge peuvent être considérés indépendants de la puissance réduite. Ainsi, le modèle de la batterie peut être simplifié comme reproduit en Figure 3.9 en considérant que l'état de charge de la batterie ne descend pas en dessous de 40%. De plus, ce seuil garantit la protection des cellules contre un vieillissement prématuré.

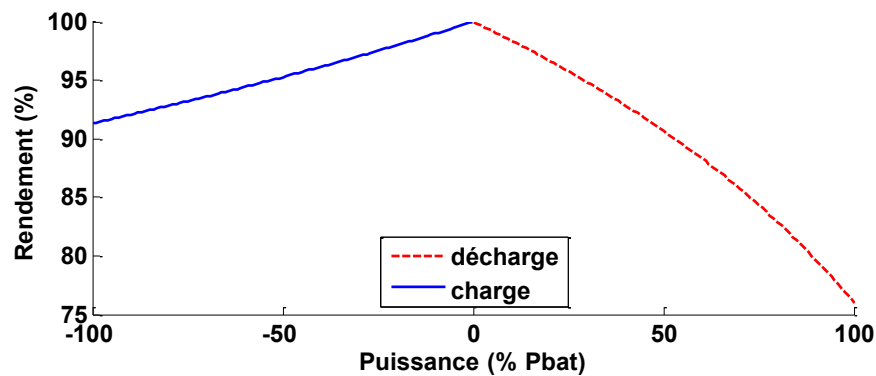


Figure 3.9 Modèle générique adimensionnel de la batterie

Ainsi les rendements en décharge $\eta_{bat,d}$ et en charge $\eta_{bat,c}$ sont calculés à partir de la caractéristique précédente selon les relations (3.6) et (3.7) respectivement.

$$\eta_{bat,d}(p_{bat,d}(t)/P_{bat,d}) \quad (3.6)$$

$$\eta_{bat,c}(p_{bat,c}(t)/P_{bat,c}) \quad (3.7)$$

Le Tableau 3.2 récapitule les caractéristiques du modèle proposé de la batterie :

Tableau 3.2 Caractéristiques du modèle de la batterie		
Caractéristique	Symbole	Valeur / Observation
Technologie de la batterie	Li-ion	
Energie massique	sE_{bat}	150 kWh/kg
Capacité de la batterie	E_{bat}	1 – 60 kWh
Taux de charge en fonctionnement normal	T_c	≤ 1 C
Taux de charge maximum	$T_{max,c}$	5 C
Taux de décharge en fonctionnement normal	T_d	≤ 2 C
Taux de décharge maximum	$T_{max,d}$	10 C
Durée autorisée à $T_{max,c}$ et $T_{max,d}$	δ_{max}	18 s
Seuil minimal de l'état d'énergie	SOE_{min}	40 %
Seuil maximal de l'état d'énergie	SOE_{max}	100 %
Rendement en décharge	$\eta_{bat,d}$	Voir Figure 3.9
Rendement en charge	$\eta_{bat,c}$	

3.3.2 MODELE DE LA MACHINE ELECTRIQUE

3.3.2.1 Généralités sur la machine électrique

Dans un véhicule hybride, notamment dans l'architecture série, la machine électrique peut présenter deux types de fonctions :

- 4) celle d'un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique et vice-versa lorsque la machine est couplée aux roues du véhicule,
- 5) ou celle d'un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique, la machine est alors une génératrice qui permet de constituer un groupe électrogène en la couplant à un moteur thermique.

Dans cette partie, le choix de la technologie de la machine électrique sera justifié et son modèle générique adimensionnel sera construit pour répondre à la première fonction précédemment citée. Le modèle de la génératrice électrique pour une application en groupe électrogène sera développé dans le paragraphe 3.3.4.1 correspondant.

3.3.2.2 Les technologies de machines électriques

D'après (Chan, 2007), les technologies de machines électriques appropriées aux véhicules hybrides sont la machine asynchrone (MAS), la machine synchrone à réluctance variable (MSRV) et la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Nous ne nous intéresserons pas dans cette étude aux autres technologies moins adaptées comme la machine à courant continu ou la machine synchrone à rotor bobiné.

3.3.2.2.1 Machine asynchrone

La machine asynchrone est choisie par les constructeurs automobiles pour plusieurs raisons (Chan, 2007), (Multon, 2001). En effet, elle est simple et bien connue, elle ne demande pas d'entretien puisqu'elle est sans balais, elle bénéficie du meilleur coût de fabrication grâce à sa standardisation, elle permet un fonctionnement sur une large plage de vitesse, elle a une bonne valeur de puissance massique et enfin, elle est robuste. Son rendement est toutefois moins bon que celui d'une MSAP car son principe même nécessite des pertes Joule élevées en particulier au rotor d'où elles sont difficiles à extraire. Pour la même raison, une machine asynchrone est plus lourde et plus encombrante qu'une machine synchrone.

3.3.2.2.2 Machine synchrone à réluctance variable

La machine synchrone à réluctance variable gagne l'intérêt des constructeurs car c'est une machine solide, facile à contrôler, sans balais donc sans usure ou entretien, et pouvant avoir de

bonnes performances en termes de couple maximum, de rendement et de facteur de puissance (Chan, 2007). Cependant, pour obtenir ces performances, il est nécessaire de rendre maximal le rapport des inductances extrêmes mais cette technologie reste délicate à réaliser (Multon, 2001). De plus, n'étant pas encore standardisée, son coût reste élevé.

3.3.2.2.3 Machine synchrone à aimants permanents

D'après (Lukic, et al., 2003), la machine synchrone à aimants permanents est la machine la plus populaire pour l'entraînement des véhicules hybrides car, de toutes les machines électriques, c'est elle qui offre les meilleures performances en termes de rendement, de couple et de puissance massique. De plus, son niveau sonore est faible, elle demande peu de maintenance et elle est relativement facile à commander. Cependant le coût de production, dépendant essentiellement de la qualité des aimants, est parmi les plus élevés (Chan, 2007). Le développement de la production à bas coût d'aimants supportant de hautes températures devrait néanmoins conduire à l'utilisation généralisée de la MSAP pour les applications de traction (Emadi, et al., 2008).

3.3.2.2.4 Comparaison des différentes technologies

Le Tableau 3.3 présente une comparaison des différentes technologies de machines électriques sur la base d'une machine de 30 kW.

Tableau 3.3 Comparatif des technologies de machine électrique (Beretta, 2005)

Technologie machine électrique	MAS	MSRV	MSAP
Rendement maximum	Passable	Moyen	Très bon
Rendement moyen	Bon	Bon	Très bon
Espace couple-vitesse	Moyen	Bon	Très bon
Vitesse maximale	Bon	Bon	Bon
Coût de l'électronique de puissance	Passable	Bon	Moyen
Coût du moteur	Bon	Très bon	Moyen

D'après ce comparatif, la machine synchrone à aimants permanents l'emporte sur ses concurrentes en termes de critères technologiques. Cette catégorie de machine a donc été choisie pour mener à bien l'étude.

3.3.2.3 Modèle générique adimensionnel de la machine électrique

Dans la plupart des applications industrielles, les machines électriques fonctionnent à un ou quelques points de fonctionnement prédéfinis. Elles peuvent être intégrées à un groupe électrogène par exemple. Cependant, dans les applications de traction automobile, les machines électriques peuvent être utilisées sur une large plage de fonctionnement en termes de vitesse et de couple lorsqu'elles sont reliées mécaniquement aux roues. Aussi sont-elles souvent modélisées

par une cartographie de leur rendement en fonction de leur point de fonctionnement {vitesse ; couple}. Ces caractéristiques de rendement dépendent essentiellement de la technologie de machine employée, ainsi (Lukic, et al., 2003) présente des cartographies génériques de machines en fonction de leur technologie. La cartographie issue de la base de données PSAT et présentée en Figure 3.10 illustre, à titre d'exemple, le cas de la machine synchrone à aimants permanents équipant la Toyota Prius.

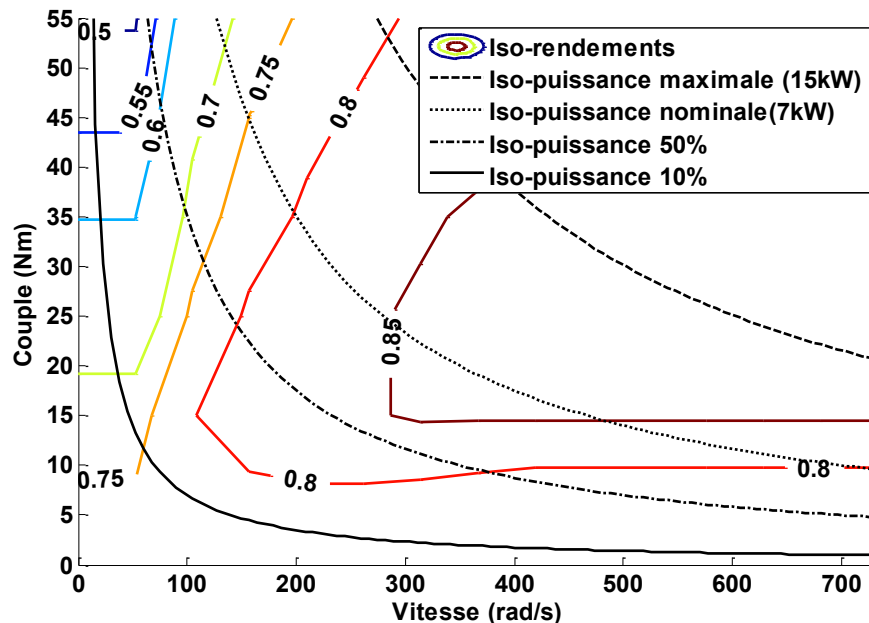


Figure 3.10 Cartographie en rendement d'une machine synchrone à aimants permanents (PSAT)

Dans le cas où la machine électrique est directement connectée aux roues, ce qui est le cas pour le moteur de traction de la structure hybride série, c'est la vitesse ou le couple demandé qui impose le point de fonctionnement de la machine et donc son rendement. Cependant, en considérant le rendement moyen des points de fonctionnement {vitesse ; couple} à iso-puissance, c'est-à-dire pour une puissance de sortie donnée, il est possible de modéliser une machine électrique par sa courbe de rendement moyen en fonction de la puissance réduite.

Afin d'estimer le modèle générique adimensionnel d'une MSAP, les courbes de rendement de treize machines issues du logiciel PSAT (Annexe E.1), dont les puissances nominales vont de 7 kW à 58 kW, ont été calculées. Ces courbes présentées en Figure 3.11 montrent une même tendance malgré des puissances de moteurs bien différentes. Ces courbes de rendement moyen ont été à leur tour moyennées afin d'obtenir le modèle générique adimensionnel de la machine électrique représenté par la courbe en pointillés gras.

D'après les courbes en rendement des machines, la puissance instantanée d'une machine peut aller jusqu'à 200 % de sa puissance nominale. En effet il est usuel de tolérer une surcharge de la machine électrique (Rahman, et al., 2002) (Gao, et al., 2007) pendant un certain temps. Ce temps a été fixé dans notre étude à 180 s après une évaluation de la moyenne des temps de surcharge des machines de la base de données PSAT.

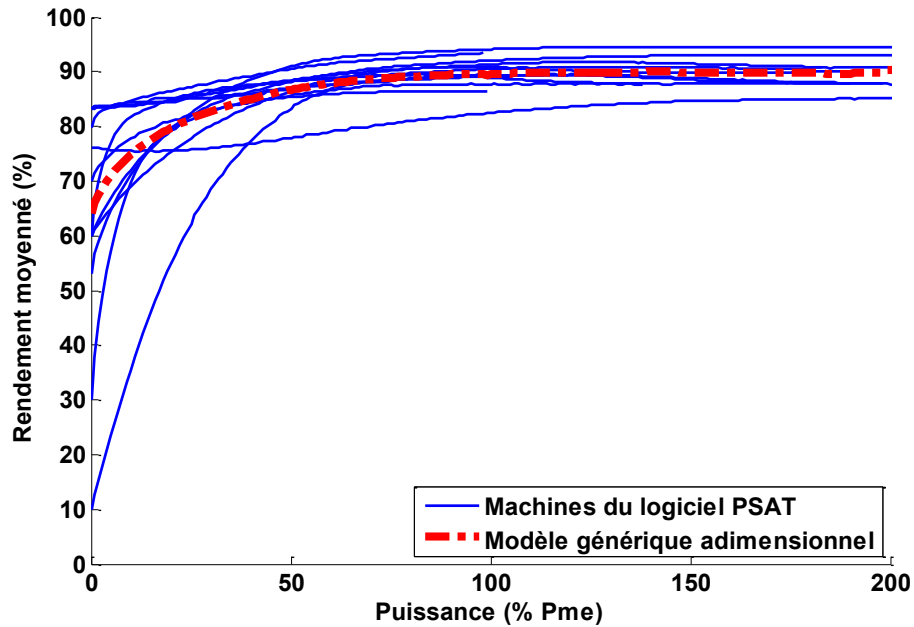


Figure 3.11 Modèle générique adimensionnel de la machine électrique

Ce modèle permet d'avoir une estimation assez juste du rendement de la machine entre 10 % et 200 % de sa puissance nominale mais moins bonne pour les très faibles puissances. Cette approximation est cependant tolérable dans le cas d'une propulsion hybride car l'erreur engendrée sera réduite au regard d'une mission complète. Par exemple, sur le cycle standard Artemis urbain, l'énergie consommée sur cette plage de 0 à 10 % de la puissance maximale représente moins d'un pourcent de l'énergie totale de la mission.

La machine électrique est considérée présenter le même fonctionnement en moteur et en génératrice, ainsi les rendements en mode moteur $\eta_{me,m}$ et en mode génératrice $\eta_{me,g}$ sont calculés à partir du même modèle suivant les relations (3.8) et (3.9) respectivement.

$$\eta_{me,m} = \eta_{me}(p_{me}(t)/P_{me}) \quad (3.8)$$

$$\eta_{me,g} = \eta_{me}(p_{ge}(t)/P_{me}) \quad (3.9)$$

La puissance massique (ou puissance spécifique) sP_{me} de la machine électrique, exprimée en W/kg, permet de calculer sa masse m_{me} en fonction de sa puissance nominale P_{me} selon (3.10) :

$$m_{me} = \frac{P_{me}}{sP_{me}} \quad (3.10)$$

Le Tableau 3.4 récapitule les caractéristiques du modèle de la machine électrique :

Tableau 3.4 Caractéristiques du modèle de la machine électrique

Caractéristique	Symbole	Valeur / Observation
Technologie de la machine électrique	MSAP	
Puissance nominale	P_{me}	déterminée à l'issue de l'étude
Ratio puissance maximale / nominale	k_{max}	200 %
Durée autorisée à puissance supérieure à nominale	δ_{max}	180 s
Puissance massique	sP_{me}	1000 W/kg
Rendement en mode moteur Rendement en mode génératrice	$\eta_{me,m}$ $\eta_{me,g}$	Voir Figure 3.11

3.3.3 MODELE DU MOTEUR THERMIQUE

3.3.3.1 Généralités sur le moteur thermique

Dans un véhicule hybride, le moteur thermique joue le rôle de convertisseur d'énergie thermique en énergie mécanique soit en fournissant un couple directement aux roues du véhicule, soit en entraînant à vitesse constante une génératrice électrique.

Dans cette partie, le choix de la technologie du moteur thermique sera justifié et son modèle générique adimensionnel sera construit pour répondre au premier cas. Le modèle du moteur thermique pour une application en groupe électrogène sera développé dans le paragraphe 3.3.4.2 correspondant au deuxième cas.

3.3.3.2 Les technologies de moteur thermique

Deux catégories de moteurs thermiques sont essentiellement distinguées pour l'automobile : le moteur à explosion alimenté par de l'essence et le moteur Diesel.

3.3.3.2.1 Le moteur à essence

Le moteur à essence a longtemps été le seul moteur thermique utilisé dans les véhicules hybrides car cette technologie permet de couper et de redémarrer le moteur en une fraction de seconde. Cependant le pouvoir calorifique volumique de l'essence est bien inférieur à celui du gazole, ce qui lui confère un rendement plus faible.

3.3.3.2.2 Le moteur Diesel

Les moteurs thermiques Diesel, longtemps écartés de la propulsion hybride pour leur non-capacité à être coupés et redémarrés rapidement, conviennent cependant bien à l'équipement des véhicules hybrides (Pornin, 1981) et commence à apparaître chez certains constructeurs (PSA, Quantum Technologies...). En effet, grâce au pouvoir calorifique plus important du gazole par rapport à l'essence, le moteur Diesel se révèle plus économique à la pompe dans les pays qui lui font bénéficier d'une taxation favorable. L'inconvénient de ce moteur pour les véhicules classiques était peut-être un manque de performance en termes de sportivité et de nervosité comparé au moteur essence, ce qui n'en est pas un pour un véhicule hybride. De plus, les deux technologies ont tendance à s'équilibrer depuis ces dernières années.

3.3.3.2.3 Comparaison des différentes technologies

Les pouvoirs calorifiques massique et volumique des carburants permettent de comparer les deux technologies de moteur thermique. Plusieurs sources présentent les valeurs normalisées de ces grandeurs, dont la directive européenne (2009/28/CE, 2009). Les valeurs retenues sont donnés dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Comparatif des technologies de moteur thermique (Guibet, 1998)

Technologie du carburant	Pouvoir calorifique à 25°C	
	Massique (kWh/kg)	Volumique (kWh/l)
Essence	11,86	8,94
Gazole	11,83	9,94

La différence de pouvoir calorifique massique mettrait l'essence très légèrement en tête du classement mais le pouvoir calorifique volumique du gazole étant très largement supérieur à celui de l'essence, c'est bien le gazole qui permet de minimiser la consommation de carburant d'un véhicule exprimée en nombre de litres aux 100 km.

3.3.3.3 Modèle générique adimensionnel du moteur thermique

La modélisation mise en place pour la machine électrique peut également être appliquée au moteur thermique en identifiant les rendements du moteur à partir de leurs courbes d'iso-puissance. La cartographie issue de la base de données PSAT présentée en Figure 3.12 illustre, à titre d'exemple, le cas du moteur HDI 2 l de 81 kW de chez PSA.

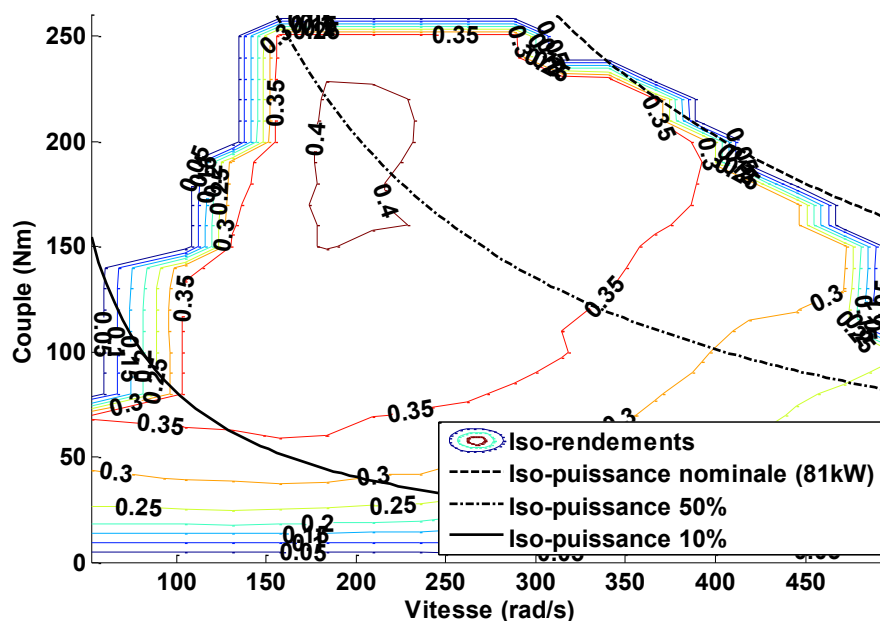


Figure 3.12 Cartographie en rendement d'un moteur Diesel (PSAT)

Pour rester dans une plage de puissance correspondant aux véhicules légers, onze moteurs thermiques issus du logiciel PSAT ont été sélectionnés avec des puissances nominales allant de 60 kW à 110 kW (Annexe E.2). La Figure 3.13 présente leurs courbes de rendement moyenné en fonction de la puissance réduite, la grandeur de référence étant la puissance nominale des moteurs.

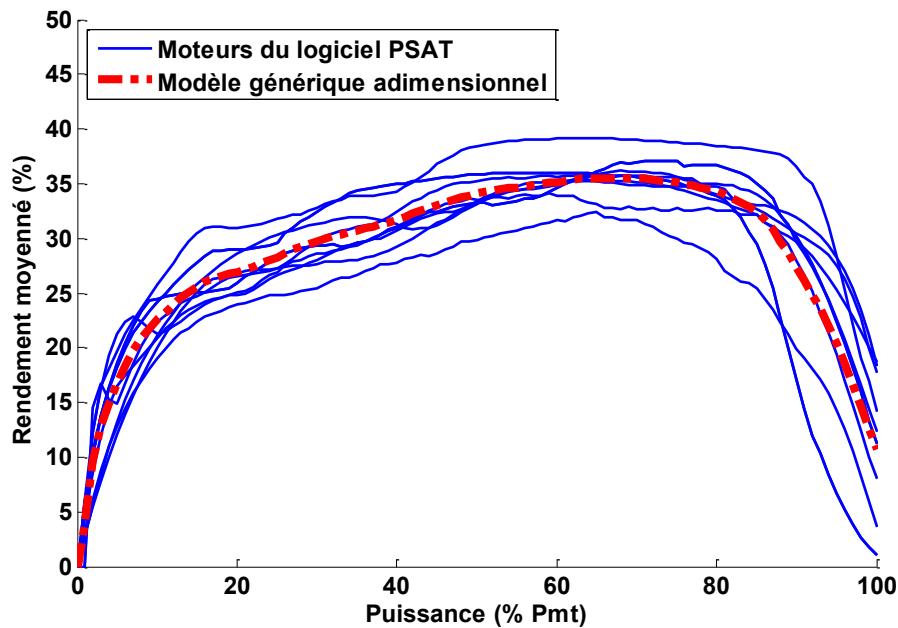


Figure 3.13 Modèle générique adimensionnel du moteur thermique

Les courbes en trait fin ayant des allures sensiblement identiques, il est possible d'avancer que le rendement d'un moteur thermique en fonction de sa puissance réduite est indépendant de sa puissance nominale. Il semble donc cohérent de modéliser un moteur thermique par la courbe de rendement en pointillés gras qui moyenne l'ensemble des courbes des moteurs.

En effet, les valeurs de rendement pour les différents moteurs se situent dans une plage d'environ $\pm 5\%$ par rapport à la courbe moyenne choisie. Compte-tenu de la dispersion existante sur les moteurs thermiques actuels, la caractéristique adimensionnelle fournit des valeurs acceptables en regard de l'objectif de cette étude. D'autre part, avec la diffusion des véhicules hybrides, les constructeurs développeront certainement des moteurs aux performances adaptées à ce nouvel usage.

Cette représentation du rendement de la motorisation thermique en fonction de la puissance réduite garantit un modèle simple et valable pour une plage de variation de la puissance cohérente avec l'application aux véhicules hybrides.

Le Tableau 3.6 récapitule les caractéristiques du modèle du moteur thermique :

Tableau 3.6 Caractéristiques du modèle du moteur thermique

Caractéristique	Symbole	Valeur / Observation
Technologie du moteur thermique	Diesel	
Puissance nominale	P_{mt}	déterminée à l'issue de l'étude
Puissance massique	sP_{mt}	800 W/kg
Rendement	η_{mt}	Voir Figure 3.13

3.3.4 MODELE DU GROUPE ELECTROGENE

Un groupe électrogène est composé d'une génératrice électrique liée mécaniquement à un moteur thermique. Plutôt que de considérer ces organes de puissance séparés dans la modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule hybride série, il semble judicieux de construire un modèle générique adimensionnel pour le groupe électrogène afin d'alléger les calculs lors des simulations.

De plus, contrairement à la machine électrique et au moteur thermique précédents, le point de fonctionnement {vitesse ; couple} du groupe électrogène n'est pas contraint par la transmission mécanique aux roues. Quelle que soit la puissance réduite demandée en sortie du groupe électrogène, il est donc possible de piloter la génératrice et le moteur thermique à leurs points de rendement maximal (Dubray, 2002). Partant de cette considération, des modèles génériques adimensionnels de la génératrice et du moteur thermique à rendement maximisé peuvent être construits. Ces deux modèles seront ensuite fusionnés afin de proposer un modèle générique adimensionnel du groupe électrogène.

3.3.4.1 Modèle de la génératrice pour le groupe électrogène

Dans un véhicule hybride série, il n'existe pas de lien entre la vitesse du véhicule et le régime du groupe électrogène. Dans ces conditions, nous disposons d'une infinité de solutions {couple ; vitesse} pour fournir une certaine puissance. Ce degré de liberté supplémentaire permet d'optimiser le fonctionnement des organes de puissance composant le groupe électrogène. Ainsi, sur chaque iso-puissance du générateur électrique, le meilleur point de fonctionnement, c'est-à-dire celui qui maximise le rendement, est déterminé comme montré en Figure 3.14.

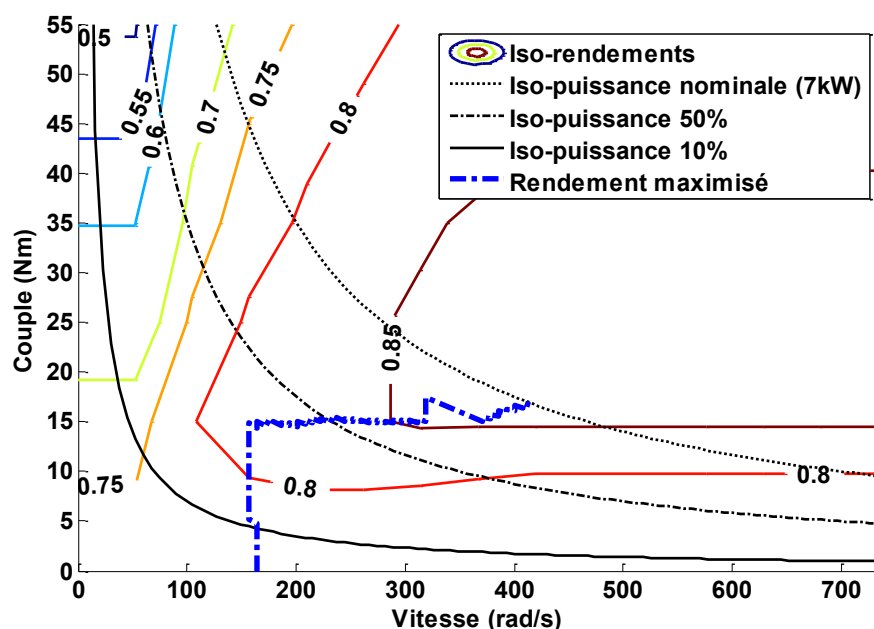


Figure 3.14 Cartographie du rendement maximisé d'une génératrice électrique (PSAT)

Ce procédé est répété pour les treize MSAP de la base de données PSAT donnant lieu aux courbes de rendement présentées en Figure 3.15. La courbe moyenne en pointillés est retenue comme modèle générique adimensionnel de la génératrice pour une application en groupe électrogène. L'erreur de modélisation sur les faibles puissances, multipliée par des faibles durées de fonctionnement à ces puissances grâce à une stratégie de gestion de l'énergie appropriée, peut être considérée négligeable sur un cycle de conduite complet.

Précédemment, le modèle de la machine électrique autorisait un fonctionnement en surcharge pendant un certain temps. Pour une application en groupe électrogène, la génératrice n'est pas considérée pouvoir accepter de surcharge, c'est pourquoi la plage de puissance du modèle est limitée à la puissance nominale.

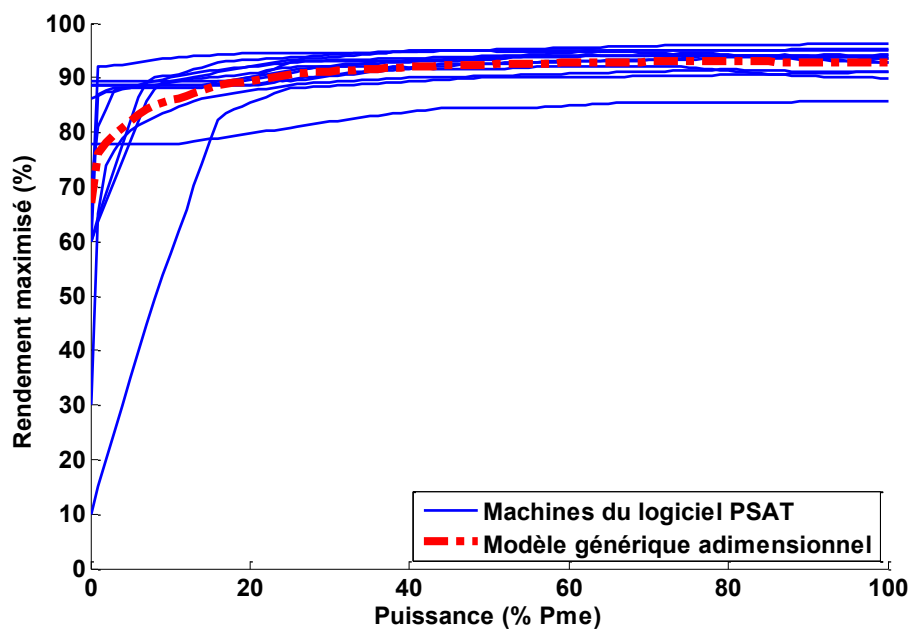


Figure 3.15 Modèle générique adimensionnel de la génératrice d'un groupe électrogène

3.3.4.2 Modèle du moteur thermique pour le groupe électrogène

La base de données PSAT comporte les cartographies de trois moteurs thermiques qui présentent les caractéristiques d'un groupe électrogène (Annexe E.3). Le même procédé de recherche du meilleur rendement à iso-puissance a été appliqué comme le montre la Figure 3.16.

Ce moteur présente une plage de vitesse voisine de celle de la génératrice illustrée en Figure 3.14 mais assez éloignée en termes de couple. En effet, la base de données PSAT ne dispose pas de moteur thermique, ayant les caractéristiques d'un groupe électrogène, pour des puissances inférieures à 60 kW comme les génératrices électriques. Cependant, si les puissances sont nettement plus importantes, ces moteurs ont des cartographies spécifiques pour un fonctionnement en groupe électrogène. Leurs cartographies peuvent donc raisonnablement être utilisées pour cette application spécifique et sont donc utilisables pour mettre en place le modèle générique adimensionnel.

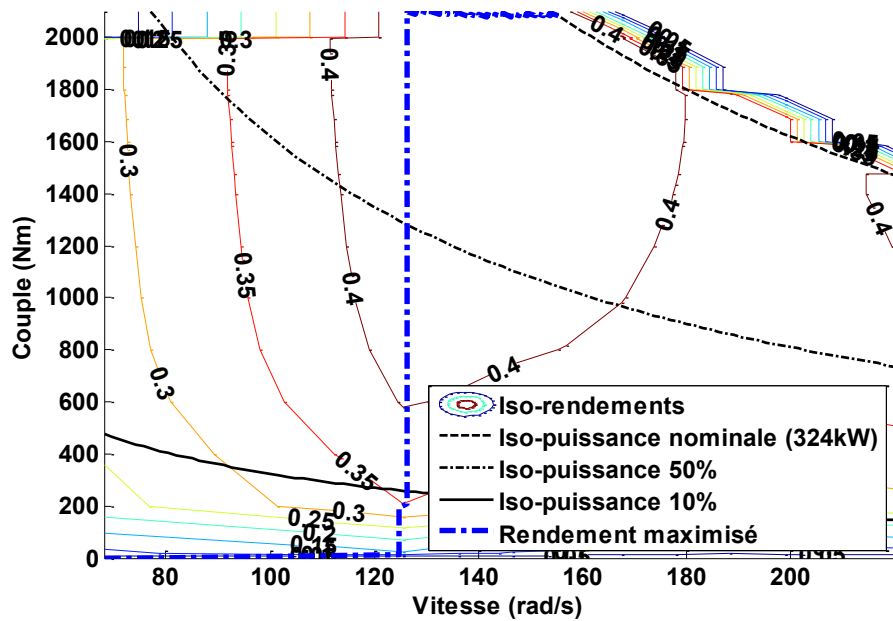


Figure 3.16 Cartographie du rendement maximisé d'un moteur thermique (PSAT)

La Figure 3.16 illustre la différence de cartographie en rendement entre un moteur dédié au groupe électrogène et les autres moteurs en prise directe avec les roues dont un exemple était donné en Figure 3.12. Le rendement est plus élevé à couple faible et la plage de rendement supérieur à 40% est plus étendue. Ceci justifie l'étude du groupe électrogène à part.

La courbe moyenne en pointillés sur la Figure 3.17 est retenue comme modèle générique adimensionnel du moteur thermique pour une application en groupe électrogène.

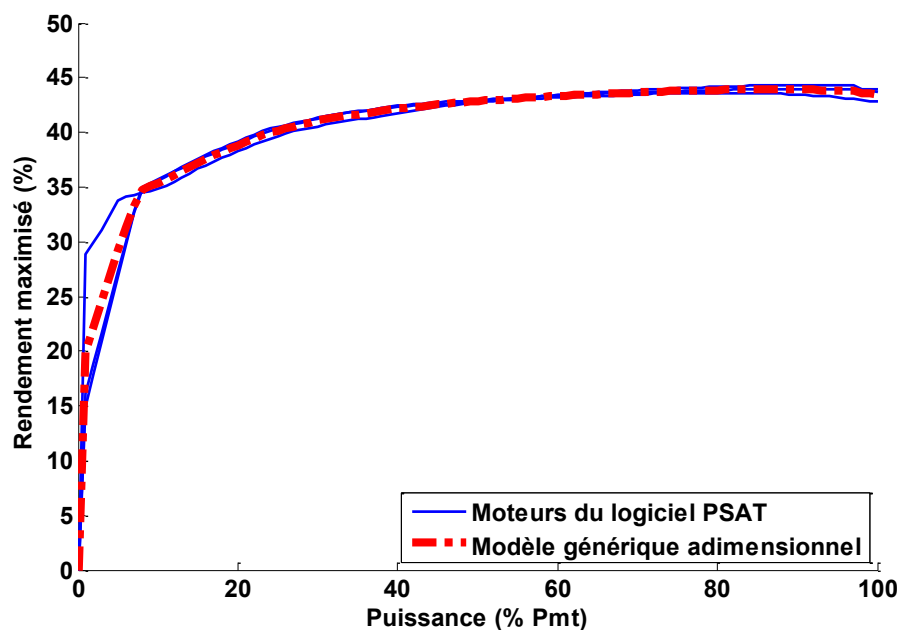


Figure 3.17 Modèle générique adimensionnel du moteur thermique d'un groupe électrogène

3.3.4.3 Modèle du groupe électrogène

Le groupe électrogène étant composé des deux organes précédemment modélisés par leur rendement en fonction de leur puissance réduite, le couplage est pris en compte par la multiplication de leurs courbes de rendement (3.11).

$$\begin{aligned}\eta_{ge} \left(\frac{p_{ge}(t)}{P_{ge}} \right) &= \eta_{mt} \left(\frac{p_{mt}(t)}{P_{mt}} \right) \times \eta_{me,g} \left(\frac{p_{me,g}(t)}{P_{me,g}} \right) \\ &= \eta_{mt} \left(\frac{\frac{p_{ge}(t)}{P_{ge}}}{\eta_{me,g} \left(\frac{p_{ge}(t)}{P_{ge}} \right)} \right) \times \eta_{me,g} \left(\frac{p_{ge}(t)}{P_{ge}} \right)\end{aligned}\quad (3.11)$$

Le modèle du groupe électrogène en résultant est donné en Figure 3.18.

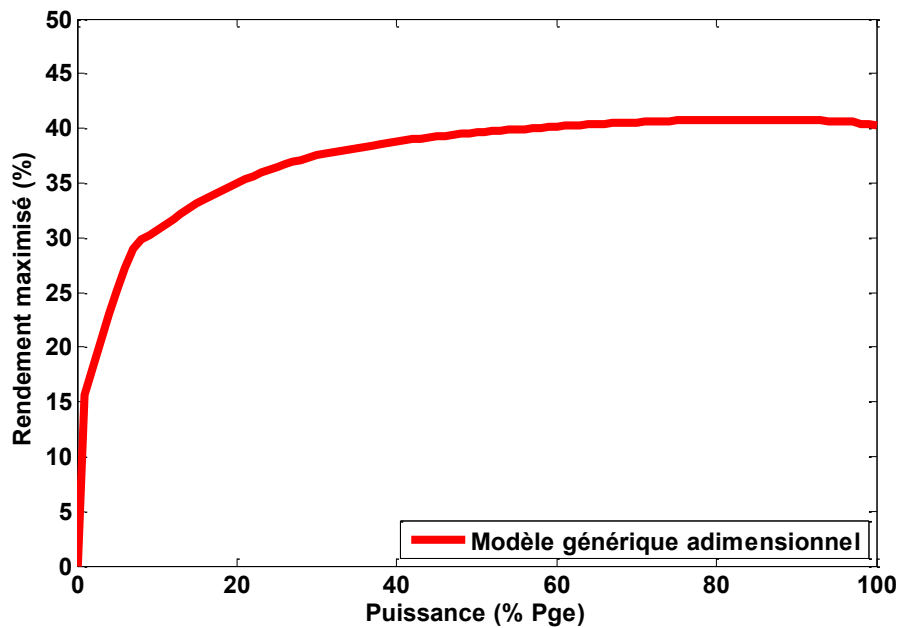


Figure 3.18 Modèle générique adimensionnel du groupe électrogène

Les meilleurs rendements sont observés pour une plage de puissance allant de 40 % à 100 % alors que les plus faibles correspondent à des puissances inférieures à 20 % de la puissance nominale du groupe électrogène. Il appartiendra à la stratégie de gestion de l'énergie d'éviter cette zone de fonctionnement qui pénalise la consommation de carburant du véhicule.

3.4 STRATEGIE DE GESTION DE L'ENERGIE

Dans le chapitre 1, nous avons choisi de définir une stratégie de gestion de l'énergie à base de règles déterministes. Les possibilités de stratégie sont quasiment infinies. Dans ses travaux, (Nzisabira, 2009) présente les stratégies de contrôle du logiciel ADVISOR pour les architectures parallèle et série. Toutes ces stratégies de contrôle sont basées sur l'état de charge des batteries comme paramètre d'entrée du système de contrôle. Nous nous en sommes inspirés pour proposer les stratégies de gestion des flux de puissance ci-après.

3.4.1 STRATEGIE POUR LA STRUCTURE SERIE

La stratégie de contrôle de l'hybride série est intégrée dans la modélisation de la chaîne de traction au niveau du nœud entre la machine électrique, la batterie et le groupe électrogène comme illustré en Figure 3.19. Le rôle de la stratégie de gestion de l'énergie est de gérer les puissances fournies par la batterie et le groupe électrogène en fonction de l'état de charge de la batterie et de la puissance demandée aux roues ramenée à l'entrée de la machine électrique :

- le groupe électrogène peut être coupé si la charge de la batterie est suffisamment élevée,
- il est rallumé si la puissance requise par la machine électrique est suffisante et si l'état de charge de la batterie est trop bas.

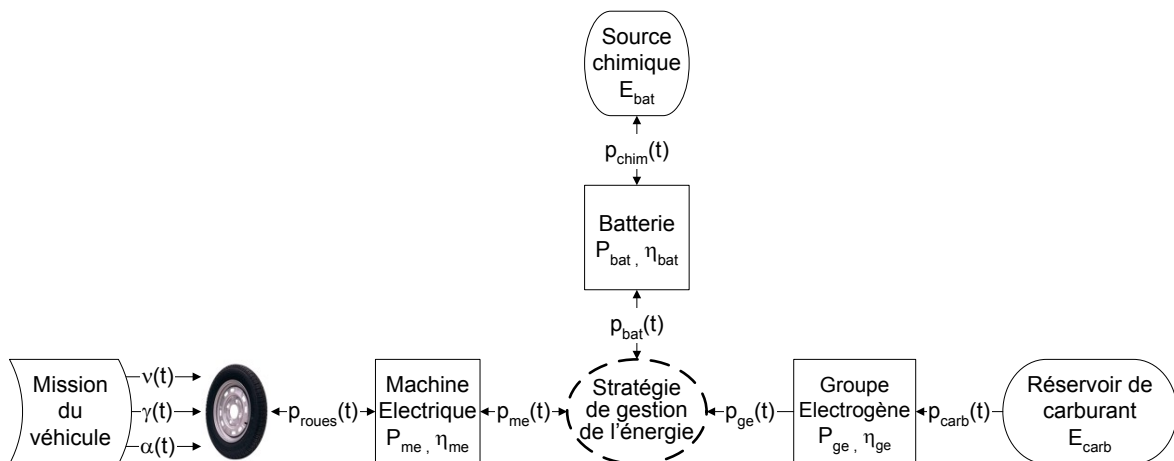


Figure 3.19 Modélisation de la structure hybride série pour le calcul de la consommation

Cinq modes sont identifiés dans un hybride série :

- ♦ Mode Boost : le groupe électrogène fonctionne au meilleur rendement possible et la batterie fournit le complément de puissance ;
- ♦ Mode Régénération : le groupe électrogène fournit une puissance supérieure à celle demandée au niveau des roues (celle-ci peut être nulle en cas d'arrêt du véhicule ou négative en cas de décélération et de freinage) afin de fonctionner au meilleur rendement possible, le surplus d'énergie permettant de recharger la batterie ;

- ◆ Mode Récupération : le groupe électrogène est à l'arrêt et la batterie récupère l'énergie cinétique ou de freinage aux roues ;
- ◆ Mode tout Electrique : le groupe électrogène est arrêté, le véhicule est propulsé par l'énergie de la batterie ;
- ◆ Mode tout Thermique : la puissance aux roues est fournie par le groupe électrogène uniquement.

L'enjeu de la stratégie de gestion de l'énergie dans un véhicule hybride série est de déterminer la répartition de la puissance demandée aux roues entre le groupe électrogène et la batterie. De plus, la stratégie doit être adaptée en fonction du dimensionnement des composants de la chaîne de traction. Afin d'établir un critère non empirique pour gérer cette répartition de la puissance, nous nous sommes basés sur l'étude du rendement de la chaîne de traction.

3.4.1.1 Cartographie du rendement de la chaîne de traction

Nous avons considéré le rendement global entre les sources d'énergie (le réservoir chimique pour la batterie et le réservoir de carburant pour le groupe électrogène) et l'entrée de la machine électrique. Ce rendement global a été calculé pour chacun des modes de fonctionnement comme présenté dans le Tableau 3.7.

Lorsque la batterie fournit une partie ou toute la puissance demandée, c'est-à-dire dans les modes Boost et Electrique, la décharge de la batterie implique qu'elle ait été chargée auparavant par le groupe électrogène à un certain rendement. C'est pourquoi nous proposons d'introduire un coefficient de correction Δp_{carb} dans le calcul du rendement global. Ce coefficient considère que la puissance de décharge $p_{chim}(t)$ a été chargée au rendement optimal du groupe électrogène η_{ge}^{opt} et au rendement moyen de la batterie en charge $\eta_{bat,c}^{moy}$. Cette correction est pessimiste dans le cas où la batterie a été chargée par freinage récupératif, mais elle est optimiste dans le cas où la batterie a été régénérée par le groupe électrogène à un rendement non optimal.

Tableau 3.7 Rendement en fonction du mode de fonctionnement

Mode	Rendement de la chaîne de traction
Boost / Electrique	$\eta = \frac{p_{me}(t)}{p_{carb}(t) + p_{chim}(t) + \Delta p_{carb}}$ où $\Delta p_{carb} = \frac{p_{chim}(t)}{\eta_{ge}^{opt} \times \eta_{bat,c}^{moy}}$
Thermique	$\eta = \frac{p_{me}(t)}{p_{carb}(t)}$
Régénération	$\eta = \frac{p_{me}(t) - p_{chim}(t)}{p_{carb}(t)}$
Récupération	$\eta = \frac{-p_{chim}(t)}{p_{carb}(t) - p_{me}(t)}$

Le rendement de la chaîne de traction étant maintenant défini, il s'agit de déterminer pour une puissance demandée par la machine électrique $p_{me}(t)$ donnée, quelles puissances du groupe électrogène $p_{ge}(t)$ et de la batterie $p_{bat}(t)$ permettront d'obtenir le meilleur rendement. Pour cela, plusieurs cartographies du rendement global en fonction de $p_{ge}(t)$ et de $p_{bat}(t)$ ont été calculées en se basant sur les modèles génériques adimensionnels de la batterie (Figure 3.9) et du groupe électrogène (Figure 3.18) pour différents dimensionnements de P_{ge} et de E_{bat} . Les différentes cartographies de rendement obtenues présentent globalement les mêmes caractéristiques. Un exemple de cartographie pour une batterie de 2 kWh (soit $P_{bat,d} = 20$ kW et $P_{bat,c} = -10$ kW) et un groupe électrogène de 20 kW est donné en Figure 3.20. Du fait de la non-linéarité des caractéristiques en rendement des composants, cette cartographie du rendement global η n'a pas pu être généralisée.

Sachant que $p_{me}(t) = p_{ge}(t) + p_{bat}(t)$, les iso-puissances de la machine électrique ont été superposées aux iso-rendements de la chaîne de traction. Ainsi, pour chaque puissance demandée $p_{me}(t)$, le point de fonctionnement $\{p_{bat}(t); p_{ge}(t)\}$ maximisant le rendement $\eta_{max}(t)$ peut être identifié.

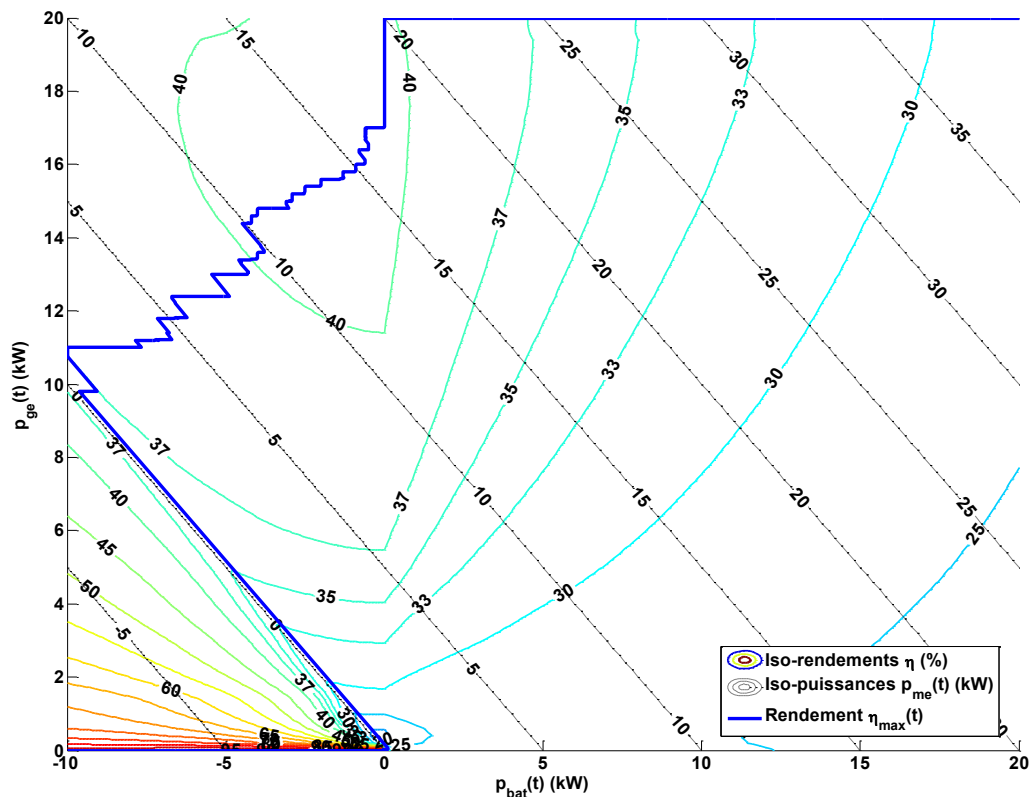


Figure 3.20 Cartographie du rendement global d'une chaîne de traction {2 kWh ; 20 kW} maximisé

Issues de cette caractéristique au rendement maximisé, les Figure 3.21 à Figure 3.23 décrivent respectivement la puissance du groupe électrogène $p_{ge}(t)$, la puissance de la batterie $p_{bat}(t)$ et le rendement résultant $\eta_{max}(t)$ en fonction de la puissance de la machine électrique $p_{me}(t)$.

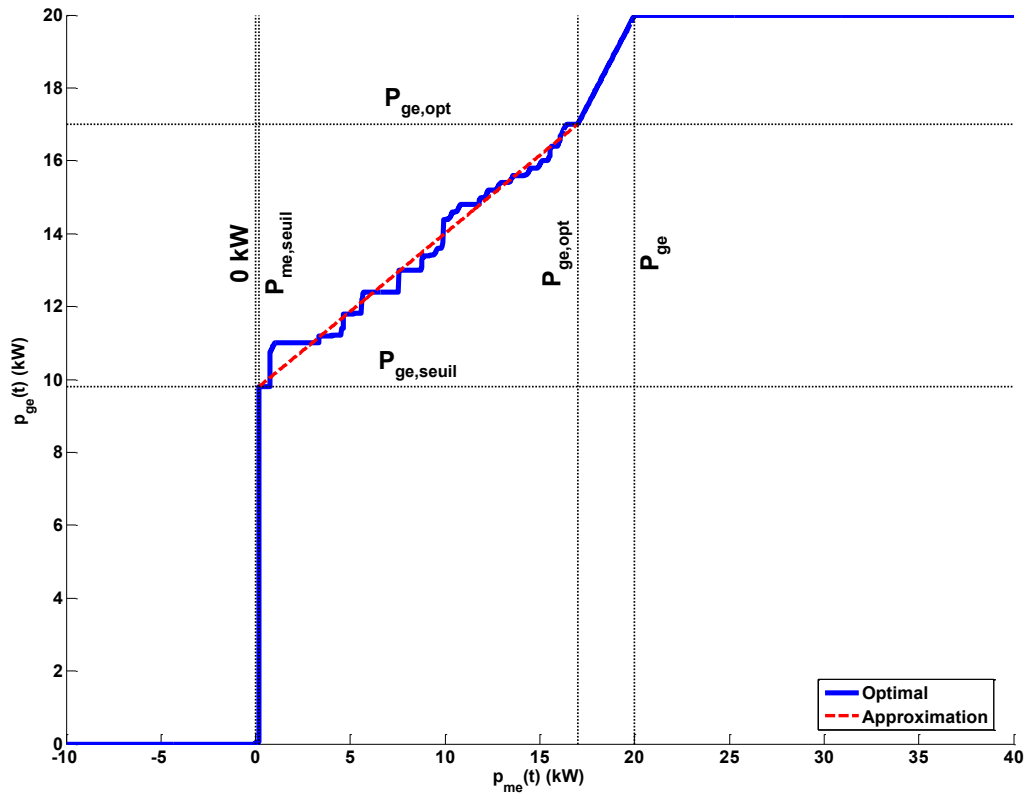


Figure 3.21 Puissance $p_{ge}(t)$ en fonction de $p_{me}(t)$

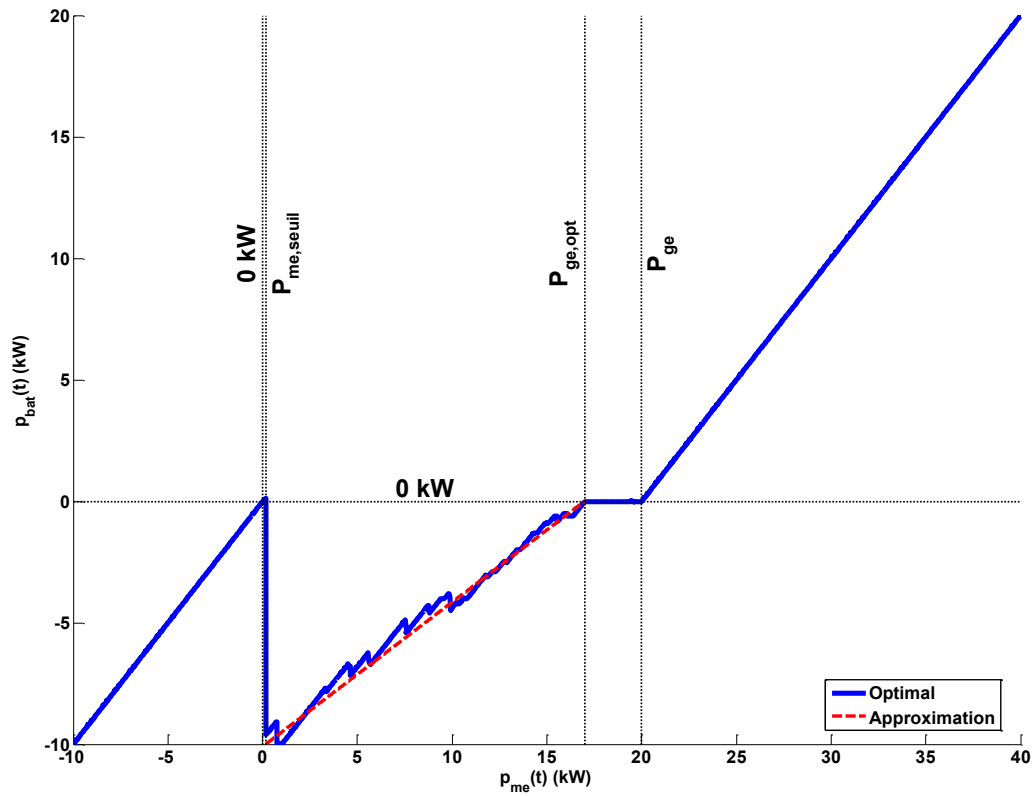


Figure 3.22 Puissance $p_{bat}(t)$ en fonction de $p_{me}(t)$

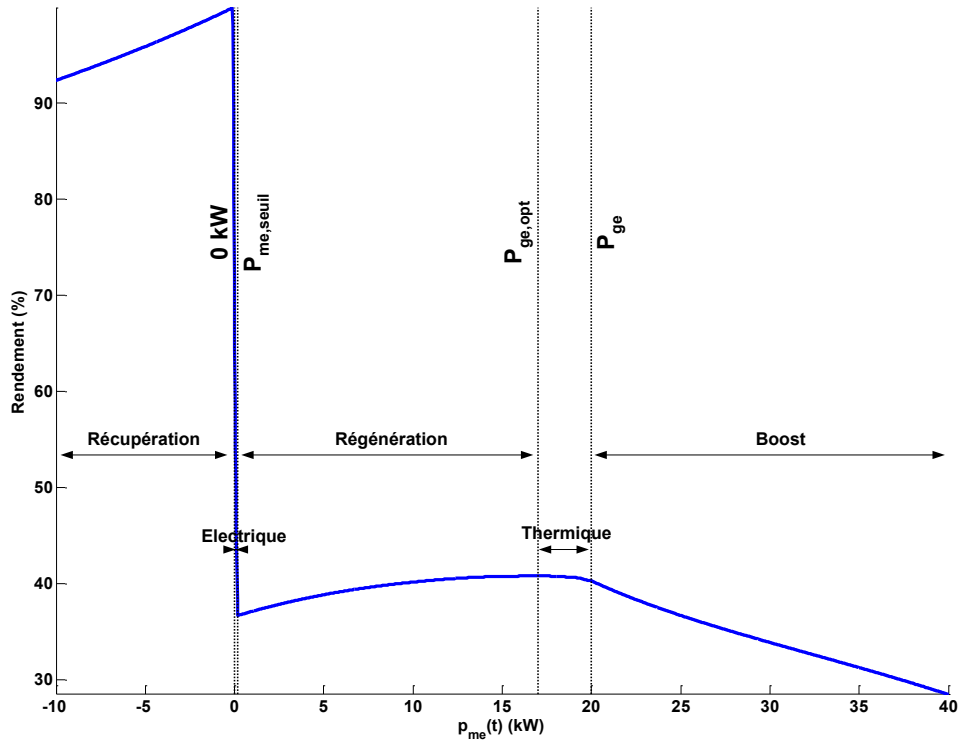


Figure 3.23 Rendement $\eta_{max}(t)$ en fonction de $p_{me}(t)$

L'analyse de ces courbes permet de distinguer six modes de fonctionnement de la chaîne de traction :

- 1) $p_{me}(t) < -P_{bat,c}$: Récupération + Frein mécanique
- 2) $-P_{bat,c} \leq p_{me}(t) < 0$: Récupération
- 3) $0 \leq p_{me}(t) < P_{me,seuil}$: Electrique
- 4) $P_{me,seuil} \leq p_{me}(t) < P_{ge,opt}$: Régénération
- 5) $P_{ge,opt} \leq p_{me}(t) < P_{ge}$: Thermique
- 6) $P_{ge} \leq p_{me}(t)$: Boost

D'après la Figure 3.21, le mode électrique est quasiment absent puisque $P_{me,seuil} = 155 \text{ W}$ est très proche de la valeur nulle. En effet, le mode régénération engendre un meilleur rendement de la chaîne de traction comparé à celui du mode tout électrique où la batterie est considérée rechargée au rendement $\eta_{ge}^{opt} \times \eta_{bat,c}^{moy}$. Dans le cas d'un véhicule hybride dont la batterie ne peut pas être rechargée sur le réseau, le mode électrique n'est donc pas à privilégier.

Concernant le mode Régénération, les points de fonctionnement identifiés pour maximiser le rendement seront approximés linéairement comme présenté en Figure 3.21 et Figure 3.22.

Cette étude du rendement de la chaîne de traction s'est basée sur les modèles génériques adimensionnels des composants. A partir de ceux-ci, pour différents dimensionnements de la batterie et du groupe électrogène, la distribution de la puissance entre ces deux composants maximisant le rendement global a été identifiée. Ainsi, quel que soit le dimensionnement des composants de la chaîne de traction, pour une puissance de la machine électrique donnée, la stratégie de gestion de l'énergie pourra s'appuyer sur ces résultats afin de répartir la puissance

entre le groupe électrogène et la batterie. Ceci permettra d'avoir une gestion de l'énergie adaptée quel que soit le dimensionnement de la chaîne de traction.

3.4.1.2 Proposition de stratégie de gestion de l'énergie

A partir de l'étude précédente, nous avons défini la stratégie de gestion de l'énergie en mode « Optimal ». Le rendement global de la chaîne de traction étant maximisé, c'est ce mode de gestion qui permet de minimiser la consommation de carburant. Cependant, cette gestion de l'énergie ne prend pas en compte l'état d'énergie SOE de la batterie.

C'est pourquoi nous avons choisi d'introduire deux autres modes, le mode de gestion « Décharge » lorsque le SOE est élevé, auquel cas la décharge de la batterie sera privilégiée, et le mode « Charge » lorsqu'il est faible, amenant à favoriser la charge de la batterie.

3.4.1.2.1 Mode de gestion « Optimal »

L'étude précédente a permis de définir l'algorithme de gestion en mode « Optimal » présenté en Figure 3.24. A chaque instant de la mission du véhicule, la puissance demandée au niveau de la machine électrique permet de choisir le mode de gestion de l'énergie.

La première étape consiste à tester si la puissance $p_{me}(t)$ est inférieure à la puissance maximale de charge de la batterie. Dans ce cas, le système fonctionnera en Récupération avec une puissance de charge de la batterie limitée à $-P_{bat,c}$ et les freins mécaniques seront utilisés.

Si la puissance $p_{me}(t)$ est comprise entre $(-P_{bat,c})$ et zéro alors le fonctionnement Récupération sera activé sans limitation.

Le fonctionnement Tout Electrique, où la batterie fournit seule la puissance à la machine électrique, est appliqué dans le cas où la puissance $p_{me}(t)$ est inférieure au seuil $P_{me,seuil}$ déterminé lors de l'étude précédente.

Si la puissance $p_{me}(t)$ est comprise entre $P_{me,seuil}$ et la puissance du groupe électrogène assurant son rendement optimal $P_{ge,opt}$, alors le fonctionnement Régénération assurera le meilleur rendement global de la chaîne de traction. La puissance du groupe électrogène évolue linéairement entre $P_{ge,seuil}$ et $P_{ge,opt}$ et la batterie est chargée par le surplus de puissance.

Pour une puissance de machine électrique à partir de $P_{ge,opt}$ et jusqu'à la puissance nominale du groupe électrogène P_{ge} , le groupe électrogène assure seul la propulsion du véhicule en fonctionnement Tout Thermique.

Enfin, si la puissance demandée par la machine électrique $p_{me}(t)$ respecte la puissance de décharge maximale de la batterie $P_{bat,d}$, alors le système fonctionnera en Boost.

Le cas échéant, si le dimensionnement des composants de la chaîne de traction ne permet pas d'assurer la demande en puissance de la mission du véhicule, celui-ci est rejeté de la liste des dimensionnements possibles.

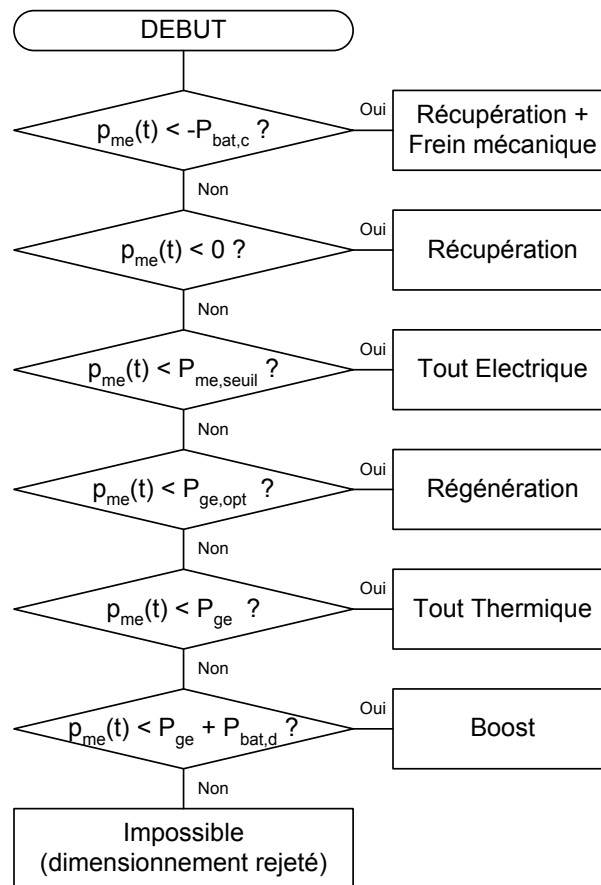


Figure 3.24 Algorithme du mode de gestion « Optimal »

3.4.1.2.2 Mode de gestion « Décharge »

Le mode « Décharge » intervient lorsque l'état d'énergie de la batterie est considéré élevé. Dans ce mode de gestion, le fonctionnement Electrique est privilégié en excluant les fonctionnements Régénération et Thermique comme illustré par l'algorithme en Figure 3.25.

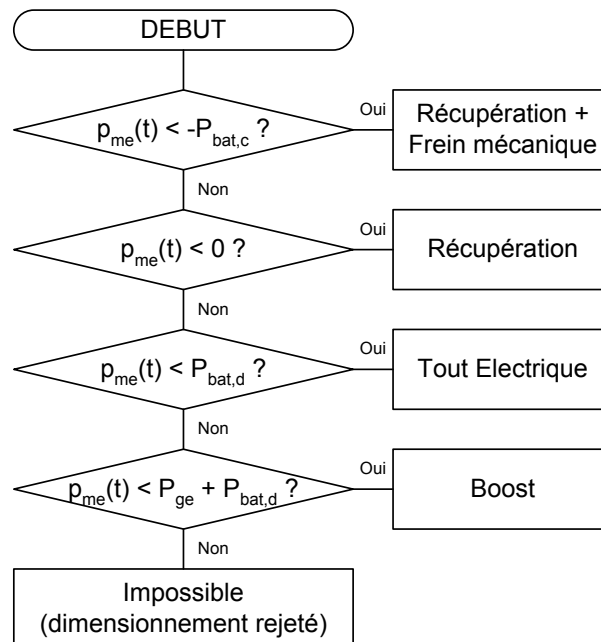


Figure 3.25 Algorithme du mode de gestion « Décharge »

3.4.1.2.3 Mode de gestion « Charge »

Le mode « Charge » intervient lorsque l'état d'énergie de la batterie est faible. Dans ce mode de gestion, le fonctionnement en Régénération est privilégié par rapport aux fonctionnements engendrant une décharge de la batterie ou sa non charge. Ainsi, les fonctionnements Tout Electrique et Tout Thermique ont été exclus. Cependant, dans le cas d'une forte demande en puissance, la décharge est autorisée pour un fonctionnement Boost si la batterie est capable de fournir le complément de puissance. Le détail de l'affectation de la puissance entre la batterie et le groupe électrogène est décrit dans l'algorithme en Figure 3.26.

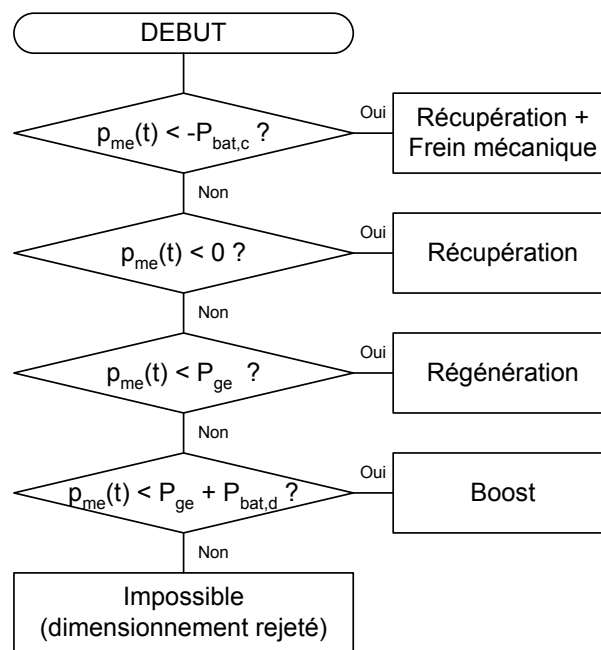


Figure 3.26 Algorithme du mode de gestion « Charge »

3.4.1.2.4 Conditions de passage entre les trois modes de gestion

Le passage d'un mode de gestion à un autre a été défini en fonction de l'état d'énergie SOE de la batterie. Afin d'éviter de passer d'un mode à l'autre de trop nombreuses fois en raison de l'effet de seuil, nous avons introduit des hystérésis pour chaque changement de mode comme présenté en Figure 3.27.

Les seuils ont été choisis de manière arbitraire et sont répertoriés dans le Tableau 3.8. Une meilleure connaissance du modèle des batteries, de leur cyclage et de l'impact des « micro-cycles » sur leur vieillissement permettrait de définir ces seuils sur des critères pertinents. Une perspective serait d'optimiser leurs valeurs afin de minimiser d'autres critères comme la durée de vie du composant. Une autre possibilité serait d'introduire de la logique floue dans cette stratégie de gestion de l'énergie afin de définir le passage entre modes de manière moins abrupte.



Figure 3.27 Passage entre modes par hystérésis

Tableau 3.8 Seuils d'état d'énergie de la batterie

SOE	Valeur
SOE_{min}	40%
$SOE_{c,bas}$	50%
$SOE_{c,haut}$	60%
$SOE_{d,bas}$	80%
$SOE_{d,haut}$	90%
SOE_{max}	100%

3.4.2 STRATEGIE POUR LA STRUCTURE PARALLELE

De manière similaire à la structure série, la stratégie de gestion de l'énergie pour un hybride parallèle est intégrée dans la modélisation de la chaîne de traction. Elle se situe au niveau du nœud entre la transmission mécanique, la machine électrique et le moteur thermique comme illustré en Figure 3.28. Le rôle de la stratégie de gestion de l'énergie est donc de répartir la demande de puissance $p_{trans}(t)$ entre le moteur thermique et la batterie via la machine électrique. Ainsi l'égalité suivante devra être respectée :

$$p_{trans}(t) = p_{me}(t) + p_{mt}(t) \text{ pour } p_{trans}(t) > 0 \quad (3.12)$$

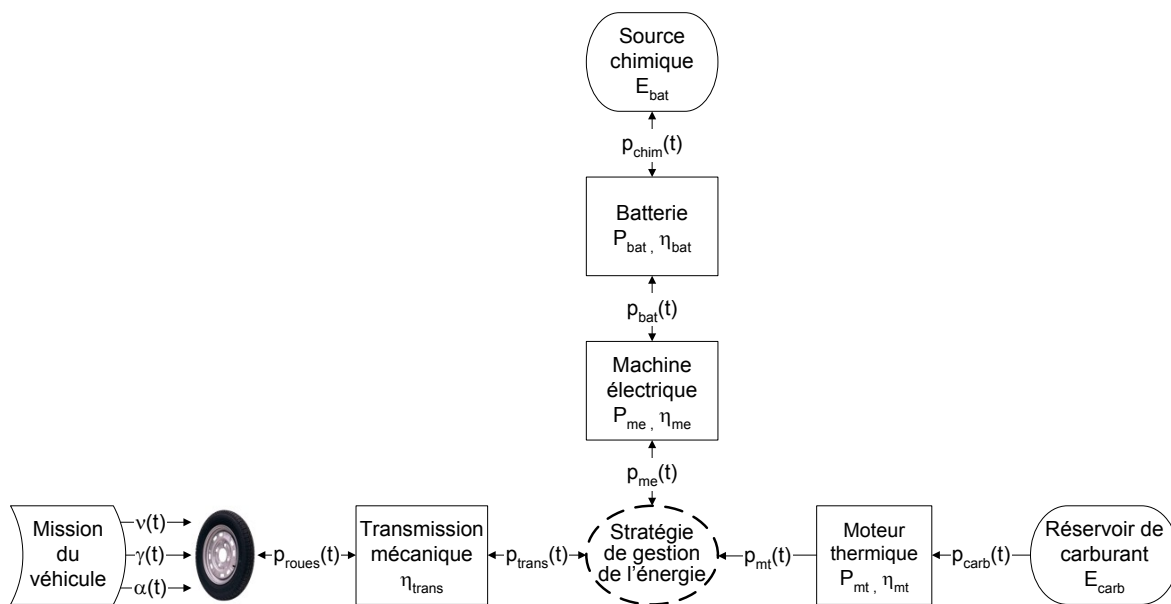


Figure 3.28 Modélisation de la structure hybride parallèle pour le calcul de la consommation

Cinq modes sont identifiés dans un hybride parallèle (Chan, 2007) :

- ◆ Boost : la batterie fournit un complément de puissance au moteur thermique ;
- ◆ Régénération : le moteur thermique fournit une puissance supérieure à celle demandée au niveau de la transmission afin de fonctionner au meilleur rendement possible, le surplus d'énergie permettant de recharger la batterie ;
- ◆ Récupération : le moteur thermique est à l'arrêt et la batterie récupère l'énergie cinétique ou de freinage aux roues.
- ◆ Tout Electrique : le moteur thermique est arrêté, le véhicule est propulsé par l'énergie de la batterie ;
- ◆ Tout Thermique : le véhicule est propulsé par l'énergie du moteur thermique uniquement ;

Pareillement à l'étude précédente concernant l'architecture série, la stratégie est adaptée en fonction du dimensionnement des composants de la chaîne de traction parallèle. Le critère de répartition de la puissance est basé sur l'étude du rendement de la chaîne de traction.

3.4.2.1 Cartographie du rendement de la chaîne de traction

Le rendement global entre les sources d'énergie et l'entrée de la transmission mécanique a été calculé pour chacun des modes de fonctionnement comme présenté dans le Tableau 3.9. Le coefficient de correction Δp_{carb} permet de considérer la puissance de recharge de la batterie au rendement optimal du moteur thermique et au rendement moyen de l'ensemble machine électrique et batterie en charge.

Tableau 3.9 Rendement en fonction du mode de fonctionnement

Mode	Rendement de la chaîne de traction
Boost / Electrique	$\eta = \frac{p_{trans}(t)}{p_{carb}(t) + p_{chim}(t) + \Delta p_{carb}}$ où $\Delta p_{carb} = \frac{p_{chim}(t)}{\eta_{mt}^{opt} \times \eta_{me,c}^{moy} \times \eta_{bat,c}^{moy}}$
Thermique	$\eta = \frac{p_{trans}(t)}{p_{carb}(t)}$
Régénération	$\eta = \frac{p_{trans}(t) - p_{chim}(t)}{p_{carb}(t)}$
Récupération	$\eta = \frac{-p_{chim}(t)}{p_{carb}(t) - p_{trans}(t)}$

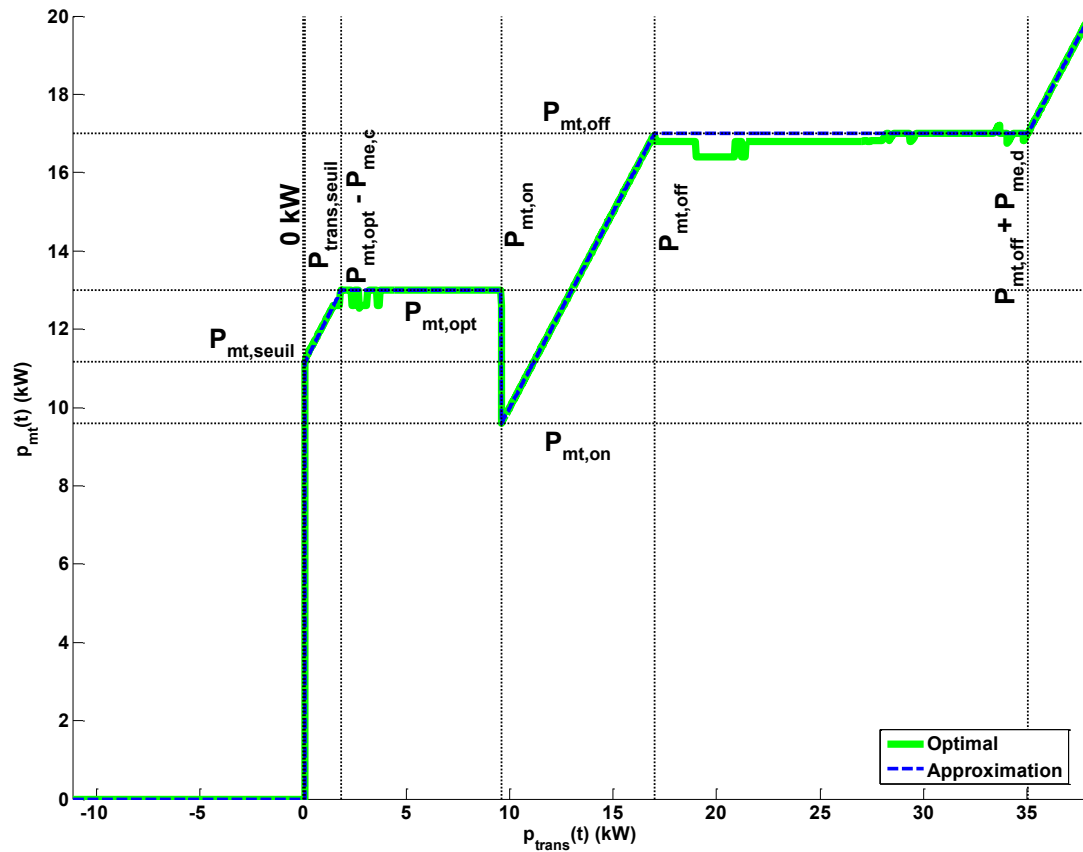
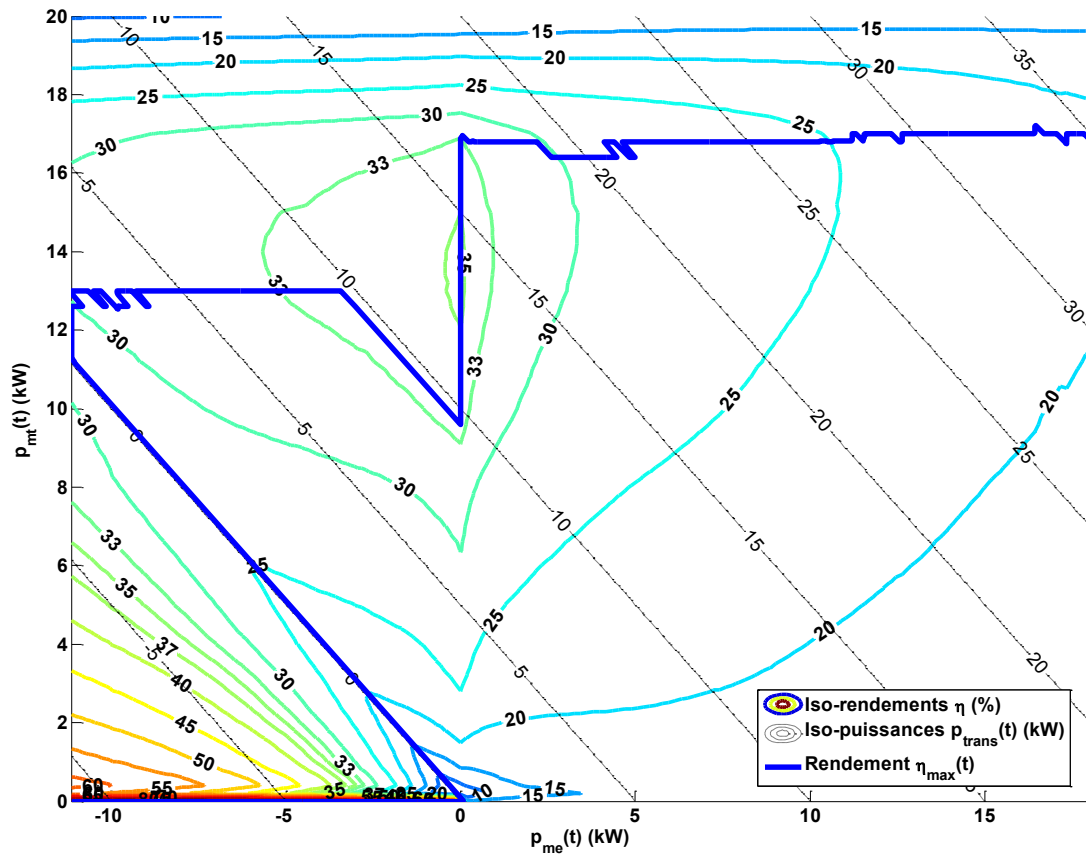
Plusieurs cartographies du rendement global en fonction de $p_{mt}(t)$ et de $p_{me}(t)$ ont été calculées en se basant sur les modèles génériques adimensionnels de la batterie (Figure 3.9), de la machine électrique (Figure 3.11) et du moteur thermique (Figure 3.13) pour différents dimensionnements $\{P_{mt}; E_{bat}\}$. Les différentes cartographies de rendement obtenues présentent globalement les mêmes caractéristiques dont un exemple est donné en Figure 3.29 pour une batterie de 2 kWh et un moteur thermique de 20 kW.

Sachant que $p_{trans}(t) = p_{mt}(t) + p_{me}(t)$, les iso-puissances de la machine électrique ont été superposées aux iso-rendements de la chaîne de traction. Ainsi, pour chaque puissance demandée $p_{trans}(t)$, le point de fonctionnement $\{p_{mt}(t); p_{me}(t)\}$ maximisant le rendement $\eta_{max}(t)$ peut être identifié.

Issues de cette caractéristique au rendement maximisé, les Figure 3.30 à Figure 3.32 décrivent respectivement la puissance du moteur thermique $p_{mt}(t)$, la puissance de la machine électrique $p_{me}(t)$ et le rendement résultant $\eta_{max}(t)$ en fonction de la puissance à la transmission $p_{trans}(t)$.

De ces courbes sont identifiables plusieurs seuils caractéristiques définis comme suit :

- $P_{mt,opt}$: puissance du moteur thermique à son meilleur rendement
- $P_{mt,seuil}$: puissance du moteur thermique lorsqu'il démarre
- $P_{trans,seuil}$: puissance de la transmission où le moteur thermique passe de 0 kW à $P_{mt,seuil}$
- $P_{me,c}$: puissance maximale de la machine électrique limitée par la batterie en charge
- $P_{me,d}$: puissance maximale de la machine électrique limitée par la batterie en décharge
- $P_{mt,on}$: puissance du moteur thermique au passage en mode de fonctionnement Thermique
- $P_{mt,off}$: puissance du moteur thermique à la fin du mode de fonctionnement Thermique



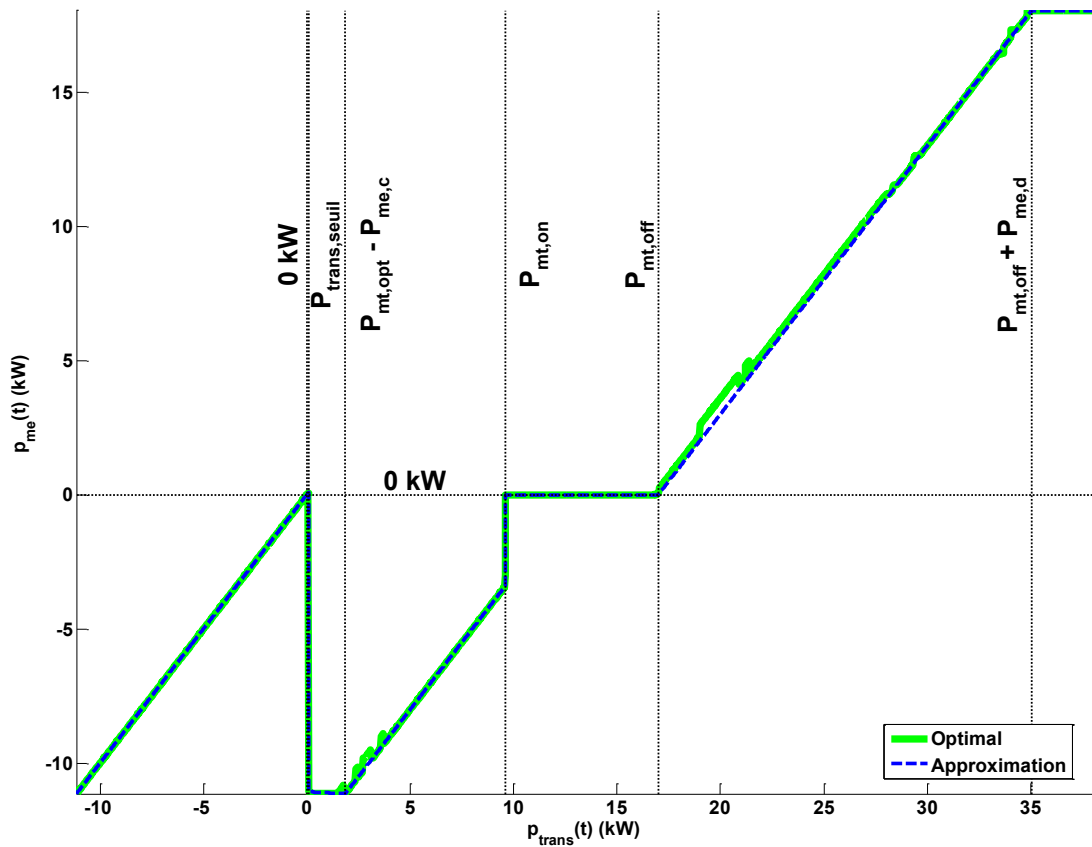


Figure 3.31 Puissance $p_{me}(t)$ en fonction de $p_{trans}(t)$

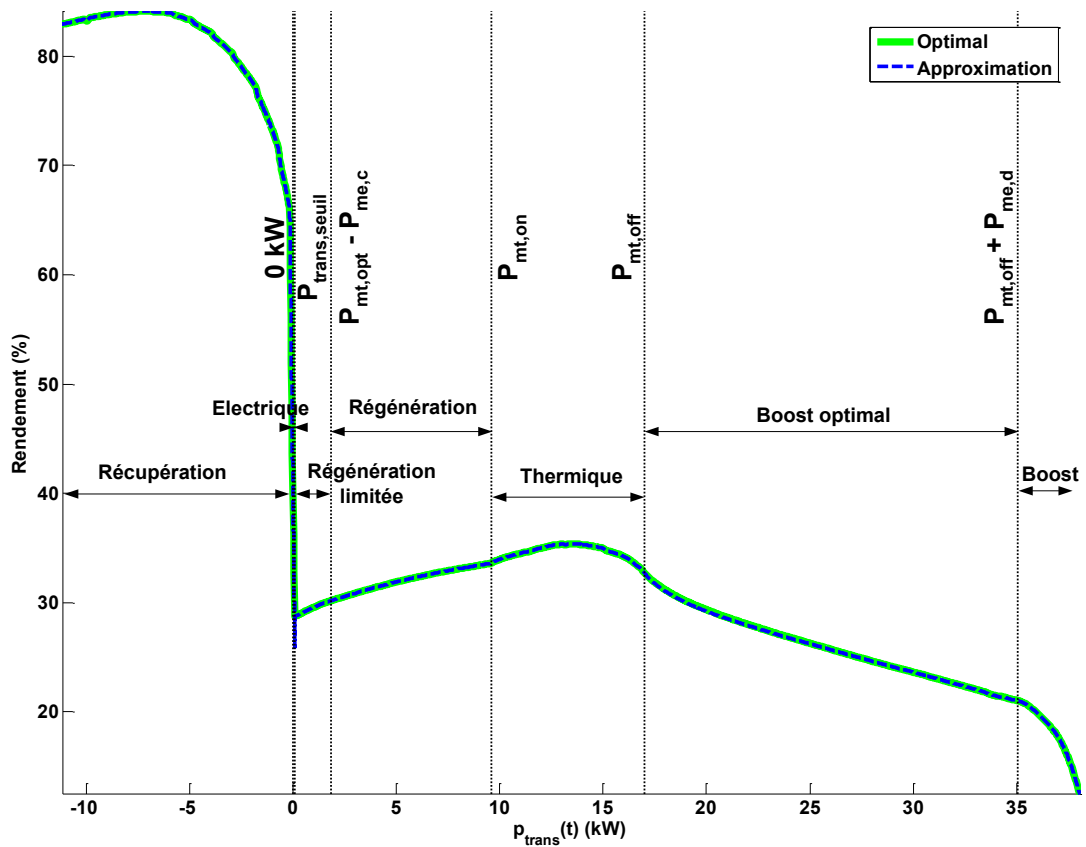


Figure 3.32 Rendement $\eta_{max}(t)$ en fonction de $p_{trans}(t)$

L'analyse de ces courbes permet enfin de distinguer huit modes de fonctionnement de la chaîne de traction parallèle :

- 1) $p_{trans}(t) < -P_{me,c}$: Récupération + Frein mécanique
- 2) $-P_{me,c} \leq p_{trans}(t) < 0$: Récupération
- 3) $0 \leq p_{trans}(t) < P_{trans,seuil}$: Electrique
- 4) $P_{trans,seuil} \leq p_{trans}(t) < P_{mt,opt} - P_{me,c}$: Régénération limitée par la batterie en charge
- 5) $P_{mt,opt} - P_{me,c} \leq p_{trans}(t) < P_{mt,on}$: Régénération
- 6) $P_{mt,on} \leq p_{trans}(t) < P_{mt,off}$: Thermique
- 7) $P_{mt,off} \leq p_{trans}(t) < P_{mt,off} + P_{me,d}$: Boost optimal
- 8) $P_{mt,off} + P_{me,d} \leq p_{trans}(t)$: Boost

De manière similaire à l'étude de la structure série, le mode électrique est quasiment absent puisque $P_{me,seuil} = 105 \text{ W}$ d'après la Figure 3.31. Ceci s'explique de nouveau par la pénalisation de la décharge introduite plus tôt. Les points de fonctionnement identifiés pour maximiser le rendement sont approximés linéairement. Cette approximation présente un impact négligeable sur le rendement de la chaîne de traction comme démontré en Figure 3.32.

3.4.2.2 Proposition de stratégie de gestion de l'énergie

Les trois mêmes modes de gestion sont définis pour l'architecture parallèle :

- « Optimal » : basée sur l'étude précédente du rendement,
- « Décharge » : pour favoriser la décharge de la batterie lorsque son *SOE* est élevé,
- « Charge » : pour privilégier la charge de la batterie lorsque son *SOE* est faible.

3.4.2.2.1 Mode de gestion « Optimal »

L'étude précédente a permis de définir l'algorithme de gestion en mode « Optimal » présenté en Figure 3.33. A chaque instant de la mission du véhicule, la puissance demandée au niveau de la transmission mécanique permet de choisir le mode de gestion de l'énergie.

Cet algorithme, très proche de celui développé pour la structure série, fait apparaître deux modes de fonctionnement supplémentaires :

- ◆ Régénération limitée : si la puissance $p_{trans}(t)$ est comprise entre $P_{trans,seuil}$ et $P_{mt,opt} - P_{me,c}$ alors la puissance du moteur thermique évolue linéairement entre $P_{mt,seuil}$ et $P_{mt,opt}$, la batterie étant chargée à sa puissance maximale admise.
- ◆ Boost optimal : le moteur thermique se place à la puissance $P_{mt,off}$ fournissant un bon rendement et l'ensemble {batterie ; machine électrique} assure le complément en fonction de la puissance demandée à la transmission mécanique.

3.4.2.2.2 Mode de gestion « Décharge »

Le mode « Décharge » intervient lorsque l'état d'énergie de la batterie est considéré élevé. Dans ce mode de gestion, le fonctionnement Electrique est privilégié en excluant les fonctionnements Régénération et Thermique comme illustré par l'algorithme de la Figure 3.34.

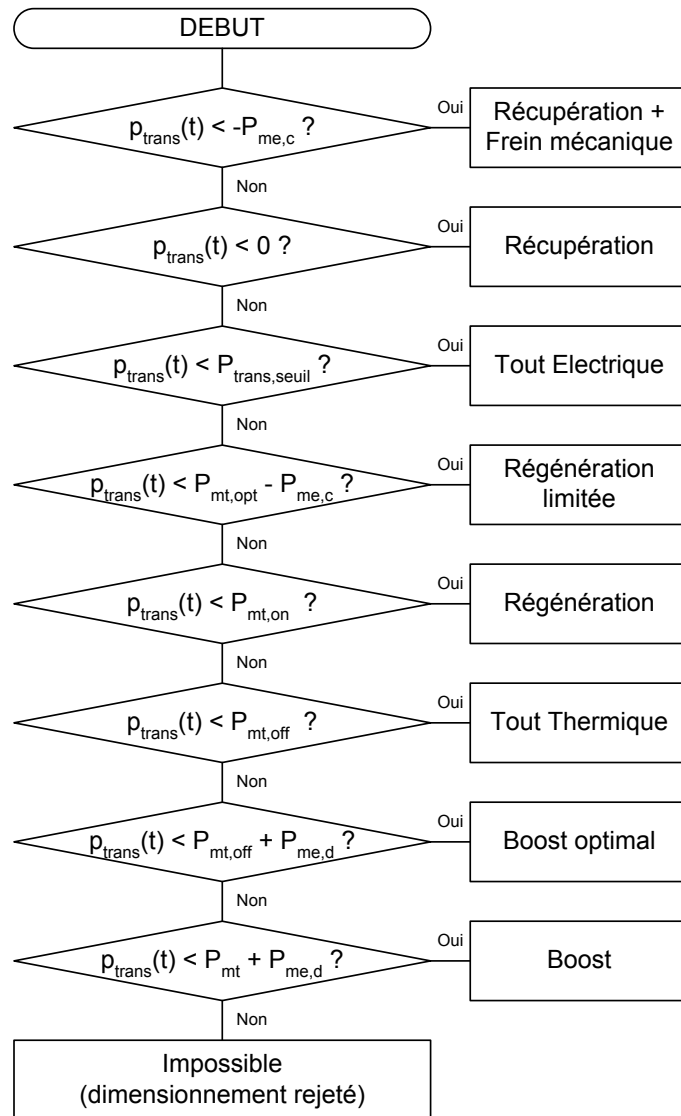


Figure 3.33 Algorithme du mode de gestion « Optimal »

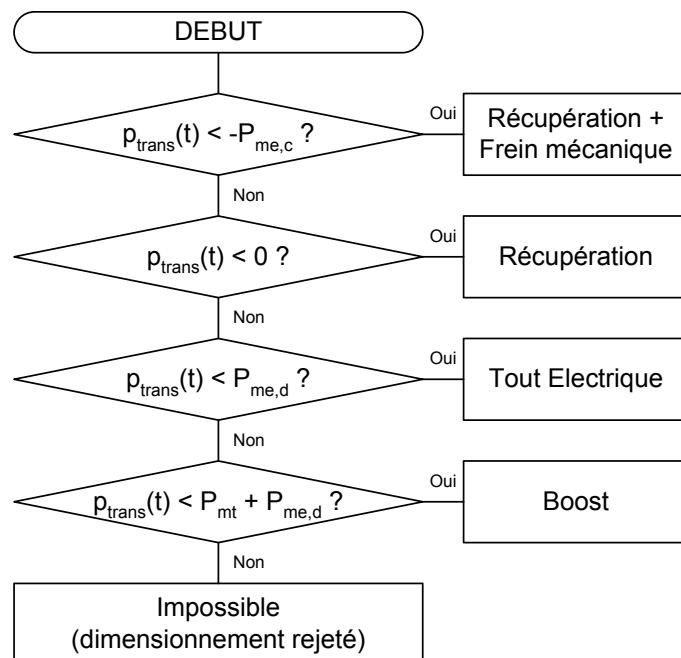


Figure 3.34 Algorithme du mode de gestion « Décharge »

3.4.2.2.3 Mode de gestion « Charge »

Le mode « Charge » intervient lorsque l'état d'énergie de la batterie est faible. Dans ce mode de gestion, le fonctionnement en Régénération est privilégié par rapport aux fonctionnements engendrant une décharge de la batterie ou sa non charge. Ainsi, les fonctionnements Tout Electrique et Tout Thermique ont été exclus. Cependant, dans le cas d'une forte demande en puissance, la décharge est autorisée pour un fonctionnement Boost si la batterie est capable de fournir le complément de puissance. Le détail de l'affectation de la puissance entre la machine électrique et le moteur thermique est décrit dans l'algorithme en Figure 3.35.

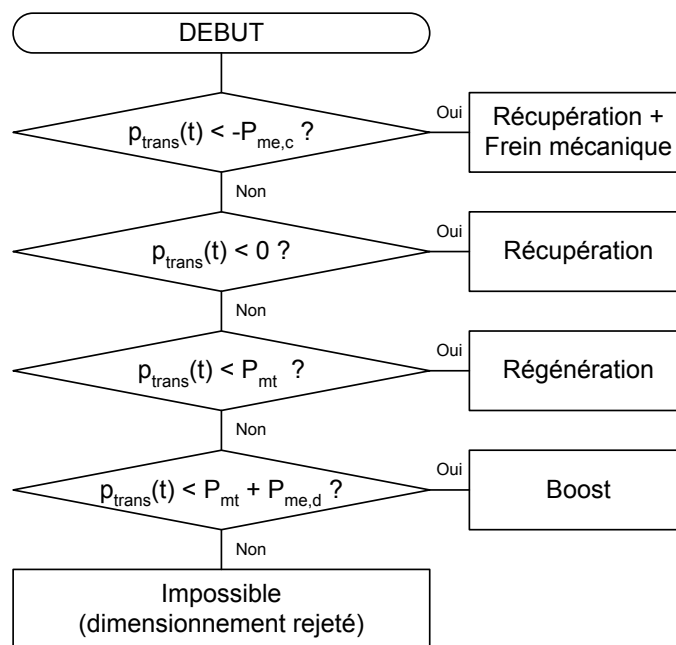


Figure 3.35 Algorithme du mode de gestion « Charge »

3.4.2.2.4 Conditions de passage entre les trois modes de gestion

Le passage d'un mode de gestion à un autre a été défini de la même manière que pour la structure série comme expliqué dans le paragraphe 3.4.1.2.4. Les hystérésis permettent d'éviter un passage intempestif entre modes. Les seuils définis en fonction de l'état d'énergie *SOE* de la batterie ont été choisis de manière arbitraire mais pourront faire l'objet d'une optimisation à l'avenir.

3.5 CALCUL DE LA CONSOMMATION

3.5.1 CALCUL DE LA CONSOMMATION MOYENNE DE CARBURANT LORS D'UNE MISSION

Afin d'estimer la consommation en carburant du véhicule lors d'une mission, l'algorithme décrit en Figure 3.36 est appliqué. Cet algorithme présente la démarche pour la structure hybride série ; la démarche pour l'architecture parallèle est très similaire.

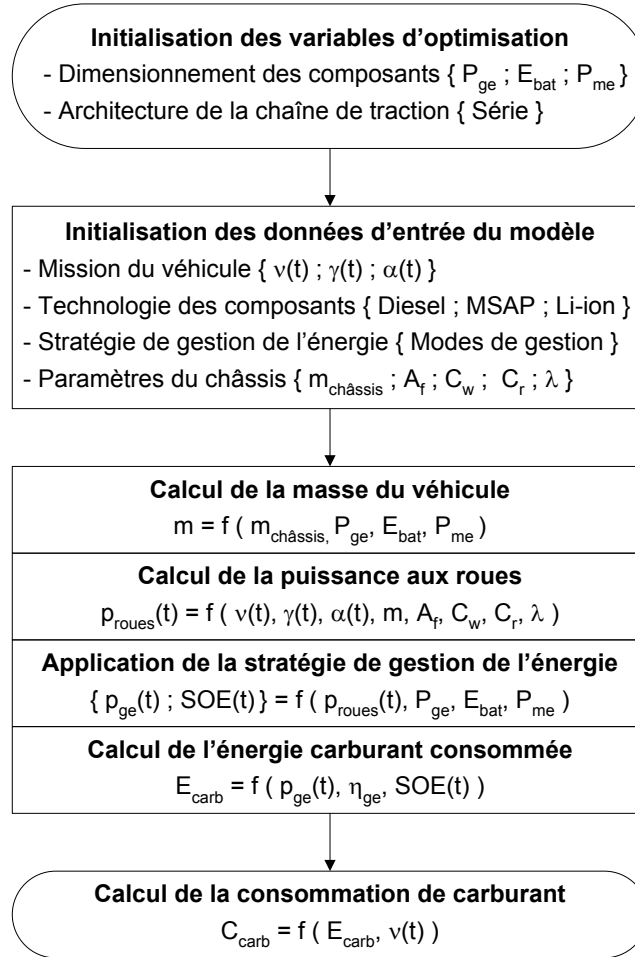


Figure 3.36 Algorithme de calcul de la consommation

La première étape est d'initialiser les deux variables d'optimisation, que sont le dimensionnement et l'architecture de la chaîne de traction. Dans une deuxième étape, les quatre données d'entrée du modèle, à savoir la mission du véhicule, la technologie des composants, la stratégie de gestion de l'énergie et les paramètres du châssis, sont à leur tour initialisées.

Le dimensionnement des composants $\{ P_{ge} ; E_{bat} ; P_{me} \}$ ayant été fixé, la masse du véhicule peut être calculée selon l'équation (3.13) par la somme des masses du châssis $m_{châssis}$ et de la chaîne de traction m_{tract} . En considérant la masse engendrée par chacun des composants de la chaîne de traction selon leur puissance et énergie massiques sP_{ge} , sP_{me} et sE_{bat} , la masse m_{tract} peut être exprimée d'après l'équation (3.14).

$$m = m_{châssis} + m_{tract} \quad (3.13)$$

$$m_{tract} = \frac{P_{ge}}{sP_{ge}} + \frac{P_{me}}{sP_{me}} + \frac{E_{bat}}{sE_{bat}} \quad (3.14)$$

A partir de la mission $\{v(t); \gamma(t); \alpha(t)\}$, de la masse m et des paramètres du châssis du véhicule, le profil de la puissance aux roues $p_{roues}(t)$ est alors calculé.

Une fois la stratégie de gestion de l'énergie appliquée au modèle du véhicule défini, les profils de puissance du groupe électrogène $p_{ge}(t)$ et d'état d'énergie de la batterie $SOE(t)$ sont déterminés.

Ainsi le profil de la puissance en sortie du réservoir de carburant $p_{carb}(t)$ peut être calculé selon l'expression (3.15) :

$$p_{carb}(t) = \frac{p_{ge}(t)}{\eta_{ge} \left(\frac{p_{ge}(t)}{P_{ge}} \right)} \quad (3.15)$$

A partir de cette puissance, il est possible de calculer l'énergie carburant consommée E_{carb} lors de la mission. Cependant, la stratégie de gestion de l'énergie actuellement utilisée n'assure pas de terminer la mission avec le même état d'énergie de la batterie qu'au début. En conséquence, le coefficient de correction ΔE_{carb} a été introduit afin de prendre en compte, dans un premier cas, l'énergie nécessaire pour recharger la batterie à son état d'énergie initial ou, dans le second cas, le gain de carburant lorsque l'état d'énergie final de la batterie est supérieur à l'initial (Opila, et al., 2009). L'énergie consommée est donc calculée selon (3.16) :

$$E_{carb} = \int_{t_0}^{t_f} p_{carb}(t) dt + \Delta E_{carb} \quad (3.16)$$

Ce coefficient d'ajustement ΔE_{carb} est fonction de la capacité de la batterie E_{bat} , de la variation d'énergie ΔSOE lors de la mission et du rendement défini précédemment $\eta_{ge}^{opt} \times \eta_{bat,c}^{moy}$ pour recharger la batterie à partir du groupe électrogène selon les équations (3.17) et (3.18).

$$\Delta E_{carb} = \frac{E_{bat} \times \Delta SOE}{\eta_{ge}^{opt} \times \eta_{bat,c}^{moy}} \quad (3.17)$$

$$\Delta SOE = SOE(t_0) - SOE(t_f) \quad (3.18)$$

A partir de cette énergie E_{carb} en kWh, il est possible d'en déduire la consommation sur la mission en litre de carburant aux cent kilomètres selon l'expression (3.19). Pour cela, la distance parcourue lors de la mission est déduite du profil en vitesse $v(t)$ et l'énergie volumique du gazole est prise égale à 9,94 kWh/l (voir Tableau 3.5).

$$C_{carb} = \frac{E_{carb}}{9,94} \times \frac{100}{\int_{t_0}^{t_f} v(t) dt} \quad (3.19)$$

3.5.2 APPLICATION A UNE MISSION STANDARD

3.5.2.1 Consommation d'une structure série

Afin de donner un exemple d'application du calcul de la consommation de carburant, nous choisissons :

- les caractéristiques du châssis identifié dans le Chapitre 2,
- la structure de véhicule hybride série décrite en Figure 3.19,
- la stratégie de gestion de l'énergie définie dans la section 3.4.1.2,
- la technologie des composants choisie dans la section 3.3,
- les trois missions du véhicule suivantes : le standard européen NEDC, la mission urbaine mesurée et la mission extra-urbaine mesurée,
- plusieurs dimensionnements des composants présentés dans le Tableau 3.10.

Le Tableau 3.10 synthétise les résultats en termes de consommation de carburant et d'état d'énergie final de la batterie pour un *SOE* initial de 70% en début de mission. Ces résultats montrent des variations non négligeables de consommation en fonction du dimensionnement pour une même mission.

Dans le cas de la mission standard NEDC, la meilleure consommation de 3,79 l/100km s'obtient pour un groupe électrogène de 10 kW et une batterie de 5 kWh alors que la moins bonne consommation de 10,96 l/100km est obtenue avec $P_{ge} = 30$ kW et $E_{bat} = 2$ kWh. Cette différence importante de consommation peut être expliquée à partir des bilans de puissance présentés en Figure 3.37 et Figure 3.38 respectivement. En effet, sur le dernier tiers du cycle standard NEDC, une puissance plus importante est demandée à la machine électrique. Dans le cas du premier dimensionnement, le groupe électrogène est limité à sa puissance maximale de 10kW et la batterie permet d'assurer le mode Boost. Dans le second cas, le groupe électrogène est davantage sollicité dans sa plage de mauvais rendement en début de mission et la faible capacité de batterie ne permet pas de réduire la consommation de carburant.

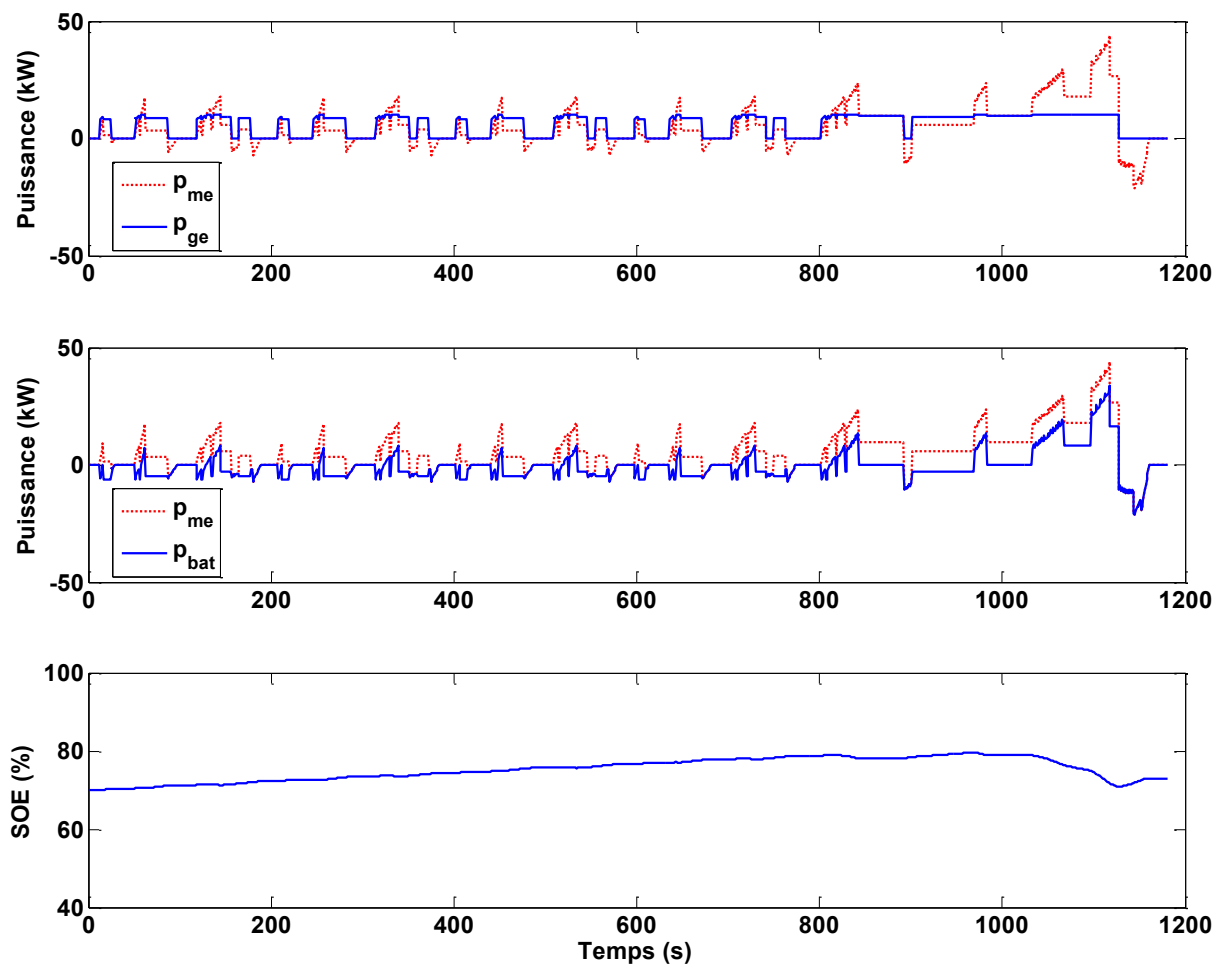
En ce qui concerne la mission urbaine mesurée, les dimensionnements 1, 2, 4, 5 et 6 ne permettent pas de l'assurer. En effet, le véhicule est contraint par la puissance maximale que peuvent fournir le groupe électrogène et la batterie en mode Boost indiqué par le sigle $P_{bat,d}$ dans le tableau. Ces dimensionnements permettent une puissance maximale de boost de 50 kW alors que la mission requiert une puissance de 52 kW à l'entrée de la machine électrique.

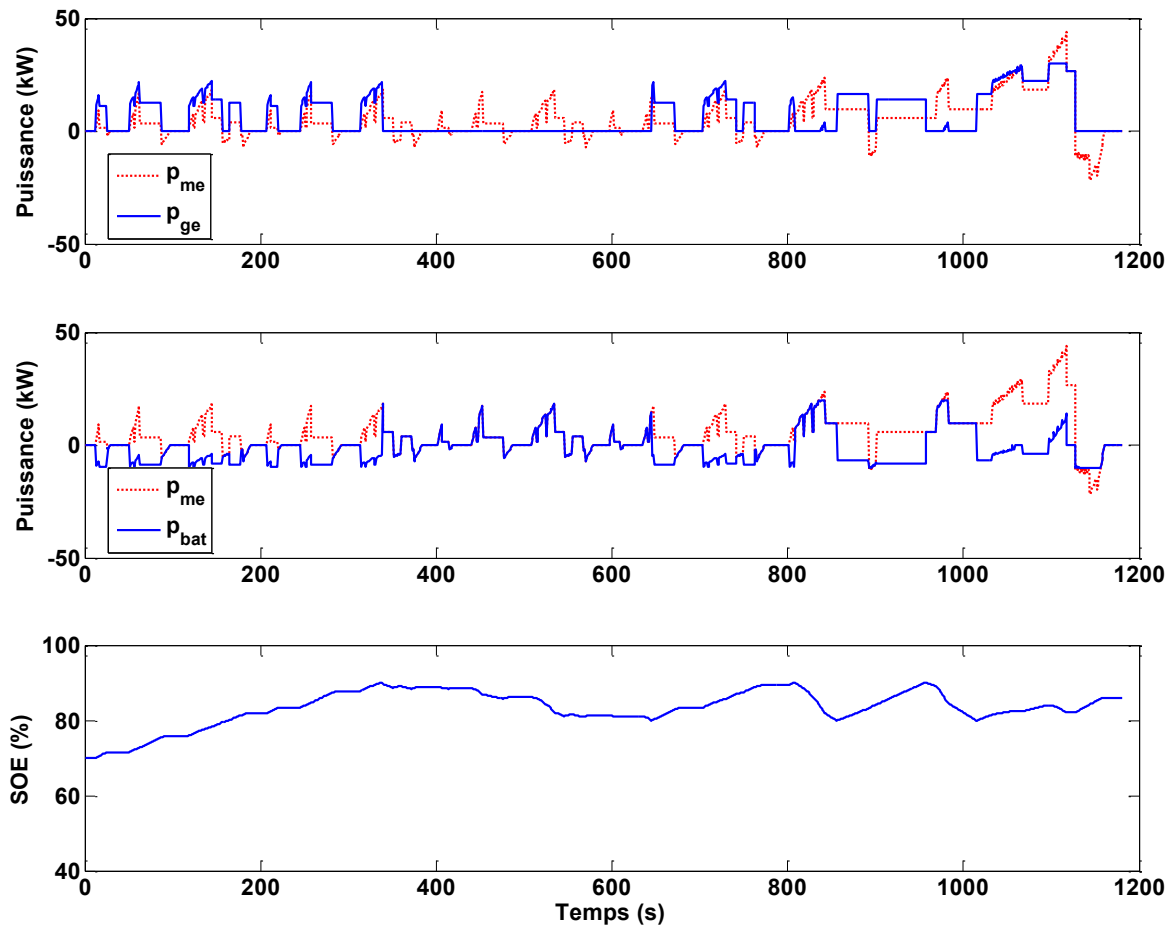
Concernant la mission extra-urbaine mesurée et pour un même groupe électrogène de 40 kW, le dimensionnement de la batterie s'avère être un critère important. En effet, une capacité de 1 kWh implique la moins bonne consommation alors qu'en l'augmentant à 5 kWh, il devient possible d'atteindre la meilleure consommation des tests effectués.

Un grand nombre de dimensionnements ne permettent pas d'effectuer les missions mesurées mais assurent, cependant, le standard NEDC. Ce cycle ne semble donc pas fiable pour s'en servir de base de dimensionnement.

Tableau 3.10 Consommation de carburant (l/100km) et SOE final de la batterie (%)

Dimensionnement des composants					Missions du véhicule		
n°	P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)	$P_{me,max}$ (kW)	m_{prop} (kg)	Standard NEDC	Mission urbaine mesurée	Mission extra- urbaine mesurée
1	5	5	50	72	3,86 l/100km 55 %	$P_{bat,d}$	$P_{bat,d}$
2	10	4	50	75	3,81 l/100km 74 %	$P_{bat,d}$	$P_{bat,d}$
3	10	5	50	81	3,79 l/100km 73 %	3,32 l/100km 81 %	$P_{bat,d}$
4	20	3	50	86	3,95 l/100km 79 %	$P_{bat,d}$	$P_{bat,d}$ SOE
5	30	2	50	98	10,96 l/100km 86 %	$P_{bat,d}$	5,68 l/100km 88 %
6	40	1	50	110	4,37 l/100km 90 %	$P_{bat,d}$	6,15 l/100km 87 %
7	40	5	50	136	4,02 l/100km 85 %	3,59 l/100km 84 %	4,66 l/100km 89 %

Figure 3.37 Bilan de puissance $\{P_{ge} = 10 \text{ kW} ; E_{bat} = 4 \text{ kWh} ; \text{Standard NEDC}\}$



3.5.2.2 Consommation d'une structure parallèle

Un nouvel exemple d'application du calcul de la consommation de carburant est donné avec les mêmes paramètres précédents mais pour une structure de véhicule hybride parallèle comme illustré en Figure 3.28. Le Tableau 3.11 synthétise les résultats en termes de consommation de carburant et d'état d'énergie final de la batterie pour un même SOE initial de 70% en début de mission. Ces résultats montrent des variations de consommation moins sensibles au dimensionnement que pour la structure série mais cependant non négligeables. En effet, l'écart entre la meilleure et la moins bonne consommation pour la mission standard NEDC est de 1,02 l/100km. Un exemple de bilan de puissance est présenté en Figure 3.39.

En ce qui concerne la mission urbaine mesurée, seul le dimensionnement n°7 permet de l'assurer. En effet, le véhicule est contraint par la puissance maximale que peuvent fournir le moteur thermique et la batterie via la machine électrique en mode Boost comme indiqué par le sigle P_{mt+me} , alors que la mission requiert une puissance de 50 kW à l'entrée de la transmission mécanique. Le dimensionnement n°3 quant à lui est contraint par $P_{bat,d}$ au cours de la mission.

Concernant la mission extra-urbaine mesurée, pour un même groupe électrogène de 40 kW, le dimensionnement de la batterie s'avère être un critère moins important que pour la structure série puisque la différence entre les consommations de carburant et la différence entre les SOE en fin de mission sont assez réduites.

Ces résultats mettent de nouveau en valeur l'intérêt d'une optimisation du dimensionnement en fonction de la mission qui sera développée dans le prochain chapitre.

Tableau 3.11 Structure parallèle : Consommation de carburant (l/100km) et SOE final de la batterie (%)

Dimensionnement des composants					Missions du véhicule		
n°	P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	$P_{me,max}$ (kW)	m_{prop} (kg)	Standard NEDC	Mission urbaine mesurée	Mission extra- urbaine mesurée
1	5	5	45	85	5,34 l/100km 52 %	P_{mt+me}	$P_{bat,d}$
2	10	4	36	75	4,55 l/100km 65 %	P_{mt+me}	$P_{bat,d}$
3	10	5	45	91	4,61 l/100km 66 %	$P_{bat,d}$	$P_{bat,d}$
4	20	3	27	72	4,32 l/100km 85 %	P_{mt+me}	$P_{bat,d}$
5	30	2	18	69	4,54 l/100km 85 %	P_{mt+me}	5,10 l/100km 88 %
6	40	1	9	66	5,08 l/100km 83 %	P_{mt+me}	5,40 l/100km 89 %
7	40	5	45	129	4,83 l/100km 83 %	4,42 l/100km 82 %	5,35 l/100km 90 %

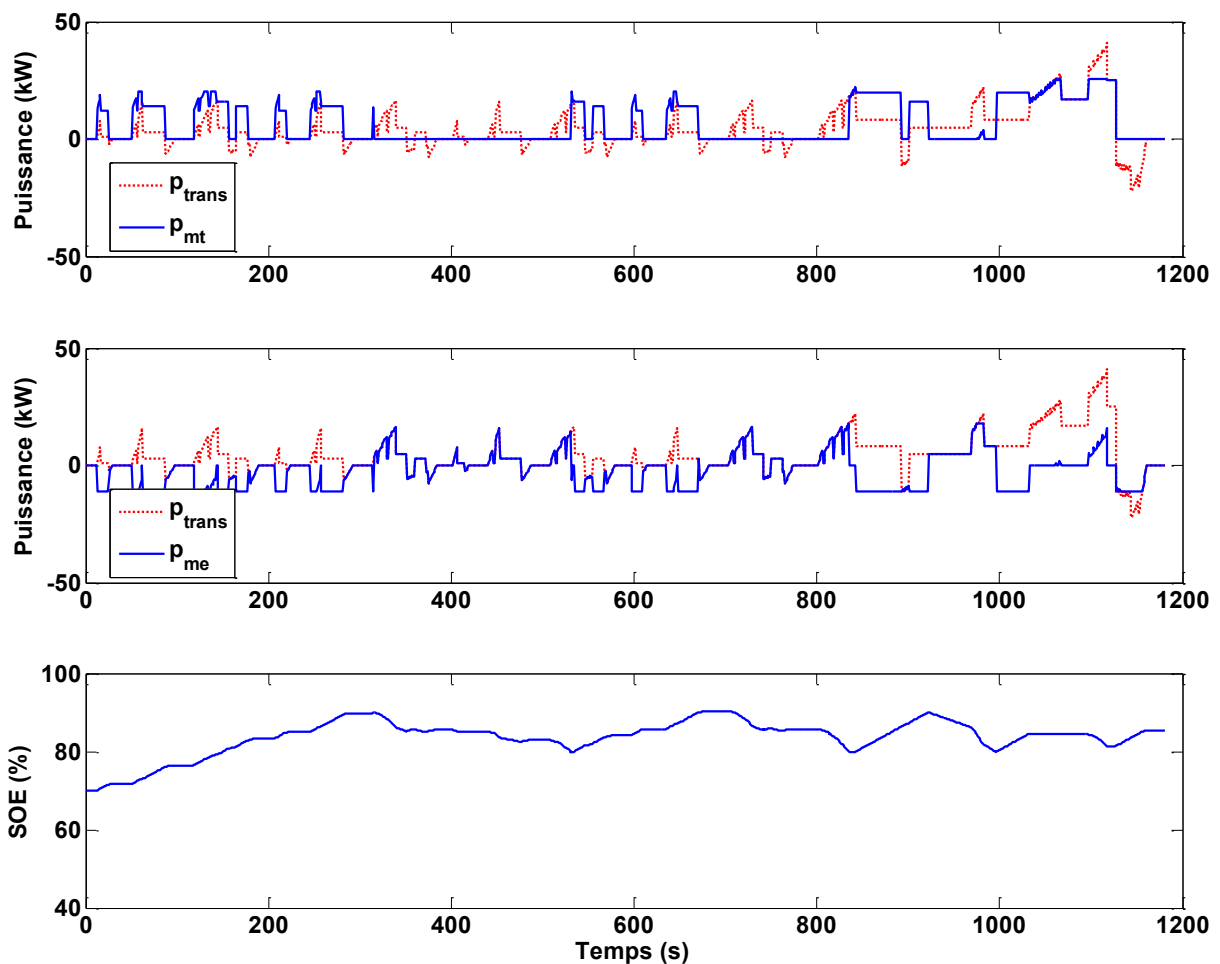


Figure 3.39 Bilan de puissance ($P_{mt} = 30$ kW ; $E_{bat} = 2$ kWh ; Standard NEDC)

3.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, le modèle par flux de puissance d'un véhicule hybride a été proposé afin d'estimer la consommation de carburant sur une mission. Les modèles génériques adimensionnels développés permettent de s'affranchir d'un choix de dimensionnement a priori. De même, les stratégies de gestion de l'énergie proposées pour les architectures série et parallèle sont indépendantes du dimensionnement de la chaîne de traction.

Cette modélisation présente toutefois quelques inconvénients en termes de précision. En effet, une modélisation de type forward avec des modèles dynamiques des composants prendrait mieux en compte toute la complexité du véhicule. De même, les stratégies de gestion de l'énergie ne sont pas optimales et le surplus de consommation à chaque démarrage du moteur thermique n'est pas pris en compte. Il serait aussi intéressant d'intégrer la constante de temps thermique de la machine électrique au modèle afin d'éviter une surcharge trop longue.

Cependant, la modélisation d'un véhicule hybride développée dans ce chapitre permet de calculer la consommation en carburant de manière rapide pour son utilisation dans le processus d'optimisation du dimensionnement. En effet, le calcul de la consommation n'a pris que 6,5 s pour le cycle standard de 20 min, 7,4 s pour la mission extra-urbaine de plus de 12 h de mesures et 9,6 s pour la mission urbaine mesurée d'une durée de 29 h. Ces temps de simulation ont été mesurés via le logiciel Matlab v7.0.4 avec un processeur Intel Core 2 Duo CPU E7500 @ 2,93 GHz sous Windows XP disposant de 3,5 Go de mémoire RAM.

Ainsi, ce modèle nous permettra de considérer l'étude du dimensionnement de la chaîne de traction, pour chacune des architectures et sur un ensemble d'un millier de missions, dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

APPLICATION AU DIMENSIONNEMENT D'UN VEHICULE HYBRIDE

Chapitre 4 Application au dimensionnement d'un véhicule hybride 139

4.1	Introduction.....	141
4.2	Structure hybride série	142
4.2.1	<i>Algorithme de dimensionnement</i>	<i>142</i>
4.2.1.1	Démarche générale.....	142
4.2.1.2	Description de l'algorithme	143
4.2.1.3	Définition des tables de dimensionnement.....	145
4.2.1.4	Dimensionnement de la machine électrique.....	146
4.2.1.5	Calcul de la consommation moyenne d'un dimensionnement	147
4.2.1.6	Recherche du dimensionnement minimisant la consommation	147
4.2.2	<i>Résultats du dimensionnement selon différents types de mission.....</i>	<i>149</i>
4.2.2.1	Missions standards européennes.....	149
4.2.2.2	Missions Artemis.....	155
4.2.2.3	Missions urbaines	158
4.2.2.4	Missions extra-urbaines.....	159
4.2.2.5	Synthèse des dimensionnements	160
4.3	Structure hybride parallèle	162
4.3.1	<i>Algorithme de dimensionnement</i>	<i>162</i>
4.3.1.1	Démarche générale.....	162
4.3.1.2	Description de l'algorithme	163
4.3.2	<i>Résultats du dimensionnement selon différents types de mission.....</i>	<i>166</i>
4.3.2.1	Missions standards européennes.....	166
4.3.2.2	Missions Artemis.....	167
4.3.2.3	Missions urbaines	168
4.3.2.4	Missions extra-urbaines.....	170
4.3.2.5	Synthèse des dimensionnements	171
4.4	Comparatif des structures par rapport aux missions.....	172
4.5	Conclusion	174

4.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, le modèle du véhicule en flux de puissance a été établi afin de calculer sa consommation de carburant pour une structure hybride, un dimensionnement et une mission donnés. En définissant les ensembles de missions générées dans le Chapitre 2 en données d'entrée de cette modélisation, il est possible d'obtenir la consommation moyenne d'une chaîne de traction complète pour une catégorie de mission et une structure donnée. En calculant cette consommation moyenne pour différents dimensionnements et différentes structures, la comparaison des résultats permettra de sélectionner celui et celle pour lesquels l'énergie consommée par le véhicule sera rendue optimale selon la nature de la mission effectuée.

Dans ce chapitre, nous présentons une démarche de dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule hybride. Dans un premier temps, nous nous intéressons à la structure hybride série. L'algorithme proposé y est décrit et les résultats pour différents types de mission y sont commentés. Dans un deuxième temps, la même démarche est appliquée à la structure hybride parallèle. L'outil de dimensionnement proposé a ainsi vocation à guider un concepteur dans ses choix de structure et de caractéristiques nominales des composants de la chaîne de traction pour un type de mission donné.

4.2 STRUCTURE HYBRIDE SERIE

4.2.1 ALGORITHME DE DIMENSIONNEMENT

4.2.1.1 Démarche générale

L'objectif du processus de dimensionnement des composants d'une structure série est d'optimiser la puissance du groupe électrogène et la capacité de la batterie $\{P_{ge}; E_{bat}\}$ afin de minimiser la consommation moyenne de carburant C_{carb} sur un ensemble de mille missions $\{v_k(t); \gamma_k(t); \alpha_k(t)\}_{k=1,\dots,1000}$.

Le processus d'optimisation du dimensionnement est un problème contraint à un domaine de solutions assez restreint. En effet, la plage des dimensionnements réalistes pour le type de véhicule envisagé n'ira pas au-delà de 100 kW pour le groupe électrogène et de 400 kg de batteries soit 60 kWh. De plus, des précisions de 1 kW sur la puissance nominale du groupe électrogène et de 1 kWh sur la capacité de la batterie sont suffisantes dans le cadre d'un pré-dimensionnement de la chaîne de traction.

Des algorithmes d'optimisation tels que ceux basés sur la génétique (Zhengli, et al., 2005) ou sur le chaos (Wu, et al., 2011) donnent l'optimum global et sont performants lorsque les espaces de recherche sont importants. Cependant, ils sont complexes à paramétrer et pour des espaces de faibles tailles, il peut être plus sûr de parcourir cet espace de manière exhaustive afin d'obtenir la solution optimale en un temps qui restera correct.

Ainsi, une recherche exhaustive du dimensionnement optimal du véhicule hybride série est menée de la même manière que (Bernard, et al., 2009) selon un plan d'expériences. Les avantages de cette méthode d'optimisation sont sa rapidité d'exécution et l'obtention d'une vue globale sur les résultats de consommation dans le domaine des solutions de dimensionnement. En effet, la procédure de test de 50 groupes électrogènes combinés à 60 batteries amène à un nombre maximum de 3000 dimensionnements. Cela correspondrait à un algorithme génétique appliqué à une population de 30 individus évoluant sur 100 générations, mais dont la convergence vers l'optimum global ne serait pas obligatoirement garantie.

La Figure 4.1 montre l'organisation globale de ce processus. Les données d'entrée sont au nombre de trois : une table de puissances nominales de groupe électrogène allant de $P_{ge\ 1}$ à $P_{ge\ n}$, une table de capacité de batterie évoluant de $E_{bat\ 1}$ à $E_{bat\ q}$ et un classeur d'un millier de missions du véhicule.

La première étape est de calculer l'énergie carburant consommée $E_{carb\ i,j,k}$ pour chacun des dimensionnements $\{P_{ge\ i}; E_{bat\ j}\}$ et pour chacune des missions $\{v_k(t); \gamma_k(t); \alpha_k(t)\}$. A partir de ce tableau d'énergies, les consommations moyennes de carburant $C_{carb\ i,j}$ se déduisent pour chacun des dimensionnements et sont enregistrées dans un nouveau tableau. La recherche de la consommation C_{carb} minimum permet dès lors de déduire le dimensionnement optimal $\{P_{ge,opt}; E_{bat,opt}\}$ pour l'ensemble des missions du véhicule.

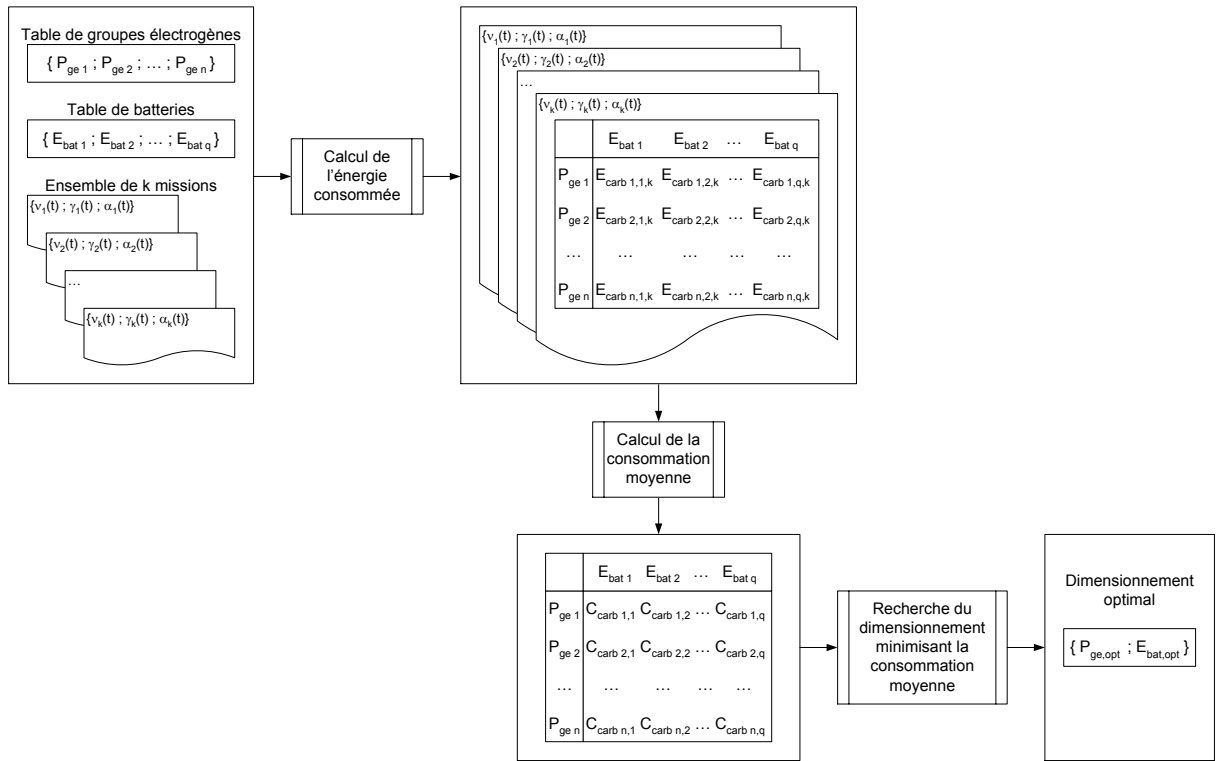


Figure 4.1 Entrées et sorties de l'algorithme de dimensionnement pour une structure série

4.2.1.2 Description de l'algorithme

Le processus de dimensionnement des composants d'une chaîne de traction hybride série est présenté en Figure 4.2. Les processus grisés sont définis plus en détails dans les paragraphes correspondants.

Le processus de dimensionnement comporte deux types d'entrées :

- d'une part, le modèle du véhicule présenté dans le Chapitre 3 et ses données d'entrée telles que les caractéristiques du châssis et les modèles génériques des composants,
- d'autre part, la ou les mission(s) du véhicule définie(s) par les profils de vitesse, accélération et inclinaison de la route.

Une première étape est d'initialiser la masse m du véhicule afin d'estimer la puissance aux roues $p_{roues}(t)$ en fonction de la mission et de la masse du véhicule.

Le processus grisé « Définition des tables » définit l'ensemble des dimensionnements à tester par l'algorithme. Ce processus est détaillé dans le paragraphe 4.2.1.3.

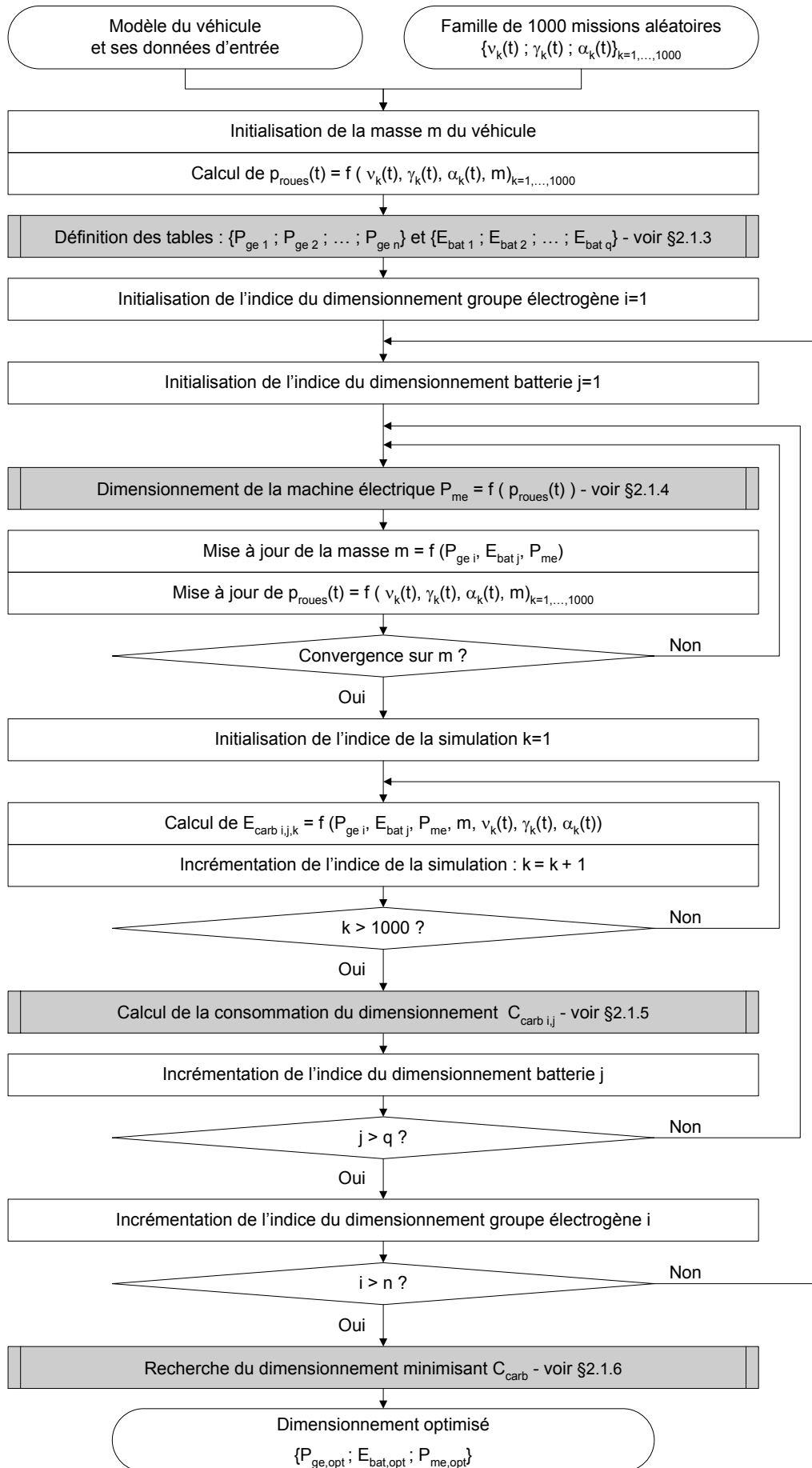


Figure 4.2 Algorithme de dimensionnement pour une structure série

Le programme de dimensionnement est ensuite composé de quatre boucles :

- deux boucles externes permettant de tester de manière exhaustive l'ensemble des dimensionnements relatifs au groupe électrogène et à la batterie,
- une première boucle interne assurant le dimensionnement de la machine électrique et la convergence de la masse du véhicule en fonction de ce dimensionnement,
- une deuxième boucle interne évaluant la consommation pour toutes les missions du véhicule à dimensionnement donné.

En entrant dans la première boucle interne, le dimensionnement du groupe électrogène et de la batterie $\{P_{ge} ; E_{bat}\}$ est initialisé mais le dimensionnement de la machine électrique reste à déterminer. Or, la puissance nominale P_{me} dépend du profil de puissance aux roues, elle-même dépendante de la masse du véhicule, laquelle dépend à son tour du dimensionnement des composants comme le démontre la Figure 4.3. C'est pourquoi cette boucle de convergence sur la masse a été introduite. Le processus de dimensionnement de la machine électrique est décrit dans le paragraphe 4.2.1.4.

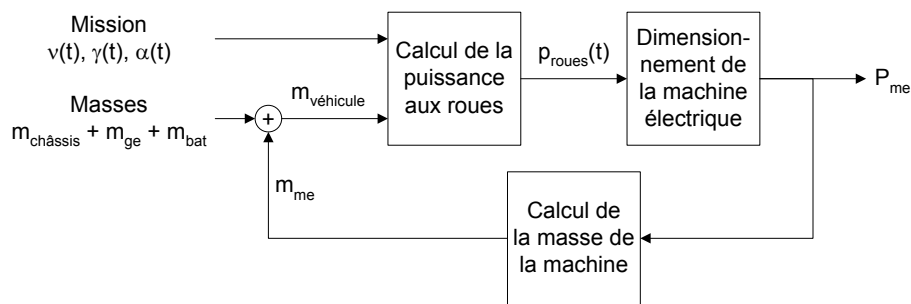


Figure 4.3 Interdépendance du dimensionnement et de la masse du véhicule

La deuxième boucle interne permet de calculer l'énergie consommée E_{carb} selon le modèle du véhicule pour chacune des mille missions. Une fois ces consommations déterminées, un nouveau processus de calcul de la consommation moyenne de carburant C_{carb} , pour un dimensionnement donné, est mis en œuvre. Cette étape est décrite dans le paragraphe 4.2.1.5.

Les boucles externes permettent de répéter la démarche pour chacun des dimensionnements définis dans les tables. Une fois tous les dimensionnements testés, la recherche de celui qui minimise C_{carb} permet d'obtenir le dimensionnement optimal recherché $\{P_{ge,opt} ; E_{bat,opt} ; P_{me,opt}\}$. Ce processus est détaillé dans le paragraphe 4.2.1.6.

4.2.1.3 Définition des tables de dimensionnement

Le plan d'expériences a été mis en place en faisant varier la puissance nominale du groupe électrogène P_{ge} par pas de 1 kW et la capacité de la batterie E_{bat} par pas de 1 kWh. Afin de définir les contraintes sur les variables d'optimisation à des valeurs réalistes, les plages de variation de P_{ge} et E_{bat} sont calculées selon les règles de base suivantes :

- ♦ Le groupe électrogène doit être capable d'assurer au moins la puissance moyenne P_{moy} de la mission définie par l'équation (4.1) et est limité par la puissance maximale P_{max} caractérisée par l'équation (4.2), ainsi $P_{ge} \in [P_{ge\ 1} = P_{moy}, P_{ge\ n} = P_{max}]$.
- ♦ La capacité de la batterie E_{bat} est limitée par l'énergie de la mission E_{max} comme décrit dans les équations (4.3) et (4.4), ainsi $E_{bat} \in [E_{bat\ 1} = 1, E_{bat\ q} = E_{max}]$.

$$P_{moy} = \frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{p_{roues}(\tau)}{\eta_{me}} \right) d\tau \quad (4.1)$$

$$P_{max} = \max \left(\frac{p_{roues}}{\eta_{me}} \right) \quad (4.2)$$

$$e_{bat}(t) = \int_{t_0}^t \left(\frac{p_{roues}(\tau)}{\eta_{me}} - P_{moy} \right) d\tau \quad (4.3)$$

$$E_{max} = \left(\max_{t \in [t_0, t_f]} (e_{bat}(t)) - \min_{t \in [t_0, t_f]} (e_{bat}(t)) \right) \times \frac{1}{\eta_{bat}} \times \frac{1}{SOE_{max} - SOE_{min}} \quad (4.4)$$

Tous les degrés d'hybridation, allant du véhicule majoritairement thermique $\{P_{ge} = P_{max}; E_{bat} = 1\}$ au véhicule fortement hybride $\{P_{ge} = P_{moy}; E_{bat} = E_{max}\}$ sont ainsi évalués puis comparés.

Les tables de dimensionnements sont donc définies de la manière suivante :

- Table du groupe électrogène : $\{P_{ge\ 1}; P_{ge\ 1} + 1kW; P_{ge\ 1} + 2kW; \dots; P_{ge\ n} - 1kW; P_{ge\ n}\}$
- Table de la batterie : $\{E_{bat\ 1}; E_{bat\ 1} + 1kWh; E_{bat\ 1} + 2kWh; \dots; E_{bat\ q} - 1kWh; E_{bat\ q}\}$

4.2.1.4 Dimensionnement de la machine électrique

Dans une structure série, la machine électrique est directement connectée aux roues pour assurer la traction du véhicule. Son dimensionnement est donc directement lié au profil de puissance $p_{roues}(t)$. D'une part, la machine électrique doit être capable d'assurer la puissance maximale demandée aux roues, mais cette dernière est rarement nécessaire sur une longue période. D'autre part, étant donné sa capacité de surcharge dans un ratio puissance maximale sur puissance nominale égal à k_{max} pendant une durée maximale δ_{max} , la machine électrique peut être sous-dimensionnée.

L'algorithme de la Figure 4.4 décrit le processus de dimensionnement de la machine électrique pour la structure série. Les données d'entrée comportent le profil de puissance $p_{roues}(t)$ et les paramètres k_{max} et δ_{max} . La puissance nominale de la machine P_{me} commence par être initialisée à la puissance maximale demandée aux roues, au coefficient k_{max} près. Le dimensionnement ainsi défini, les durées où la machine est en surcharge sont calculés. Si une période de surcharge est trop longue, alors la puissance nominale de la machine électrique est incrémentée par pas de 1 kW et les durées des surcharges recalculées. Sinon, le dimensionnement de la machine électrique est validé.

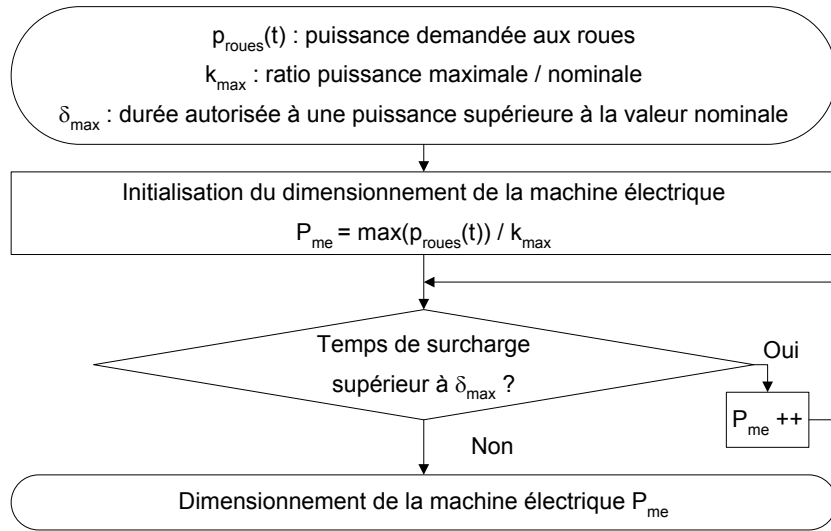


Figure 4.4 Algorithme de dimensionnement de la machine électrique

4.2.1.5 Calcul de la consommation moyenne d'un dimensionnement

Lorsque l'énergie de carburant consommée $E_{carb\ i,j,k}$ a été calculée pour chacune des missions à dimensionnement donné, il est possible de calculer la consommation moyenne $C_{carb\ i,j}$ de ce dimensionnement sur l'ensemble des missions.

Pour cela, l'énergie carburant $E_{carb\ i,j}$ en kWh consommée par l'ensemble des missions est calculée selon l'équation (3.19) et la distance totale parcourue D en km est déduite de l'équation (4.6) où $v_k(t)$ est le profil de vitesse en m/s de la mission k . La consommation moyenne $C_{carb\ i,j}$ est alors calculée selon (4.7) pour obtenir des litres de gazole aux cent kilomètres en considérant son énergie volumique égale à 9,94 kWh/l.

$$E_{carb\ i,j} = \sum_{k=1,\dots,1000} E_{carb\ i,j,k} \quad (4.5)$$

$$D = \frac{1}{1000} \times \sum_{k=1,\dots,1000} \int_{t_0}^{t_f} v_k(t) dt \quad (4.6)$$

$$C_{carb\ i,j} = \frac{E_{carb\ i,j}}{9,94} \times \frac{100}{D} \quad (4.7)$$

4.2.1.6 Recherche du dimensionnement minimisant la consommation

L'objectif est de sélectionner le dimensionnement $\{P_{ge,opt}; E_{bat,opt}\}$ qui minimise la consommation de carburant C_{carb} . Pour cela, nous disposons du tableau récapitulant les consommations obtenues pour chacun des dimensionnements, dont un exemple est donné au Tableau 4.1. Le Tableau 4.1 a) présente les résultats avec trois décimales après la virgule, le Tableau 4.1 b) avec deux et le Tableau 4.1 c) avec une seule.

Les dimensionnements ne permettant pas d'effectuer la mission, en raison des limites en puissance ou d'un état de charge de la batterie inférieur à 40%, sont repérés par une case rayée. Pour les autres, des sigles permettent de les différencier : un losange rouge identifie les 10 % des consommations les plus élevées, un rond vert les 10 % des consommations les plus faibles et un triangle jaune les 80 % restants.

Tableau 4.1 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour le cycle ECE

a) 3 décimales			b) 2 décimales			c) 1 décimale		
P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)		P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)		P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)	
	1	2		1	2		1	2
2		3,039	2		3,04	2		3,0
3		3,007	3		3,01	3		3,0
4		2,967	4		2,97	4		3,0
5		2,936	5		2,94	5		2,9
6		2,901	6		2,90	6		2,9
7		2,871	7		2,87	7		2,9
8	2,940	2,844	8	2,94	2,84	8	2,9	2,8
9	2,896	2,815	9	2,90	2,81	9	2,9	2,8
10	2,864	2,787	10	2,86	2,79	10	2,9	2,8
11	2,831	2,767	11	2,83	2,77	11	2,8	2,8
12	2,813	2,752	12	2,81	2,75	12	2,8	2,8
13	2,788	2,745	13	2,79	2,74	13	2,8	2,7
14	2,773	2,730	14	2,77	2,73	14	2,8	2,7
15	2,755	2,727	15	2,75	2,73	15	2,8	2,7
16	2,746	2,714	16	2,75	2,71	16	2,7	2,7
17	2,734	2,707	17	2,73	2,71	17	2,7	2,7
18	2,733	2,703	18	2,73	2,70	18	2,7	2,7
19	2,719	2,701	19	2,72	2,70	19	2,7	2,7
20	2,724	2,704	20	2,72	2,70	20	2,7	2,7
21	2,720	2,703	21	2,72	2,70	21	2,7	2,7

Pour chacun des tableaux, la ou les meilleure(s) consommation(s) ont été encadrées en trait gras. Les trois décimales du Tableau 4.1 a) permettent d'isoler l'unique meilleur dimensionnement { 19 kW ; 2 kWh }. Cependant, d'une part il peut être observé qu'un groupe électrogène de puissance légèrement plus faible ou légèrement plus importante n'a pas une grande influence sur la consommation. D'autre part, une telle précision sur la consommation n'est pas cohérente avec la précision de la modélisation du véhicule adoptée. A l'inverse, avec une seule décimale, l'ensemble des « meilleurs » dimensionnements identifiés correspond quasiment aux 10 % des consommations les plus faibles repérées par un rond vert ce qui englobe une trop grande partie des résultats. C'est pourquoi le choix du dimensionnement s'effectuera sur le tableau à deux décimales. La sélection plus précise du couple $\{P_{ge,opt} ; E_{bat,opt}\}$ pourrait ensuite être laissée au concepteur qui devra éventuellement prendre en considération d'autres contraintes.

Dans le cas de figure où plusieurs dimensionnements correspondent à la meilleure consommation de carburant à deux décimales près, le choix s'effectue par rapport à la plus faible capacité de batterie E_{bat} afin de minimiser la masse et le coût de la chaîne de traction. Dans l'exemple précédent, le dimensionnement optimal retenu est celui de { 18 kW ; 2 kWh }.

4.2.2 RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT SELON DIFFERENTS TYPES DE MISSION

Le processus de dimensionnement précédemment décrit est appliqué à différents types de missions. L'algorithme est d'abord exécuté sur les cycles de conduite standards européens et Artemis pour référence. Puis la même approche est considérée pour les missions urbaines et extra-urbaines, mesurées et simulées, présentées dans le Chapitre 2. L'objectif est alors d'amener une comparaison équitable entre les différents dimensionnements afin d'effectuer le choix le plus adapté.

4.2.2.1 Missions standards européennes

4.2.2.1.1 Cycle de conduite ECE

L'algorithme de dimensionnement est appliqué au cycle de conduite ECE d'une durée de 200 s et présenté en Figure 1.7. Les tables de dimensionnements ont été définies entre 2 kW et 21 kW pour le groupe électrogène et de 1 kWh à 2 kWh pour la batterie. La matrice de consommation de carburant calculée en fonction du dimensionnement à l'issue de l'algorithme est présentée dans le Tableau 4.2.

Ces résultats montrent, d'une part, que pour le cycle de conduite ECE, plus le groupe électrogène est important, meilleure est la consommation. D'autre part, la batterie de 2 kWh permet de réduire la consommation par rapport à la batterie de 1 kWh quel que soit le dimensionnement du groupe électrogène.

Le dimensionnement minimisant la consommation de carburant est la combinaison d'un groupe électrogène de 18 kW et d'une batterie de 2 kWh. La machine électrique est alors dimensionnée à 8 kW pour une masse de la chaîne de traction convergeant vers 62 kg. Ce dimensionnement permet d'obtenir une consommation de 2,70 l/100km.

D'après le bilan de puissance illustré en Figure 4.5, la stratégie de gestion de l'énergie privilégie le fonctionnement en mode régénération afin de faire fonctionner le groupe électrogène à un bon rendement et de recharger la batterie. Ainsi la mission se termine avec un état d'énergie de 80 % qui est supérieur à l'état initial de 70 %.

Selon ce bilan de puissance, la batterie ne participe pas à la traction du véhicule puisqu'elle n'est jamais déchargée pour cette mission. En effet, celle-ci est tellement courte (200 s) que l'état d'énergie de la batterie reste inférieur à 90 % et le mode de gestion ne passe jamais en mode « Décharge ».

Tableau 4.2 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour le cycle ECE (200s)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)	
	1	2
2		3,04
3		3,01
4		2,97
5		2,94
6		2,90
7		2,87
8	2,94	2,84
9	2,90	2,81
10	2,86	2,79
11	2,83	2,77
12	2,81	2,75
13	2,79	2,74
14	2,77	2,73
15	2,75	2,73
16	2,75	2,71
17	2,73	2,71
18	2,73	2,70
19	2,72	2,70
20	2,72	2,70
21	2,72	2,70

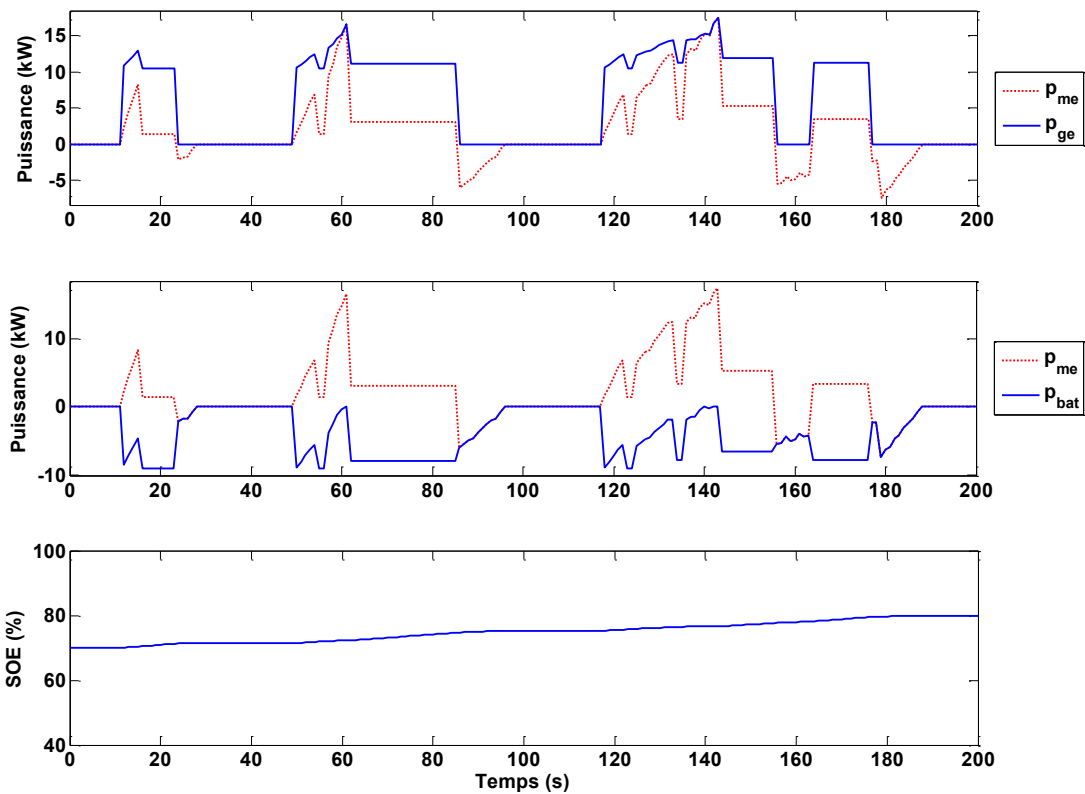


Figure 4.5 Bilan de puissance du meilleur dimensionnement {18 kW ; 2 kWh} pour le cycle ECE (200s)

Afin d'obtenir une mission plus réaliste en terme de durée, le cycle de conduite ECE a été répété quatre fois de suite pour obtenir une mission de 800 s. La nouvelle matrice de consommation de carburant est présentée dans le Tableau 4.3. Les résultats montrent un certain nombre de changements par rapport à la mission de 200s. D'une part, le dimensionnement minimisant la consommation a sensiblement changé pour arriver à {10 kW ; 2 kWh}. D'autre part, les consommations pour les fortes puissances de groupe électrogène ont augmentées. Ainsi, la consommation la plus importante est passée du dimensionnement {2 kW ; 2 kWh} sur le cycle de 200 s au dimensionnement {21 kW ; 1 kWh} sur la mission de 800 s. Ceci s'explique par le fait qu'un P_{ge} élevé implique le mode régénération pour une faible puissance demandée au niveau des roues, ce qui est le cas pour le cycle ECE, et donc la charge de la batterie jusqu'au seuil $SOE_{d,haut}$ de 90%. Celui-ci impose le passage de la gestion de l'énergie en mode « Décharge » qui pénalise alors la consommation moyenne puisque le système ne fonctionne plus en mode « Optimal ».

En effet, l'analyse du bilan de puissance donné en Figure 4.6 montre que sur les trois premières répétitions du cycle ECE, la stratégie de gestion de l'énergie est en mode de gestion « Optimal » puisque l'état d'énergie reste inférieur à 90 %. Cependant, lors de la quatrième répétition, le SOE dépasse 90 % à l'instant 771 s repéré par les pointillés verts. Le mode de gestion devient alors « Décharge » et la batterie assure la puissance demandée par la machine électrique là où le groupe électrogène était auparavant capable d'assurer la puissance comme souligné par les flèches. Cette comparaison montre l'importance de la gestion de l'énergie mais aussi de la durée de la mission sur le dimensionnement pour une stratégie de gestion donnée. Ce sujet n'est pas traité dans le présent mémoire et fera partie des perspectives de ce travail.

Le meilleur dimensionnement est obtenu pour une batterie limite E_{max} calculé selon la mission ECE. Il est légitime de se demander quelle serait la consommation pour une batterie de capacité plus importante. Le processus de dimensionnement a donc été étendu à des groupes électrogènes allant jusqu'à 50 kW et des batteries jusqu'à 15 kWh. Le tableau des consommations est présenté en Annexe F.1. Le nuage des 10% des consommations les plus faibles montre une tendance diagonale allant du dimensionnement {7 kW ; 2 kWh} au {35 kW ; 12kWh}. Le meilleur dimensionnement est identifié pour un groupe électrogène de 15 kW et une batterie de 4 kWh assurant une consommation de 2,67 l/100km. Le gain obtenu par rapport au dimensionnement {10 kW ; 2 kWh} est de trois centièmes de litre aux cent kilomètres, il semble donc intéressant de ne pas limiter l'étude des dimensionnements à des valeurs trop restrictives. Cependant cela signifie implicitement l'augmentation du coût de la chaîne de traction, en doublant la capacité de la batterie et en augmentant la puissance du groupe électrogène de 50%, pour un gain de consommation qui peut être considéré négligeable.

Tableau 4.3 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour le cycle ECE (800s)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)	
	1	2
2		3,04
3		3,01
4		2,97
5		2,94
6		2,90
7		2,87
8	2,94	2,84
9	3,05	2,81
10	3,05	2,80
11	3,05	2,88
12	3,04	2,91
13	3,03	2,93
14	3,04	3,01
15	3,19	3,02
16	3,20	3,01
17	3,21	3,01
18	3,23	3,01
19	3,25	3,03
20	3,26	3,04
21	3,27	3,05

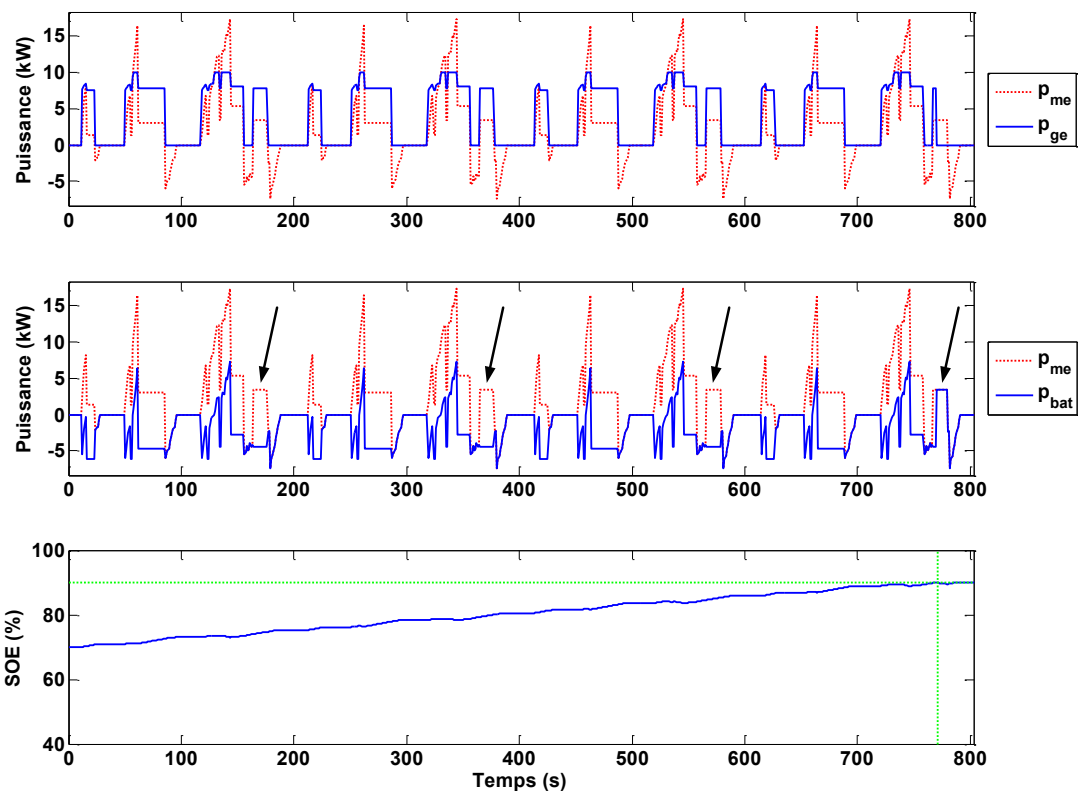


Figure 4.6 Bilan de puissance du meilleur dimensionnement {10 kW ; 2 kWh} pour le cycle ECE (800s)

4.2.2.1.2 Cycle de conduite EUDC

L'algorithme de dimensionnement est à présent exécuté sur le cycle de conduite EUDC d'une durée de 390s et présenté en Figure 1.8. Les plages de dimensionnement ont été définies de 9 kW à 49 kW pour P_{ge} et de 1 kWh à 4 kWh pour E_{bat} . Le Tableau 4.4 présente les consommations obtenues.

Le meilleur dimensionnement retenu est 30 kW pour le groupe électrogène et 4 kWh pour la batterie avec une machine électrique de 20 kW et une masse de la chaîne de propulsion convergeant vers 114 kg. La consommation associée est alors de 3,86 l/100km.

L'Annexe F.2 illustre les consommations pour des dimensionnements étendus. Un gain de 0,02 l/100km est obtenu pour $P_{ge} = 41$ kW et $E_{bat} = 7$ kWh. La durée de vie de la batterie pourrait s'en trouver améliorée.

Tableau 4.4 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour le cycle EUDC (390s)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)			
	1	2	3	4
9				▲ 4,11
10				▲ 4,09
11				▲ 4,07
12				▲ 4,06
13				▲ 4,04
14			▲ 4,09	▲ 4,02
15			▲ 4,07	▲ 4,01
16			▲ 4,05	▲ 4,00
17			▲ 4,03	▲ 3,98
18			▲ 4,01	▲ 3,97
19			▲ 4,00	▲ 3,95
20			▲ 3,98	▲ 3,93
21			▲ 3,97	● 3,92
22			▲ 3,96	● 3,91
23			▲ 3,94	● 3,90
24		▲ 4,04	▲ 3,93	● 3,90
25		▲ 4,03	▲ 3,93	● 3,89
26		▲ 4,01	● 3,92	● 3,88
27		▲ 4,01	● 3,91	● 3,88
28		▲ 4,22	● 3,90	● 3,87
29		▲ 4,24	▲ 4,22	● 3,87
30		▲ 4,27	▲ 4,23	● 3,86
31		▲ 4,29	▲ 4,18	▲ 4,18
32		▲ 4,29	▲ 4,19	▲ 4,22
33		▲ 4,28	▲ 4,20	▲ 4,22
34		▲ 4,27	▲ 4,19	▲ 4,17
35	▲ 4,39	▲ 4,28	▲ 4,21	▲ 4,17
36	▲ 4,38	▲ 4,26	▲ 4,22	▲ 4,17
37	▲ 4,40	▲ 4,27	▲ 4,22	▲ 4,17
38	▲ 4,39	▲ 4,28	▲ 4,22	▲ 4,18
39	▲ 4,39	▲ 4,28	▲ 4,22	▲ 4,19
40	▲ 4,40	▲ 4,28	▲ 4,23	▲ 4,19
41	◆ 4,40	▲ 4,27	▲ 4,23	▲ 4,19
42	◆ 4,41	▲ 4,28	▲ 4,23	▲ 4,20
43	◆ 4,42	▲ 4,28	▲ 4,22	▲ 4,20
44	◆ 4,41	▲ 4,28	▲ 4,22	▲ 4,19
45	◆ 4,42	▲ 4,28	▲ 4,22	▲ 4,20
46	◆ 4,44	▲ 4,29	▲ 4,24	▲ 4,21
47	◆ 4,44	▲ 4,28	▲ 4,24	▲ 4,21
48	◆ 4,44	▲ 4,29	▲ 4,24	▲ 4,22
49	◆ 4,46	▲ 4,28	▲ 4,25	▲ 4,22

4.2.2.1.3 Cycle de conduite NEDC

Le Tableau 4.5 illustre les résultats de consommation sur le cycle NEDC présenté en Figure 1.9 d'une durée de 1180s pour des dimensionnements allant de 4 kW à 49 kW pour le groupe électrogène et de 1 kWh à 4 kWh pour la batterie. Le dimensionnement optimal est identifié à la combinaison d'un groupe électrogène de 13 kW, d'une batterie de 4 kWh et d'une machine électrique de 20 kW assurant une consommation de 3,69 l/100km avec un état d'énergie final de 74,1 %. Le tableau des consommations pour une plage de dimensionnement étendue, présenté en Annexe F.3, permet d'identifier le dimensionnement {18 kW ; 7 kWh} qui améliore la consommation d'un pourcent au détriment d'une masse et d'un coût supérieurs.

Tableau 4.5 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour le cycle NEDC (1180s)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)			
	1	2	3	4
4				△ 3,85
5				△ 3,84
6				△ 3,80
7				△ 3,78
8				△ 3,77
9				● 3,75
10				● 3,73
11				● 3,72
12				● 3,70
13				● 3,69
14			△ 3,80	● 3,76
15			△ 3,79	● 3,76
16			△ 3,78	● 3,76
17			△ 3,77	● 3,75
18			△ 3,77	● 3,74
19			● 3,75	● 3,73
20			△ 3,89	● 3,73
21			△ 3,88	● 3,72
22			△ 3,88	● 3,72
23			△ 3,87	△ 3,87
24		△ 3,90	△ 3,87	△ 3,88
25		△ 3,89	△ 3,87	△ 3,88
26		△ 3,89	△ 3,87	△ 3,88
27		△ 3,89	△ 3,87	△ 3,88
28		△ 3,89	△ 3,87	△ 3,88
29		△ 3,89	△ 3,87	△ 3,89
30		△ 4,06	△ 3,88	△ 3,89
31		△ 4,06	△ 3,88	△ 3,90
32		△ 4,07	△ 3,89	△ 3,91
33		△ 4,08	△ 3,89	△ 3,92
34		△ 4,09	△ 3,89	△ 3,92
35	△ 4,31	△ 4,10	△ 3,91	△ 3,93
36	△ 4,32	△ 4,10	△ 3,92	△ 3,94
37	△ 4,32	△ 4,11	△ 3,92	△ 3,94
38	△ 4,33	△ 4,13	△ 3,91	△ 3,94
39	△ 4,34	△ 4,12	△ 3,92	△ 3,95
40	△ 4,33	△ 4,13	△ 3,94	△ 3,96
41	△ 4,34	△ 4,13	△ 3,94	△ 3,96
42	△ 4,36	△ 4,15	△ 3,95	△ 3,97
43	△ 4,37	△ 4,16	△ 3,95	△ 3,97
44	◇ 4,38	△ 4,16	△ 3,95	△ 3,97
45	◇ 4,40	△ 4,16	△ 3,96	△ 3,98
46	◇ 4,42	△ 4,18	△ 3,97	△ 3,98
47	◇ 4,43	△ 4,18	△ 3,98	△ 3,99
48	◇ 4,43	△ 4,19	△ 3,98	△ 4,00
49	◇ 4,46	△ 4,19	△ 3,99	△ 4,00

4.2.2.2 Missions Artemis

4.2.2.2.1 Artemis urbain

Concernant le cycle Artemis urbain d'une durée de 15min et illustré en Figure 1.12, les tables de dimensionnement ont été définies entre 2 kW et 41 kW pour le groupe électrogène et entre 1 kWh et 4 kWh pour la batterie. Ces plages de variation sont bien plus étendues que pour le cycle urbain ECE pour lequel $P_{ge} \in [2 ; 21]$ kW et $E_{bat} \in [1 ; 2]$ kWh. Ces dernières tables de dimensionnement, qui permettaient pour la plupart d'effectuer la mission européenne, ne permettent pas toujours d'assurer la mission Artemis. L'Annexe F.4 présente des dimensionnements étendus.

Globalement, les consommations sont plus importantes pour la mission Artemis par rapport à celles du cycle ECE. En effet, là où certains dimensionnements donnaient des consommations inférieures à 3 l/100km pour le cycle européen, aucun ne donne de consommation inférieure à 3,83 l/100km pour l'Artemis urbain. Cette étude montre donc l'impact de la mission sur le dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule hybride série.

Tableau 4.6 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour le cycle Artemis urbain (15min)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)			
	1	2	3	4
2				4,17
3				4,15
4			4,33	4,12
5			4,29	4,10
6			4,25	4,07
7			4,21	4,05
8			4,17	4,03
9			4,14	4,00
10			4,11	3,98
11			4,07	3,96
12			4,04	3,93
13			4,01	3,91
14			3,98	3,89
15		4,39	3,96	3,87
16		4,46	4,05	3,85
17		4,48	4,05	3,83
18		4,46	4,04	3,88
19		4,45	4,11	3,90
20		4,44	4,14	3,90
21		4,46	4,18	3,94
22		4,45	4,20	3,94
23		4,49	4,21	3,98
24		4,50	4,30	3,98
25	5,07	4,51	4,31	4,03
26	5,04	4,54	4,34	4,05
27	5,07	4,55	4,35	4,06
28	5,05	4,69	4,38	4,11
29	5,07	4,76	4,38	4,12
30	5,09	4,77	4,38	4,19
31	5,10	4,80	4,38	4,25
32	5,12	4,81	4,39	4,27
33	5,13	4,82	4,37	4,28
34	5,10	4,83	4,39	4,29
35	5,11	4,84	4,41	4,31
36	5,14	4,85	4,42	4,33
37	5,16	4,87	4,42	4,35
38	5,19	4,87	4,44	4,36
39	5,21	4,89	4,46	4,34
40	5,23	4,90	4,47	4,38
41	5,24	4,92	4,47	4,38

4.2.2.2.2 Artemis extra-urbain

Pour cette mission Artemis extra-urbaine, la plage de dimensionnement est définie entre 8 kW et 50 kW pour le groupe électrogène et entre 1 kWh et 6 kWh. D'après le Tableau 4.7, le meilleur dimensionnement est obtenu pour $P_{ge} = 21$ kW et $E_{bat} = 6$ kWh avec une consommation de 3,90 l/100km.

L'algorithme n'a testé que les dimensionnements de batterie allant jusqu'à 6 kWh car cette énergie permet théoriquement d'effectuer la mission extra-urbaine de 16min avec un groupe électrogène assurant la puissance moyenne. Les résultats de consommation pour des dimensionnements étendus sont observables en Annexe F.5.

Tableau 4.7 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour le cycle Artemis extra-urbain (16min)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)					
	1	2	3	4	5	6
8					△ 4,10	△ 4,02
9					△ 4,06	△ 4,02
10					△ 4,05	△ 4,01
11					△ 4,03	△ 4,00
12					△ 4,03	△ 3,99
13					△ 4,02	△ 3,98
14					△ 4,00	● 3,97
15				△ 4,05	● 3,99	● 3,96
16				△ 4,03	● 3,98	● 3,95
17				△ 4,02	● 3,97	● 3,94
18				△ 4,00	● 3,95	● 3,93
19				△ 3,98	● 3,94	● 3,92
20				● 3,97	● 3,93	● 3,91
21				△ 4,07	● 3,92	● 3,90
22				△ 4,07	● 3,95	● 3,90
23				△ 4,05	△ 4,03	● 3,90
24				△ 4,03	△ 4,02	● 3,93
25				△ 4,03	△ 4,01	△ 4,00
26			△ 4,12	△ 4,03	△ 4,00	△ 4,01
27			△ 4,13	△ 4,03	△ 3,99	△ 3,99
28			△ 4,16	△ 4,03	△ 4,00	△ 3,99
29			△ 4,16	△ 4,04	△ 3,99	△ 3,99
30			△ 4,21	△ 4,06	△ 3,99	△ 3,98
31			△ 4,18	△ 4,06	△ 4,03	△ 3,99
32			△ 4,23	△ 4,11	△ 4,04	△ 3,99
33			△ 4,23	△ 4,12	△ 4,04	△ 4,00
34			△ 4,25	△ 4,14	△ 4,04	△ 4,01
35			△ 4,28	△ 4,13	△ 4,05	△ 4,01
36			△ 4,29	△ 4,18	△ 4,07	△ 4,02
37		△ 4,34	△ 4,30	△ 4,19	△ 4,08	△ 4,03
38		△ 4,36	△ 4,30	△ 4,20	△ 4,09	△ 4,05
39		△ 4,36	△ 4,31	△ 4,22	△ 4,13	△ 4,06
40		△ 4,47	△ 4,33	△ 4,23	△ 4,14	△ 4,08
41		△ 4,48	△ 4,34	△ 4,24	△ 4,15	△ 4,09
42		△ 4,49	△ 4,37	△ 4,27	△ 4,15	△ 4,09
43		△ 4,50	△ 4,36	△ 4,28	△ 4,18	△ 4,11
44		△ 4,53	△ 4,35	△ 4,28	△ 4,19	△ 4,10
45		△ 4,54	△ 4,35	△ 4,28	△ 4,20	△ 4,12
46		△ 4,55	△ 4,34	△ 4,28	△ 4,21	△ 4,13
47	◇ 4,67	△ 4,56	△ 4,35	△ 4,28	△ 4,22	△ 4,13
48	◇ 4,66	△ 4,57	△ 4,36	△ 4,29	△ 4,22	△ 4,14
49	◇ 4,70	△ 4,58	△ 4,37	△ 4,37	△ 4,23	△ 4,15
50	◇ 4,71	△ 4,59	△ 4,37	△ 4,37	△ 4,24	△ 4,15

4.2.2.2.3 Artemis autoroute

La table des dimensionnements du groupe électrogène pour le cycle Artemis autoroute de 17min est réduite par rapport au cycle EUDC. En effet, le plus petit groupe électrogène passe de 9 kW à 22 kW entre le cycle EUDC et l'Artemis autoroute. Cependant la plage des dimensionnements de la batterie est quadruplée en allant de 1 kWh jusqu'à 16 kWh.

D'après le Tableau 4.8, le dimensionnement {30 kW ; 4 kWh} qui minimisait la consommation pour la mission EUDC ne permet pas d'effectuer la mission Artemis. Pour cette mission, le dimensionnement assurant la plus faible consommation de 5,86 l/100km combine un groupe électrogène de 43 kW avec une batterie de 10 kWh et une machine électrique de 50 kW.

Cependant, en observant les résultats des autres dimensionnements, l'association d'un groupe électrogène de 38 kW à une batterie de 7 kWh conduit à une consommation de 5,89 l/100km. Celle-ci est légèrement plus élevée que celle déclarée optimale mais le dimensionnement des composants est notablement réduit. Ce choix peut être soumis au concepteur afin de trouver le meilleur compromis.

Tableau 4.8 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour le cycle Artemis autoroute (17min)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
22							▲ 6,09	▲ 6,05	▲ 6,03	▲ 6,01	▲ 5,97	▲ 5,96	▲ 5,97	▲ 5,97	▲ 5,97	▲ 5,97
23							▲ 6,09	▲ 6,05	▲ 6,02	▲ 5,97	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,97	▲ 5,97	▲ 5,97	▲ 5,97
24						◆ 6,14	▲ 6,08	▲ 6,05	▲ 5,98	▲ 5,97	▲ 5,96	▲ 5,95	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,97
25						◆ 6,13	▲ 6,07	▲ 5,99	▲ 5,97	▲ 5,96	▲ 5,95	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,96
26						◆ 6,12	▲ 6,01	▲ 5,98	▲ 5,97	▲ 5,96	▲ 5,95	▲ 5,96	▲ 5,95	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,96
27						▲ 6,02	▲ 6,00	▲ 5,98	▲ 5,96	▲ 5,95	▲ 5,94	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,96	▲ 5,97
28						▲ 6,01	▲ 5,99	▲ 5,97	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,97
29						▲ 6,01	▲ 5,98	▲ 5,96	▲ 5,95	▲ 5,94	▲ 5,94	▲ 5,94	▲ 5,94	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,97
30						▲ 5,99	▲ 5,97	▲ 5,95	▲ 5,94	▲ 5,93	▲ 5,94	▲ 5,94	▲ 5,94	▲ 5,94	▲ 5,96	▲ 5,96
31						▲ 5,98	▲ 5,96	▲ 5,94	▲ 5,93	▲ 5,94	▲ 5,93	▲ 5,93	▲ 5,94	▲ 5,94	▲ 5,95	▲ 5,96
32						▲ 5,97	▲ 5,95	▲ 5,93	▲ 5,92	▲ 5,93	▲ 5,93	▲ 5,93	▲ 5,93	▲ 5,93	▲ 5,95	▲ 5,96
33					▲ 5,99	▲ 5,96	▲ 5,94	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,93	▲ 5,94	▲ 5,95	▲ 5,95
34					▲ 5,97	▲ 5,95	▲ 5,93	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,91	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,94	▲ 5,94	▲ 5,95
35					▲ 5,96	▲ 5,94	▲ 5,92	▲ 5,91	▲ 5,91	▲ 5,91	▲ 5,91	▲ 5,91	▲ 5,93	▲ 5,93	▲ 5,94	▲ 5,94
36					▲ 5,95	▲ 5,93	▲ 5,91	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,92	▲ 5,93	▲ 5,93	▲ 5,94
37					▲ 5,94	▲ 5,92	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,93	▲ 5,94
38					▲ 5,93	▲ 5,91	▲ 5,89	▲ 5,90	▲ 5,89	▲ 5,89	▲ 5,89	▲ 5,91	▲ 5,91	▲ 5,92	▲ 5,93	▲ 5,94
39					▲ 5,92	▲ 5,90	● 5,89	● 5,89	● 5,89	● 5,89	● 5,89	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,92	▲ 5,92	▲ 5,93
40					▲ 5,94	▲ 5,90	● 5,89	● 5,88	● 5,88	● 5,88	● 5,88	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,91	▲ 5,92	▲ 5,94
41					▲ 6,00	▲ 5,91	● 5,89	● 5,88	● 5,87	● 5,87	● 5,89	▲ 5,89	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,92	▲ 5,93
42					▲ 5,99	▲ 5,99	▲ 5,90	● 5,88	● 5,87	● 5,87	● 5,88	● 5,89	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,93
43					▲ 6,00	▲ 5,98	▲ 5,93	● 5,89	● 5,87	● 5,86	● 5,88	● 5,88	▲ 5,89	▲ 5,90	▲ 5,92	▲ 5,93
44				▲ 6,03	▲ 6,00	▲ 5,97	▲ 5,98	▲ 5,91	● 5,88	● 5,88	● 5,87	● 5,88	● 5,89	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,92
45				▲ 6,03	▲ 6,01	▲ 5,98	▲ 5,96	▲ 5,91	▲ 5,90	● 5,88	● 5,87	● 5,87	● 5,88	▲ 5,89	▲ 5,91	▲ 5,92
46				▲ 6,05	▲ 6,02	▲ 5,99	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,90	▲ 5,90	● 5,88	● 5,87	● 5,88	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,92
47				▲ 6,08	▲ 6,05	▲ 6,01	▲ 5,97	▲ 5,95	▲ 5,96	▲ 5,90	● 5,89	● 5,88	● 5,88	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,92
48				◆ 6,12	▲ 6,08	▲ 6,04	▲ 5,97	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,97	▲ 5,90	● 5,88	● 5,88	▲ 5,89	▲ 5,90	▲ 5,91
49				◆ 6,13	▲ 6,08	▲ 6,05	▲ 6,00	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,96	▲ 5,92	▲ 5,90	▲ 5,89	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,91
50				◆ 6,13	▲ 6,09	▲ 6,05	▲ 6,00	▲ 5,97	▲ 5,95	▲ 5,95	▲ 5,97	▲ 5,90	▲ 5,91	▲ 5,90	▲ 5,90	▲ 5,91

4.2.2.3 Missions urbaines

4.2.2.3.1 Mission urbaine mesurée

L'algorithme de dimensionnement appliqué à la mission urbaine mesurée, présentée en Figure 2.5 à Figure 2.7, définit les tables de dimensionnement entre 3 kW et 50 kW pour le groupe électrogène et entre 1 kWh et 25 kWh pour la batterie. Ces plages de variation sont bien plus étendues que pour les cycles de conduite urbains ECE et Artemis urbain. En effet, en termes de puissance, la mission urbaine mesurée présente une demande en puissance maximale plus élevée que les autres cycles. De plus, en termes d'énergie, la durée de la mission d'une vingtaine d'heures (29h 15min) est plus contraignante que les cycles d'une vingtaine de minutes.

L'Annexe F.6 regroupe les résultats en termes de consommation de carburant pour chacun des dimensionnements testés. Globalement, pour un groupe électrogène donné, la consommation augmente avec la capacité de la batterie. De même, à capacité de batterie donnée, la consommation augmente avec la puissance du groupe électrogène.

Une singularité est cependant à noter dans cette annexe : le dimensionnement {6 kW ; 21 kWh} ne permet pas d'effectuer la mission urbaine mesurée, alors que pour le même groupe électrogène et des batteries de plus faible capacité allant de 17 kWh à 20 kWh, la mission est assurée jusqu'à la fin. En effet, comme illustré en Figure 4.7 au niveau de l'instant 75 000 s, l'état d'énergie de la batterie atteint son seuil minimal de 40 % alors que le groupe électrogène ne peut pas assurer seul la traction du véhicule. Ceci montre la limite de la stratégie de gestion de l'énergie proposée dans le Chapitre 3.

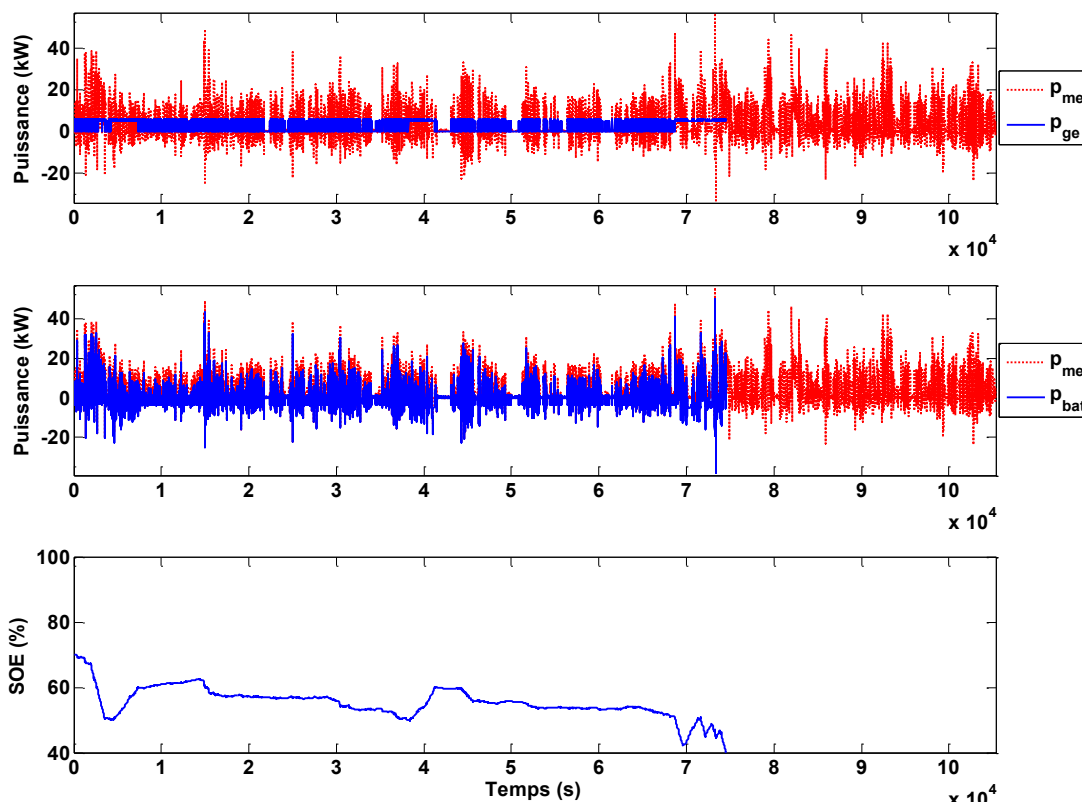


Figure 4.7 Bilan de puissance du meilleur dimensionnement {6 kW ; 21 kWh} pour la mission urbaine mesurée

4.2.2.3.2 Missions urbaines simulées

L'algorithme de dimensionnement a ensuite été exécuté sur l'ensemble des mille missions urbaines simulées dans le Chapitre 2 et d'une durée de 20min chacune. Les plages de variation des dimensionnements s'étalent de 3 kW à 50 kW pour le groupe électrogène et de 1 kWh à 12 kWh pour la batterie. L'Annexe F.7 présente la consommation de carburant pour chacun des dimensionnements possibles.

Comme précédemment, les dimensionnements assurant l'ensemble des mille missions sont repérés par un sigle (rond, triangle ou losange) et une couleur de remplissage de la case. Afin de parfaire l'analyse, la consommation des dimensionnements assurant au moins 95 % des missions a été ajoutée dans les cases de fond blanc. Les dimensionnements assurant moins de 950 missions présentent une case rayée.

Concernant les dimensionnements assurant l'ensemble des mille missions urbaines simulées, le meilleur dimensionnement sélectionné est un groupe électrogène de 13 kW combiné à une batterie de 6 kWh, amenant à une consommation de carburant de 3,44 l/100km. Il est alors intéressant de souligner qu'en considérant les dimensionnements effectuant au moins 95 % des missions, le couple {6 kW ; 5 kWh} permet quasiment de diminuer la consommation d'un dixième.

4.2.2.4 Missions extra-urbaines

4.2.2.4.1 Mission extra-urbaine mesurée

Les résultats de consommation pour la mission extra-urbaine mesurée (Figure 2.9 à Figure 2.11) d'une durée de 12h 33min sont présentés dans l'Annexe F.8. La meilleure consommation de 4,41 l/100km est atteinte pour le dimensionnement {19 kW ; 5 kWh} alors que la moins bonne de 4,87 l/100km est obtenue avec un groupe électrogène de 50 kW et une batterie de 1 kWh.

Afin de mettre en évidence l'impact de la variable « inclinaison » de la mission d'un véhicule sur son dimensionnement, la même étude a été menée pour la mission extra-urbaine mesurée avec une pente de la route nulle. Les résultats sont présentés en Annexe F.9. Plusieurs constats sont à relever : d'une part, il est à observer que la majeure partie des consommations sont réduites d'environ 0,05 l/100km ; d'autre part, plusieurs dimensionnements, qui n'assuraient pas la mission avec inclinaison, permettent d'effectuer la mission sans inclinaison comme par exemple le dimensionnement {20 kW ; 3 kWh} qui fournit à présent la meilleure consommation.

4.2.2.4.2 Missions extra-urbaines simulées

Concernant les missions extra-urbaines simulées de 2h chacune, le meilleur dimensionnement est obtenu pour $P_{ge}=21$ kW et $E_{bat}=8$ kWh comme le montre l'Annexe F.10. En considérant les résultats permettant d'assurer 95 % des missions, la batterie peut être diminuée à 5 kWh pour un léger gain de consommation. Il est à noter que le meilleur dimensionnement pour la mission urbaine mesurée {19 kW ; 5 kWh} ne permet pas d'effectuer plus de 50 des missions simulées.

4.2.2.5 Synthèse des dimensionnements

Les résultats de pré-dimensionnement obtenus dans les différentes études menées sont résumés dans le Tableau 4.9. L'estimation de la consommation de carburant moyenne est donnée en nombre de litres aux cent kilomètres.

Tableau 4.9 Consommation de carburant pour différents pré-dimensionnements et différentes missions

Dimensionnements					Consommation (l/100km)							
n°	P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)	P_{me} (kW)	m_{tract} (kg)	Missions urbaines				Missions extra-urbaines			
					4 x ECE	Artemis urbain	Mesure	Simulations 1000x1200s	EUDC	Artemis extra-urbain	Mesure	Simulations 1000x2h
1	10	2	8	44	2,80	P_{me}	P_{me}	P_{me}	P_{me}	P_{me}	P_{me}	P_{me}
2	17	4	18	83	3,06 +9%	3,83	P_{me}	P_{me}	P_{me}	P_{me}	P_{me}	P_{me} $P_{bat,d}$
3	9	6	24	84	3,23 +15%	4,06 +6%	3,29	P_{me} $P_{bat,d}$	4,10 +6%	P_{me}	$P_{bat,d}$	$P_{bat,d}$ SOE
4	13	6	35	104	3,38 +21%	4,25 +11%	3,46 +5%	3,44	4,20 +9%	4,05 +4%	$P_{bat,d}$	$P_{bat,d}$ SOE
5	30	4	20	114	3,33 +19%	4,22 +10%	P_{me}	P_{me}	3,86	P_{me}	P_{me}	P_{me}
6	23	7	29	127	3,24 +16%	4,01 +5%	3,46 +5%	P_{me}	4,05 +5%	3,88	4,50 +2%	4,51 +1%
7	19	5	22	98	3,10 +11%	3,87 +1%	P_{me}	P_{me}	3,97 +3%	P_{me}	4,41	$P_{bat,d}$ SOE
8	22	7	26	122	3,20 +14%	3,96 +3%	3,41 +4%	P_{me}	4,01 +4%	P_{me}	4,46 +1%	4,47

Les cases grisées dans le tableau présentent le dimensionnement optimal pour chaque type de mission. Ainsi, le dimensionnement n°1 combinant un groupe électrogène de 10 kW et une batterie de 2 kWh est optimal pour le cycle de conduite standard ECE amenant une consommation de 2,80 l/100km. Cependant, il peut être observé que cette combinaison de composants ne permet pas de satisfaire les autres missions comme indiqué par les cases barrées sur la même ligne. En effet, la puissance nominale de la machine électrique n'est pas suffisante pour fournir la demande aux roues comme indiqué par le sigle P_{me} introduit dans la case. En conclusion, le standard ECE n'est pas une mission réaliste pour la conception d'un véhicule.

Le dimensionnement n°2, correspondant au meilleur dimensionnement pour le cycle Artemis urbain, permet d'effectuer la mission ECE moyennant une augmentation de 9 % de la consommation par rapport au dimensionnement n°1. Cependant, le même problème de sous-dimensionnement de la machine électrique apparaît pour les autres missions. De plus, une nouvelle contrainte apparaît pour les missions extra-urbaines simulées puisque la puissance maximale de décharge de la batterie $P_{bat,d}$ ne permet pas d'effectuer treize des mille missions.

Concernant le dimensionnement optimal pour la mission urbaine mesurée, il permet de satisfaire les standards ECE et Artemis urbains mais aussi le cycle européen extra-urbain EUDC. Ce

dimensionnement montre pourtant des limites, d'une part en termes de puissance de la machine électrique, pour les simulations urbaines et le standard Artemis extra-urbain, d'autre part en termes de puissance de décharge de la batterie pour les missions simulées urbaines et extra-urbaines ainsi que pour la mission extra-urbaine mesurée et enfin en termes de capacité de la batterie pour quarante-sept des mille missions extra-urbaines simulées où le *SOE* descend en dessous des 40% minimum.

La comparaison des dimensionnements optimaux entre la mission urbaine mesurée et l'ensemble des mille missions urbaines simulées montre que la batterie de 6 kWh est conservée alors que le groupe électrogène est augmenté de 9 kW à 13 kW. La consommation de carburant moyenne est alors majorée de 5 %. Néanmoins, il est à souligner que le dimensionnement pour la mission urbaine mesurée ne permet pas d'assurer l'ensemble des missions simulées. Ceci montre l'intérêt d'appliquer l'algorithme de dimensionnement sur un ensemble de missions plutôt que sur une mission spécifique. Le dimensionnement qui en résulte est d'autant plus robuste.

En ce qui concerne les cycles de conduite standards extra-urbains EUDC et Artemis, les dimensionnements obtenus sont assez différents. En effet, le groupe électrogène est privilégié pour le premier alors que la batterie est augmentée de 75% pour le second. Malgré des consommations pour ces deux cycles relativement proches à dimensionnement optimal respectif, le dimensionnement n°5 ne permet pas de satisfaire le cycle Artemis et le dimensionnement n°6 appliqué à la mission EUDC augmente la consommation de 5 %.

Le dimensionnement n°7 combinant un groupe électrogène de 19 kW et une batterie de 5 kWh est optimal pour la mission extra-urbaine mesurée. Cependant, il ne permet pas d'assurer l'ensemble des mille missions simulées en raison de la puissance maximale de décharge insuffisante de la batterie ou de son état d'énergie trop faible. Ceci montre une nouvelle fois le risque pris en ne considérant qu'une seule mission du véhicule.

Afin d'optimiser la consommation sur l'ensemble des simulations, le groupe électrogène doit être augmenté à 22 kW et la batterie doit être augmentée de 40%. Pour ce dimensionnement n°8, la consommation de la mission extra-urbaine mesurée n'est alors augmentée que d'un pourcent par rapport au dimensionnement optimal n°7.

En conclusion, la nature de la mission a un impact significatif sur la consommation de carburant d'un véhicule en fonction du dimensionnement de la chaîne de traction. L'économie de carburant semble surtout possible avec les missions urbaines qui présentent des consommations plus faibles. En effet, la dynamique d'un véhicule peut expliquer un tel résultat : lors d'une mission urbaine, beaucoup d'accélération avec un pic de puissance demandée et de nombreuses décélérations avec freinage récupératif, renforcent le rôle de la batterie. Cette économie de carburant sera plus faible en extra-urbain avec de plus longs trajets à vitesse élevée.

Ainsi, il semble presque impossible de trouver le dimensionnement particulier qui impliquera de faibles consommations de carburant sur des missions aussi différentes que les urbaines et extra-urbaines. Ceci démontre une fois de plus l'intérêt d'optimiser le dimensionnement de la chaîne de traction en fonction de la mission.

4.3 STRUCTURE HYBRIDE PARALLELE

4.3.1 ALGORITHME DE DIMENSIONNEMENT

4.3.1.1 Démarche générale

Le processus de dimensionnement des composants d'une structure parallèle est similaire à celui proposé pour la structure série. Il s'agit à présent d'optimiser la puissance du moteur thermique (au lieu du groupe électrogène) et la capacité de la batterie $\{P_{mt} ; E_{bat}\}$ afin de minimiser la consommation moyenne de carburant C_{carb} sur un ensemble de mille missions $\{v_k(t) ; \gamma_k(t) ; \alpha_k(t)\}_{k=1,\dots,1000}$.

L'organisation globale de ce processus est présentée en Figure 4.8. Trois types de données sont retrouvées en entrée du processus : la table des puissances nominales de moteurs thermiques allant de $P_{mt\ 1}$ à $P_{mt\ n}$, une table de capacité de batterie évoluant de $E_{bat\ 1}$ à $E_{bat\ q}$ et le classeur d'un millier de missions du véhicule.

Pour chacun des dimensionnements $\{P_{mt\ i} ; E_{bat\ j}\}$ et pour chacune des missions d'indice k , l'énergie carburant consommée $E_{carb\ i,j,k}$ correspondante est calculée, ce qui permet par la suite de déterminer la consommation moyenne $C_{carb\ i,j}$ pour chaque dimensionnement sur l'ensemble des mille missions. Finalement, le dimensionnement optimal $\{P_{mt,opt} ; E_{bat,opt}\}$ est identifié pour minimiser cette consommation de carburant.

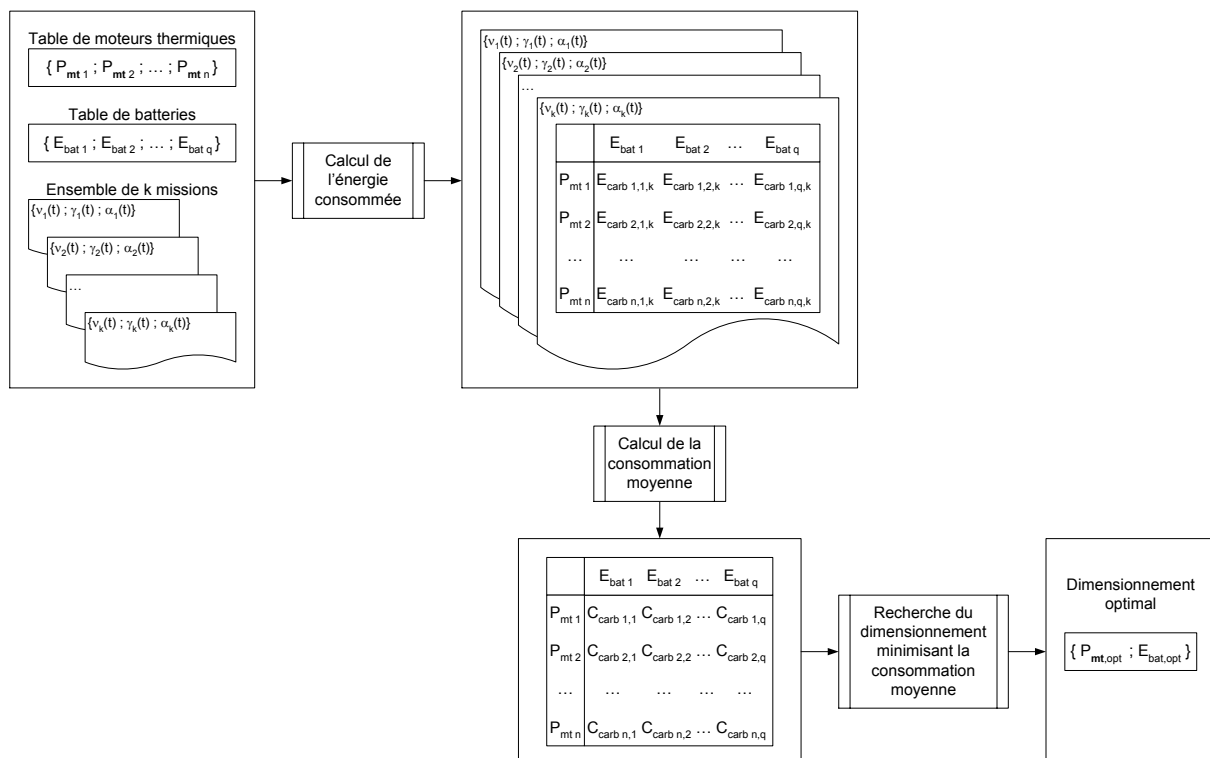


Figure 4.8 Entrées et sorties de l'algorithme de dimensionnement pour une structure parallèle

4.3.1.2 Description de l'algorithme

Le processus de dimensionnement des composants d'une chaîne de traction hybride parallèle, présenté en Figure 4.9, est globalement similaire à celui adopté pour l'architecture série. Les processus grisés sont définis plus en détails dans les paragraphes suivants.

Le processus de dimensionnement comporte deux types d'entrées :

- d'une part, le modèle du véhicule présenté dans le Chapitre 3 et ses données d'entrée telles que les caractéristiques du châssis et les modèles génériques des composants,
- d'autre part, la ou les mission(s) du véhicule définies par les profils de vitesse, accélération et inclinaison de la route.

Une première étape est d'initialiser la masse m du véhicule afin d'estimer la puissance aux roues $p_{roues}(t)$ en fonction de la mission et de la masse du véhicule.

Le processus grisé « Définition des tables » définit l'ensemble des dimensionnements à tester par l'algorithme. Les plages de variation de P_{mt} et E_{bat} sont calculées selon les règles basiques suivantes :

- ♦ Le moteur thermique doit être capable d'assurer au moins la puissance moyenne P_{moy} de la mission définie par l'équation (4.8) et est limité par la puissance maximale P_{max} caractérisée par l'équation (4.9), ainsi $P_{mt} \in [P_{mt\ 1} = P_{moy}, P_{mt\ n} = P_{max}]$.
- ♦ La capacité de la batterie E_{bat} est limitée par l'énergie de la mission E_{max} comme décrit dans les équations (4.10) et (4.11), ainsi $E_{bat} \in [E_{bat\ 1} = 1, E_{bat\ q} = E_{max}]$.

$$P_{moy} = \frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{p_{roues}(t)}{\eta_{trans}} \right) dt \quad (4.8)$$

$$P_{max} = \max \left(\frac{p_{roues}(t)}{\eta_{trans}} \right) \quad (4.9)$$

$$e_{bat}(t) = \int_{t_0}^t \left(\frac{p_{roues}(\tau)}{\eta_{trans}} - P_{moy} \right) d\tau \quad (4.10)$$

$$E_{max} = \left(\max_{t \in [t_0, t_f]} (e_{bat}(t)) - \min_{t \in [t_0, t_f]} (e_{bat}(t)) \right) \times \frac{1}{\eta_{me}} \times \frac{1}{\eta_{bat}} \times \frac{1}{SOE_{max} - SOE_{min}} \quad (4.11)$$

Par rapport à la structure série, ces équations prennent en compte le rendement de la transmission η_{trans} et le rendement de la machine électrique η_{me} conformément au schéma de la Figure 3.7.

Le plan d'expériences fait varier la puissance nominale du moteur thermique P_{mt} par pas de 1 kW et la capacité de la batterie E_{bat} par pas de 1 kWh comme pour la structure série.

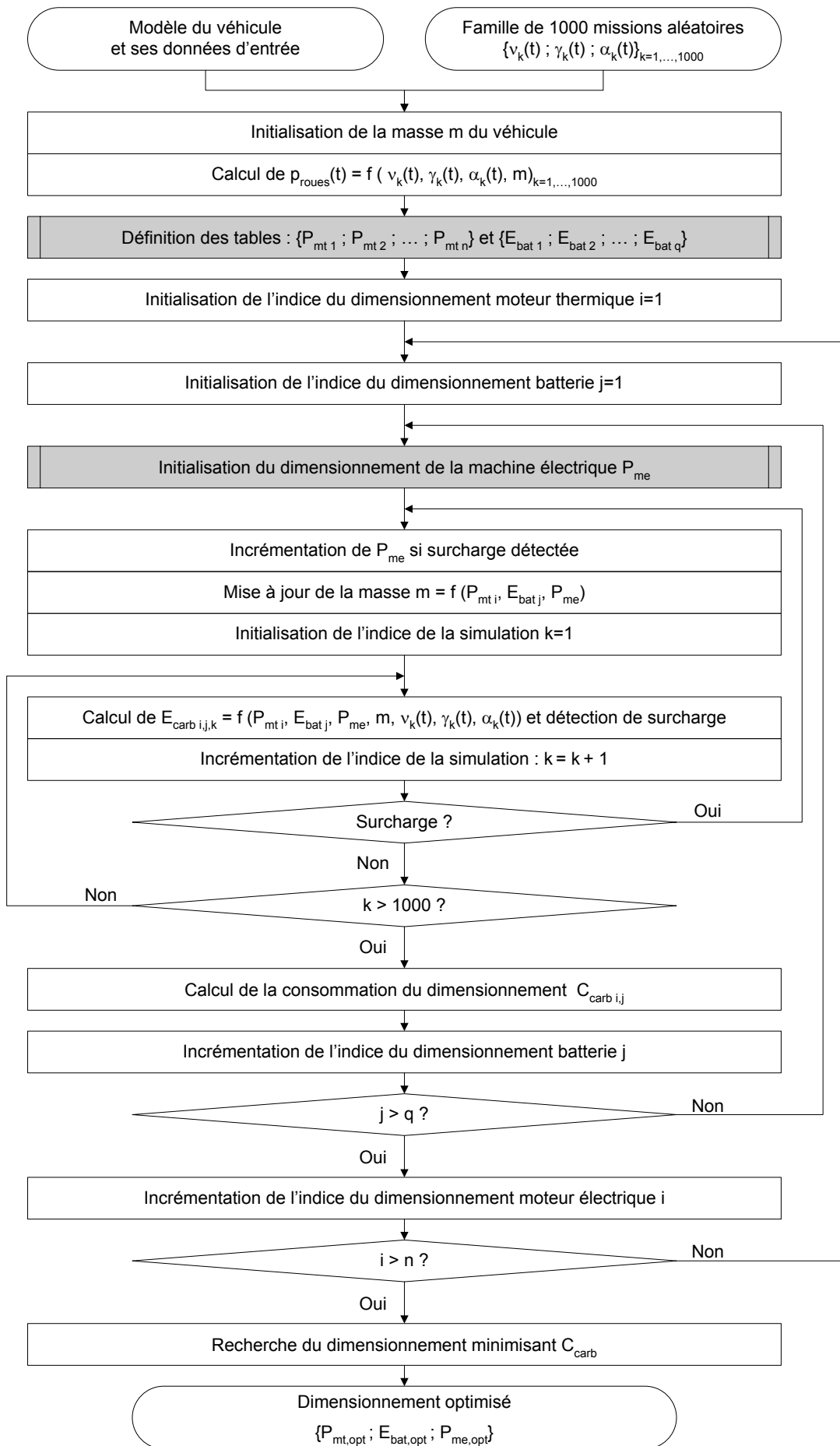


Figure 4.9 Algorithme de dimensionnement pour une structure parallèle

Le programme de dimensionnement est ensuite composé de quatre boucles :

- les deux boucles externes imbriquées permettent de tester l'ensemble des dimensionnements de moteur thermique et de batterie de manière exhaustive,
- la première boucle interne assure le dimensionnement de la machine électrique pour ne pas qu'il y ait de surcharge(s) trop longue(s),
- la deuxième boucle interne évalue la consommation pour toutes les missions du véhicule à dimensionnement donné.

En entrant dans la deuxième boucle externe, le dimensionnement du moteur thermique et de la batterie $\{P_{mt} ; E_{bat}\}$ est initialisé mais le dimensionnement de la machine électrique reste à déterminer. Celle-ci étant située entre la transmission et la batterie, sa puissance nominale P_{me} dépend, d'une part, de la puissance maximale demandée aux roues, au rendement de la transmission près, puis sera limitée, d'autre part, par la puissance de décharge de la batterie $P_{bat,d}$, elle-même liée à E_{bat} , comme décrit dans les équations (4.12) et (4.13) :

$$P_{bat,d} = T_{max,d} \times E_{bat} \quad (4.12)$$

$$P_{me,max} = \frac{P_{bat,d} \times \eta_{me}}{k_{max}} \quad (4.13)$$

où k_{max} est le ratio puissance maximale sur puissance nominale de la machine électrique.

Concernant la détection de la surcharge de la machine électrique, elle ne peut se faire qu'après avoir appliqué la stratégie de gestion de l'énergie puisque qu'elle nécessite la connaissance du profil de puissance demandée à la machine. Cette procédure diffère de celle de la structure série dans laquelle la détection s'effectuait lors du dimensionnement de la machine. En effet, son profil de puissance était celui calculé directement au niveau des roues du véhicule.

Les deux boucles internes permettent donc de calculer l'énergie consommée E_{carb} pour chacune des mille missions en s'assurant que le dimensionnement de la machine électrique n'implique de surcharge pour aucune d'entre elles. Une fois les énergies déterminées, la consommation moyenne de carburant C_{carb} est calculée pour un dimensionnement donné.

Les boucles externes permettent de répéter la démarche pour chacun des dimensionnements définis dans les tables. Une fois tous les dimensionnements testés, la recherche de celui qui minimise C_{carb} permet d'obtenir le dimensionnement optimal recherché $\{P_{mt,opt} ; E_{bat,opt} ; P_{me,opt}\}$.

4.3.2 RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT SELON DIFFERENTS TYPES DE MISSION

L'algorithme de dimensionnement des composants de la chaîne de traction d'une architecture parallèle, décrit dans le paragraphe précédent, a été appliqué sur les différents types de mission : d'abord sur les standards européens, ensuite sur les cycles Artemis puis sur les missions urbaines et extra-urbaines, mesurée et simulées.

4.3.2.1 Missions standards européennes

Les résultats de dimensionnement pour les missions standards européennes sont illustrés dans les Annexes G.1 à G.4 et synthétisés dans le Tableau 4.10. Celui-ci contient le meilleur et le moins bon dimensionnement en termes de puissances nominales du moteur thermique P_{mt} et de la machine électrique P_{me} , de capacité de batterie E_{bat} qui donnent lieu à la masse de la chaîne de traction m_{tract} . L'état d'énergie de la batterie à la fin de la mission SOE_{fin} est reporté en pourcents étant donné qu'il était initialisé à 70% en début de mission et la consommation de carburant C_{carb} est donnée en nombre de litres de carburant aux cent kilomètres. Le coefficient R_{carb} est introduit afin de quantifier la surconsommation entre la meilleure consommation $C_{carb,min}$ et la moins bonne $C_{carb,max}$ selon (4.14) :

$$R_{carb} = \frac{C_{carb,max} - C_{carb,min}}{C_{carb,min}} \quad (4.14)$$

Tableau 4.10 Résultats de dimensionnement pour les missions standards européennes

Mission	Qualité du dimensionnement	P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	P_{me} (kW)	m_{tract} (kg)	SOE_{fin} (%)	C_{carb} (l/100km)	R_{carb} (%)
ECE 200s	Meilleur	25	1	3	41	84,9	2,21	+122%
	Moins bon	1	2	8	23	64,5	4,91	
ECE 800s	Meilleur	15	2	2	34	90,2	2,64	+91%
	Moins bon	1	2	8	23	48,3	5,04	
EUDC	Meilleur	38	5	14	95	91,8	4,05	+34%
	Moins bon	8	4	18	55	55,4	5,41	
NEDC	Meilleur	18	5	14	70	86,0	4,04	+34%
	Moins bon	4	5	19	57	49,6	5,40	

Le meilleur dimensionnement {25 kW ; 1 kWh} pour le cycle européen ECE de 200s mène à une consommation record de 2,21 l/100km. En effet, l'état de charge final étant supérieur à l'état initial, la consommation corrigée bénéficie de l'énergie emmagasinée dans la batterie. Le dimensionnement le moins bon, parmi les dimensionnements testés entre 1 kW et 25 kW pour le moteur thermique et entre 1 kWh et 2 kWh pour la batterie, correspond alors à une consommation supérieure de 122 % par rapport à la meilleure. Cette consommation est pénalisée par un état de charge inférieur à l'état de charge initial.

L'algorithme de dimensionnement, appliqué au même cycle répété quatre fois, préconise un moteur thermique moins puissant de 15 kW associé à une batterie de 2 kWh. La consommation obtenue est alors augmentée à 2,64 l/100km. Cette dernière consommation reste néanmoins réduite comparée à celle obtenue pour le cycle EUDC avec le meilleur dimensionnement {38 kW ; 5 kWh}. Le cycle NEDC, quant à lui, est réalisé de manière optimale avec un moteur thermique de 18 kW, proche de celui du cycle ECE de 800s, et la même batterie de 5 kWh que le cycle EUDC.

Les tableaux de consommation détaillés en fonction des dimensionnements testés pour chacune des missions sont disponibles en Annexes G.1 à G.4. Ces résultats révèlent que les dimensionnements donnés pour optimaux sur le cycle ECE de 200s avec un moteur thermique supérieur à 21 kW augmentent considérablement la consommation sur le même cycle répété quatre fois, jusqu'à plus d'un litre et demi aux cent kilomètres. Ceci montre de nouveau l'importance de la durée de la mission.

D'après les Annexes G.3 et G.4, correspondant aux cycles EUDC et NEDC respectivement, à P_{mt} donné, la consommation commence par diminuer puis augmente avec E_{bat} . De même, à E_{bat} donné, la consommation diminue puis augmente lorsque P_{mt} est incrémenté. Quelques discontinuités peuvent être observées dans les valeurs de consommation entre les dimensionnements {38 kW ; 5 kWh} et {39 kW ; 5 kWh}, par exemple, où la consommation passe de 4,05 à 4,63 l/100km. Ceci est dû au profil particulier des cycles européens pour lesquels la stratégie de gestion de l'énergie fait apparaître des cas défavorables (trop de recharge de la batterie, point de fonctionnement non optimal...). Ces discontinuités seront réduites sur les cycles Artemis et les autres missions étudiées comme nous le verrons dans les paragraphes suivants.

4.3.2.2 Missions Artemis

Le Tableau 4.11 synthétise les résultats de dimensionnement pour les trois cycles Artemis. Les Annexes G.5 à G.7 illustrent plus en détails les résultats des dimensionnements.

Tableau 4.11 Résultats de dimensionnement pour les missions Artemis

Mission	Qualité du dimensionnement	P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	P_{me} (kW)	m_{tract} (kg)	SOE_{fin} (%)	C_{carb} (l/100km)	R_{carb} (%)
Artemis urbain	Meilleur	27	6	17	91	89,8	3,87	+85%
	Moins bon	1	4	16	44	52,0	7,15	
Artemis extra-urbain	Meilleur	26	6	17	90	88,9	4,22	+62%
	Moins bon	7	5	23	65	41,4	6,83	
Artemis autoroute	Meilleur	49	9	19	140	89,5	6,27	+58%
	Moins bon	26	6	27	100	49,8	9,90	

La consommation de 3,87 l/100km obtenue avec le meilleur dimensionnement {27 kW ; 6 kWh} sur le cycle Artemis urbain est loin des 2,64 l/100km obtenus pour le cycle ECE de 800s. En effet, la puissance du moteur thermique a été augmentée de 80% et la batterie triplée, ce qui a conduit à une chaîne de traction deux fois et demie plus lourde.

Concernant le meilleur dimensionnement pour le cycle Artemis extra-urbain, la consommation obtenue est plus proche de celle sur le cycle EUDC. Quant au dimensionnement sur la mission autoroutière Artemis, la consommation passe au dessus des 6 l/100km avec un moteur thermique important de 49 kW et des batteries non négligeables de 9 kWh.

Les coefficients R_{carb} entre les consommations réalisées par le meilleur et le pire dimensionnement sont plus importants pour la structure parallèle que pour la structure série. En effet, pour ces mêmes missions Artemis, le coefficient allait de +37% pour l'urbain à +5% pour l'autoroute. Cette structure semblerait donc plus « sensible » à un mauvais choix des composants.

4.3.2.3 Missions urbaines

Après avoir été appliquée aux cycles standards, la méthode de dimensionnement est maintenant utilisée sur la mission urbaine mesurée avec un GPS, soit 29h d'enregistrement, ainsi que sur les missions simulées à partir du modèle de Markov, soit 1000 missions de 20min chacune. Les résultats complets sont disponibles en Annexes G.8 et G.9 et une synthèse est donnée dans le Tableau 4.12.

Tableau 4.12 Résultats de dimensionnement pour les missions urbaines

Mission	Qualité du dimensionnement	P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	P_{me} (kW)	m_{tract} (kg)	SOE_{fin} (%)	C_{carb} (l/100km)	R_{carb} (%)
Mesure urbaine	Meilleur	11	10	22	102	88,2	3,85	+47%
	Moins bon	8	60	26	436	57,1	5,66	
Simulations urbaines 1000x1200s	Meilleur	30	16	23	167	87,7	3,51	+56%
	Moins bon	90	1	6	125	85,7	5,48	

Concernant la mesure urbaine, le dimensionnement optimal donne une consommation de 3,85 l/100km très proche de celle du cycle Artemis urbain avec cependant un dimensionnement assez différent. En effet, la mission mesurée étant de plus grande durée, des batteries plus importantes ont pu être testées ce qui a permis de réduire la puissance du moteur thermique. Le bilan de puissance, décrit en Figure 4.10, montre bien le rôle de la batterie avec ses différentes phases de charge et de décharge.

Quant au dimensionnement sur l'ensemble des simulations, celui-ci assure une consommation de carburant plus faible avec des composants plus puissants. En effet, le mode régénération est souvent privilégié pour ce dimensionnement ce qui conduit la batterie à toujours emmagasiner l'énergie pour que le moteur thermique fonctionne à un bon rendement comme le montre le bilan de puissance en Figure 4.11 pour un exemple de mission simulée. Ainsi l'état de charge en fin de mission est plus élevé qu'au début et la consommation s'en trouve améliorée avec une énergie récupérée d'environ 23% de l'énergie consommée en carburant. Ceci montre les limites du calcul introduit pour pénaliser la consommation carburant en fonction du SOE_{fin} , mais aussi de la gestion de l'énergie qui devra utiliser cette énergie régénérée à un moment ou à un autre.

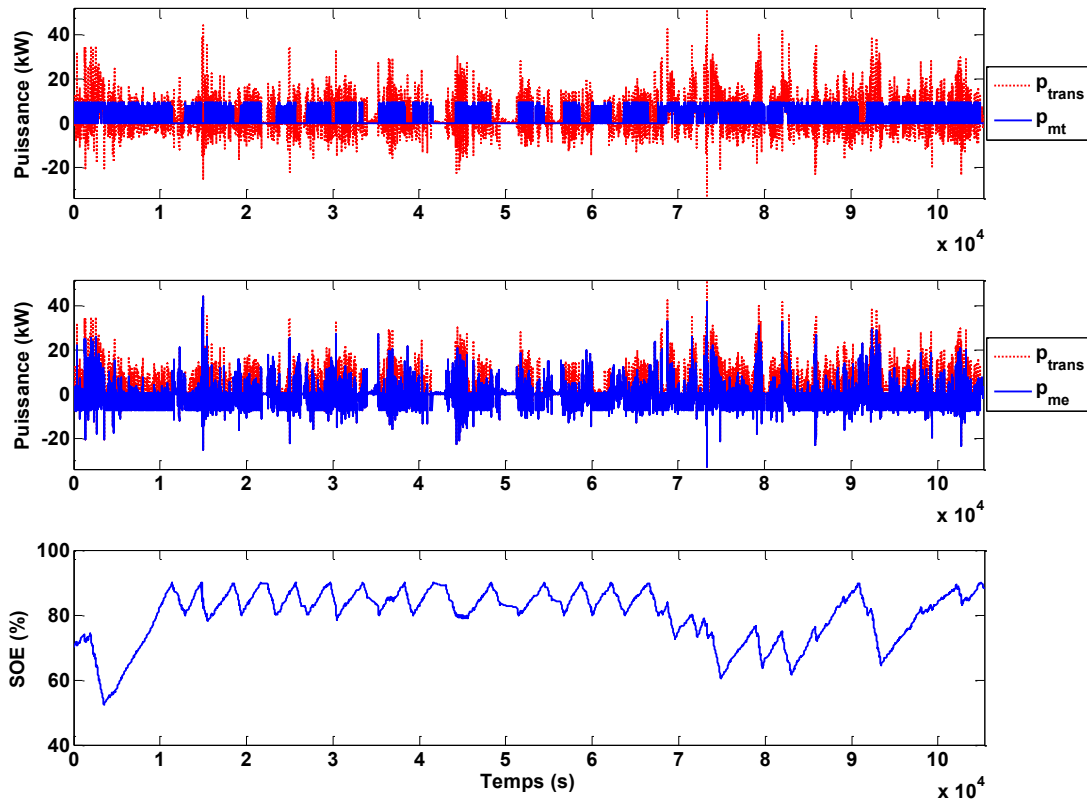


Figure 4.10 Bilan de puissance du meilleur dimensionnement {11 kW ; 10 kWh} pour la mission urbaine mesurée

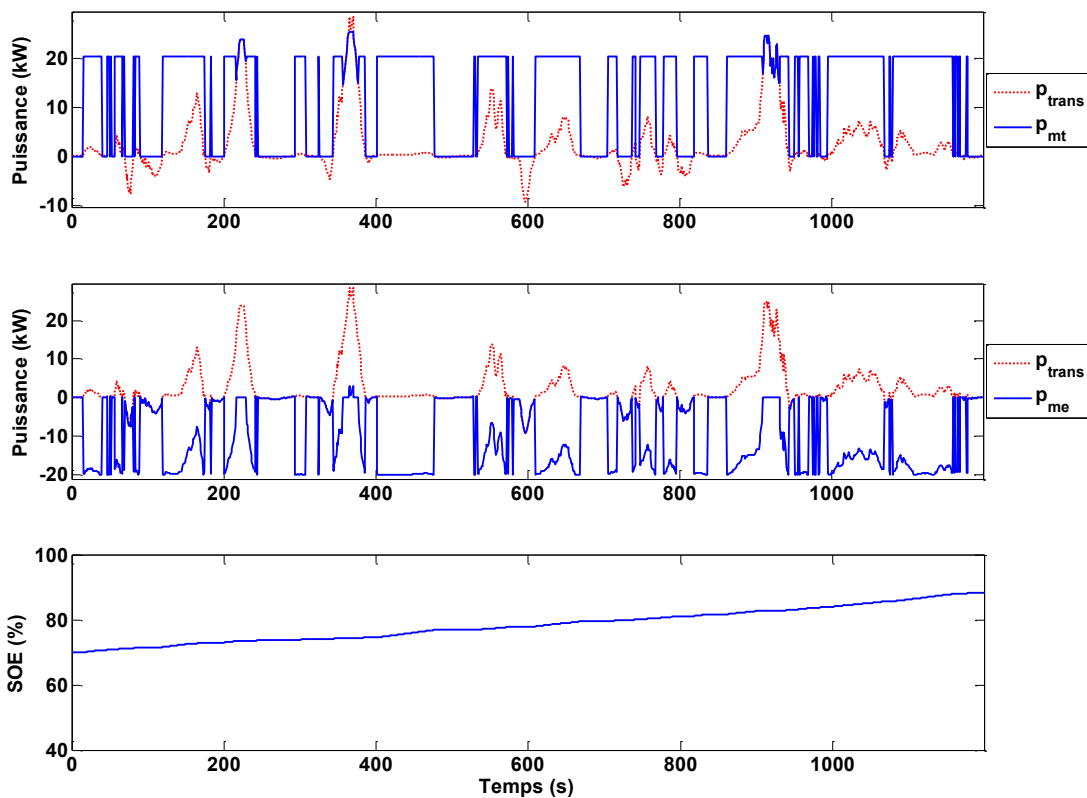


Figure 4.11 Bilan de puissance du meilleur dimensionnement {30 kW ; 16 kWh} pour une mission urbaine simulée

Les Annexes G.8 et G.9 détaillent les résultats de dimensionnement où il peut être observé une variation assez continue de la consommation au contraire des tableaux pour les cycles européens où des discontinuités avaient été relevées. L'Annexe G.9 fait figurer les dimensionnements assurant 95% au moins de l'ensemble des missions urbaines simulées. Contrairement à ce qui avait été présenté pour la structure série, les consommations pour les dimensionnements n'assurant pas l'ensemble des 1000 missions ne sont pas améliorées. Une autre remarque concerne les dimensionnements {30 kW ; 10 kWh} et {15 kW ; 6kWh} : la puissance de la chaîne de traction est divisée par deux mais ne conduit qu'à une réduction de 0,1 l/100km. La consommation ne peut donc pas être le seul critère de dimensionnement. Le coût de la chaîne de traction et la durée de vie de la batterie pourraient être pris en compte.

4.3.2.4 Missions extra-urbaines

L'algorithme de dimensionnement a enfin été appliqué aux missions extra-urbaines mesurée et simulées. Pour rappel, la mission mesurée contient plus de douze heures d'enregistrement et les missions simulées ont une durée de deux heures. Les Annexes G.10 et G.11 illustrent en détail les résultats des dimensionnements sur ces deux types de missions.

Le Tableau 4.13 reprend quant à lui les principaux résultats de ces dimensionnements et les compare à ceux effectués sur la mission mesurée pour des caractéristiques de véhicule différentes. La première ligne correspond au véhicule standard utilisé tout au long de ce mémoire avec un coefficient de frottement aérodynamique de 0,25 et une masse de châssis de 1400 kg. Le même processus de dimensionnement a ensuite été appliqué à un véhicule où seul le coefficient de frottement aérodynamique a été changé à 0,22. Puis la masse du châssis a été réduite à 500 kg pour un C_w de 0,25 à nouveau.

Tableau 4.13 Résultats de dimensionnement pour les missions extra-urbaines

Mission	C_w	$m_{\text{châssis}}$ (kg)	Qualité du dimensionnement	P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	P_{me} (kW)	m_{tract} (kg)	SOE_{fin} (%)	C_{carb} (l/100km)	R_{carb} (%)
Mesure extra-urbaine	0,25	1400	Meilleur n°1	26	5	12	78	89,8	4,97	
			Meilleur sans inclinaison	27	3	10	64	87,4	4,85	
			Moins bon	20	60	18	443	55,4	13,26	
	0,20	1400	Meilleur n°2	23	3	12	61	82,4	4,50	
			Moins bon	19	60	18	442	58,3	9,07	
	0,25	500	Meilleur n°3	19	2	12	43	88,3	3,39	
			Moins bon	15	60	18	437	60,0	6,16	
Simulations extra-urbaines 1000x2h	0,25	1400	Meilleur	28	4	13	75	82,9	5,01	
			Moins bon	19	60	18	442	61,4	12,98	

Le meilleur dimensionnement n°1 pour la mission extra-urbaine mesurée avec les caractéristiques du véhicule habituel amène une consommation assez réduite de 4,97 l/100km. En effet, elle est légèrement supérieure à la consommation obtenue pour le cycle Artemis extra-urbain mais bien inférieure à celle du cycle Artemis autoroute. Comme dans l'étude de la structure série, le fait de considérer la mission sans inclinaison modifie le résultat de dimensionnement avec un moteur thermique légèrement plus puissant, une batterie et une machine électrique plus petites, ce qui engendre une consommation diminuée de 3%.

Après amélioration du coefficient de frottement aérodynamique, cette consommation peut être réduite de 6% comme le montre le résultat du dimensionnement n°2. Une réduction encore plus importante est obtenue en allégeant le châssis du véhicule de 1400 kg à seulement 500 kg. En effet, le dimensionnement n°3 associant un moteur thermique de 19 kW et une batterie de 2 kWh conduit à une consommation de seulement 3,39 l/100km soit une réduction de 32% par rapport au dimensionnement n°1.

En conclusion, la conception d'un véhicule requiert une étude multiparamétrique. La précision du modèle de la chaîne de traction et l'optimisation de la gestion de l'énergie sont des paramètres qui ont un impact sur la consommation, mais cette étude a montré que les caractéristiques mécaniques du véhicule sont des facteurs tout aussi importants.

4.3.2.5 Synthèse des dimensionnements

Le Tableau 4.14 synthétise les résultats de pré-dimensionnement obtenus dans les études précédentes. De la même manière que pour les résultats de la structure série, les cases grisées présentent le dimensionnement optimal pour chaque type de mission. Une case rayée signifie que le dimensionnement ne permet pas de satisfaire la ou l'ensemble des missions avec un indicateur de la cause :

- P_{mt+me} indique que les puissances additionnées du moteur thermique et de la machine électrique ne permettent pas de satisfaire la puissance maximale demandée au niveau des roues par la ou les missions,
- $P_{bat,d}$ indique que la puissance maximale de décharge de la batterie ne permet pas d'appliquer la stratégie de gestion de l'énergie,
- SOE indique que l'état d'énergie de la batterie est descendu en dessous du seuil autorisé de 40%.

Comparativement au Tableau 4.9 relatif à la structure série où les dimensionnements n'étaient pas souvent capables d'effectuer des missions de types différents, les dimensionnements obtenus pour la structure parallèle permettent de satisfaire d'autres missions. En effet, seul le dimensionnement calculé pour le cycle ECE est uniquement dédié à cette mission et seules les missions urbaines simulées n'acceptent qu'un seul et unique dimensionnement en raison de la puissance maximale réclamée lors de ce parcours.

Au vu de ces résultats, certains de ces dimensionnements semblent de bons compromis pour satisfaire l'ensemble des missions proposées, urbaines et extra-urbaines confondues. En effet, le dimensionnement n°2 implique une augmentation de la consommation entre 0% et seulement 5% sur les missions réalistes, c'est-à-dire hors cycles européens ECE et EUDC. De même, le dimensionnement n°6 n'engendre qu'une augmentation de 4% maximum. En effet, ces dimensionnements sont extrêmement proches avec des batteries de même capacité et des moteurs thermiques similaires à 1 kW près.

Tableau 4.14 Consommation de carburant pour différents pré-dimensionnements et différentes missions

Dimensionnements					Consommation (l/100km)							
n°	P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	P_{me} (kW)	m_{tract} (kg)	Missions urbaines				Missions extra-urbaines			
					4 x ECE	Artemis urbain	Mesure	Simulations 1000x1200s	EUDC	Artemis extra-urbain	Mesure	Simulations 1000x2h
1	15	2	2	34	2,64	P_{mt+me}	P_{mt+me}	P_{mt+me}	P_{mt+me}	P_{mt+me}	P_{mt+me}	P_{mt+me}
2	27	6	17	91	3,23 +22%	3,87	4,03 +5%	P_{mt+me}	4,30 +6%	4,24 +0%	5,01 +1%	5,02 +0%
3	11	10	22	102	3,42 +29%	4,67 +21%	3,85	P_{mt+me}	4,97 +23%	4,86 +15%	$P_{bat,d}$	$P_{bat,d}$ SOE
4	30	16	23	167	3,26 +23%	4,13 +7%	4,21 +9%	3,51	4,43 +9%	4,29 +2%	5,14 +3%	5,11 +2%
5	38	5	14	95	3,74 +42%	4,66 +21%	4,18 +9%	P_{mt+me}	4,05	4,46 +6%	5,20 +5%	5,17 +3%
6	26	6	17	90	3,05 +16%	3,89 +1%	4,00 +4%	P_{mt+me}	4,32 +7%	4,22	5,00 +1%	5,02 +0%
7	26	5	12	78	3,25 +23%	4,09 +6%	3,95 +3%	P_{mt+me}	4,25 +5%	P_{mt+me}	4,97	5,01 +0%
8	28	4	13	75	3,62 +37%	4,48 +16%	4,02 +4%	P_{mt+me}	4,20 +4%	4,41 +5%	5,00 +1%	5,01

4.4 COMPARATIF DES STRUCTURES PAR RAPPORT AUX MISSIONS

Le processus de dimensionnement ayant été conduit sur les deux structures, série et parallèle, une comparaison sur la base de la consommation de carburant permettra de guider le concepteur dans ces choix. Pour chacune des missions, le meilleur dimensionnement est relevé pour chacune des architectures dans le Tableau 4.15. La ligne correspondant à la structure la plus performante est alors surlignée en vert.

Malgré une exception à noter sur les cycles ECE où le parallèle est de 6% à 22% plus économe, l'architecture série conduit globalement à de meilleures consommations bien que la masse de chaîne de traction soit généralement supérieure. Ceci peut s'expliquer, d'une part, par le fait que la structure série permet de faire fonctionner le moteur thermique à son meilleur rendement dans l'ensemble groupe électrogène. Pour obtenir des consommations similaires, le

processus de dimensionnement choisit des moteurs thermiques de puissance toujours plus élevée pour le parallèle par rapport au série afin de travailler aux meilleurs rendements. D'autre part, la masse de la chaîne de traction, de 213 kg au maximum, semble avoir peu d'influence par rapport à la masse du châssis de 1400 kg. L'impact de la masse de chaîne de traction serait plus importante sur la consommation d'un véhicule ayant un châssis de 500 kg.

En conclusion, il semble que la nature de la mission ait plus d'impact sur la consommation que le type de structure choisi. En effet, pour le cycle Artemis urbain et les missions urbaines simulées, la différence ne s'élève qu'à 1 et 2% respectivement avec un maximum à 22% pour le cycle ECE de 200s. La différence entre la meilleure consommation de 2,21 l/100km obtenue sur ce dernier cycle et la moins bonne consommation de 6,27 l/100km obtenue sur le cycle Artemis autoroute avec une structure parallèle représente quant à elle un écart de 184%.

Tableau 4.15 Comparatif des structures par rapport aux missions

Mission	Architecture	P_{ge} / P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	P_{me} (kW)	m_{tract} (kg)	C_{carb} (l/100km)	R_{carb} (%)
ECE 200s	Série	18	2	8	62	2,70	+22%
	Parallèle	25	1	3	41	2,21	
ECE 800s	Série	10	2	8	44	2,80	+6%
	Parallèle	15	2	2	34	2,64	
EUDC	Série	30	4	20	114	3,86	+5%
	Parallèle	38	5	14	95	4,05	
NEDC	Série	13	4	20	76	3,69	+10%
	Parallèle	18	5	14	70	4,04	
Artemis urbain	Série	17	4	18	83	3,83	+1%
	Parallèle	27	6	17	91	3,87	
Artemis extra-urbain	Série	23	7	29	127	3,88	+9%
	Parallèle	26	6	17	90	4,22	
Artemis autoroute	Série	43	10	50	213	5,86	+7%
	Parallèle	49	9	19	140	6,27	
Mesure urbaine	Série	9	6	24	84	3,29	+17%
	Parallèle	11	10	22	102	3,85	
Simulations urbaines 1000x1200s	Série	13	6	35	104	3,44	+2%
	Parallèle	30	16	23	167	3,51	
Mesure extra-urbaine	Série	19	5	22	98	4,41	+13%
	Parallèle	26	5	12	78	4,97	
Simulations extra-urbaines 1000x2h	Série	22	7	26	122	4,47	+12%
	Parallèle	28	4	13	75	5,01	

4.5 CONCLUSION

L'étude menée dans ce chapitre a permis de mieux comprendre les paramètres entrant en compte dans le processus de conception d'un véhicule hybride. Dans un premier temps, nous avons montré que l'optimisation du dimensionnement des composants d'un véhicule hybride sur un ensemble de missions réalistes est bien plus « robuste » que la même optimisation réalisée sur un cycle de conduite standard unique, même réaliste.

Dans un second temps, l'impact de la mission sur la consommation a été mis en évidence. En effet, les écarts entre missions urbaines et extra-urbaines et entre cycles standards et missions basées sur des mesures ont été étudiés et semblent plus importants que les écarts calculés sur une mission donnée en fonction du choix de la structure de la chaîne de traction.

En perspectives, la recherche des conditions initiales, notamment pour le dimensionnement de la machine électrique dans la structure parallèle, serait à améliorer. D'autre part, les limites de la stratégie de gestion de l'énergie proposée ont été soulevées. Cependant, le temps de simulation du modèle de la chaîne de traction par flux de puissance est 26 500 fois plus rapide que le temps réel en se basant sur un pas de calcul égal au pas de mesure des missions d'une seconde. En effet, les 564 dimensionnements différents (47 groupes électrogènes \times 12 batteries) pour la structure série, testés sur le millier de missions urbaines simulées de 20 min chacune, représentent un total de 7755 jours de mission en temps réel alors que leur simulation n'a duré que 7 h. Cela signifie que la stratégie de gestion en ligne pourrait fonctionner en temps réel et qu'il existe une certaine marge pour l'améliorer.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les enjeux environnementaux et la montée du prix du carburant incitent les acteurs du domaine automobile à trouver des solutions pour réduire la consommation énergétique de leurs véhicules. Comme nous l'avons vu, un axe d'amélioration est l'hybridation de la chaîne de traction. En effet, les véhicules électriques hybrides permettent une diminution de la consommation par rapport aux véhicules conventionnels. Dans une démarche de conception, plusieurs paramètres sont alors à prendre en compte de façon globale. Le premier choix à effectuer revient à la structure série ou parallèle de la chaîne de traction. Le deuxième concerne le dimensionnement des composants, parmi lesquels le moteur thermique, la ou les machines électriques et la batterie ou un autre organe de stockage.

Dans ce travail, nous nous étions fixés trois objectifs pour effectuer ces choix :

- prendre en compte des missions réalistes et de natures spécifiques (urbain, extra-urbain...),
- optimiser le dimensionnement de manière « robuste » sur un grand nombre de missions plutôt que sur un cycle unique,
- s'affranchir d'un choix « a priori », que ce soit sur la structure ou sur les caractéristiques nominales des composants de la chaîne de traction.

L'usage des cycles de conduite standards a ainsi démontré un certain nombre de limitations en termes de réalisme ou de spécificité. Afin de parer à ces limites, nous avons tout d'abord développé un modèle de la mission d'un véhicule définie par le trio de variables {vitesse ; accélération ; inclinaison}. L'originalité de cette modélisation est de prendre en compte l'inclinaison de la route, paramètre non négligeable au regard de la puissance consommée comme l'a confirmé l'analyse de sensibilité. Un appareil GPS a permis de constituer deux bases de données de missions spécifiques : l'une urbaine enregistrée dans la métropole de Nantes avec un véhicule auto-école et l'autre extra-urbaine sur un parcours particulier St Nazaire – Rennes avec un véhicule de type familial. Ces mesures n'avaient pas la prétention d'être représentatives de missions spécifiques de véhicules, mais elles ont permis de mettre en œuvre une modélisation par matrice de Markov sur deux types de missions réalistes, puisque issues de déplacements réels. Nous avons montré que cet outil est capable de conserver la corrélation entre les trois variables ainsi que leurs caractéristiques statistiques et dynamiques. Le processus de simulation a ensuite permis d'augmenter la base de données avec des missions aussi diverses que réalistes.

L'intérêt s'est ensuite porté sur la modélisation d'une chaîne de traction hybride dans le contexte de son dimensionnement. D'une part, des modèles génériques adimensionnels des composants (moteur thermique, batterie et machine électrique) ont été identifiés et utilisés en considérant une approche par les flux de puissance. D'autre part, des stratégies de gestion de l'énergie « en ligne » indépendantes des valeurs nominales des composants ont été proposées pour les architectures série et parallèle afin de maximiser à chaque instant le rendement de la chaîne de traction. Cette modélisation permet de calculer la consommation du véhicule pour un

profil de mission donné et présente deux avantages : le premier est de s'affranchir d'un choix « a priori » du dimensionnement des composants ; le deuxième est d'offrir un temps d'exécution très rapide rendant possible la simulation du véhicule pour un grand nombre de missions.

Enfin, un algorithme de dimensionnement a été développé afin de choisir les puissances nominales des composants par rapport à la nature de la mission. Cet algorithme teste les combinaisons des composants à la manière d'un plan d'expériences sur un ensemble de missions. Le dimensionnement minimisant la consommation moyenne de carburant est alors considéré comme l'optimum global. Dans un premier temps, nous avons montré que cette méthode de dimensionnement des composants sur un ensemble de missions réalistes est plus « robuste » que la même démarche réalisée sur un cycle de conduite standard unique, même basé sur des mesures. En effet, la modélisation de la mission a permis de générer une grande variété de missions parmi lesquelles certaines sont plus contraignantes que celle ayant servi pour la modélisation. Dans un deuxième temps, l'impact de la mission sur la consommation a été mis en évidence. Les performances obtenues en termes de carburant en fonction du dimensionnement optimal semblent plus sensibles au type de la mission, urbain ou extra-urbain, standard ou basé sur des mesures, qu'à la structure série ou parallèle de la chaîne de traction pour une mission donnée. Comme attendu, le gain en termes de consommation est plus important sur les missions urbaines que sur les missions extra-urbaines. Dans un troisième temps, nous avons noté que la consommation d'une chaîne de traction parallèle pourrait être plus sensible au dimensionnement de ses composants que l'architecture série. Cependant, à dimensionnement donné, la structure parallèle semblerait plus polyvalente par rapport au série. Dans un dernier temps, nous avons vu que l'inclinaison de la route était un paramètre influent sur le dimensionnement et la consommation du véhicule. D'autres paramètres, comme la précision des modèles adimensionnels des composants de la chaîne de traction et l'optimisation de la stratégie de gestion de l'énergie ont assurément un rôle important. Mais nous avons aussi observé que les caractéristiques mécaniques du véhicule, comme la masse du châssis ou son coefficient de frottement aérodynamique, sont des facteurs à prendre en compte dans une étude globale.

Les travaux présentés dans cette thèse permettent de fournir un pré-dimensionnement de la chaîne de traction et doivent être approfondis sur plusieurs aspects pour être réellement opérationnels. Par exemple, le pré-dimensionnement issu de l'algorithme proposé devrait permettre la sélection des composants réels dans une base de données ou permettre la conception de composants dédiés. Le nombre de cellules de la batterie et la disposition en série et parallèle pourraient être déterminés, les convertisseurs de puissance dimensionnés et la tension du bus continu fixée. Ensuite, la durée ou la distance parcourue constitue un paramètre important de la mission qui mériterait d'être intégré au modèle de l'usage du véhicule. Elle doit être clairement définie afin de tenir compte de son impact sur l'énergie demandée à la chaîne de traction et donc sur le dimensionnement de ses composants.

Par ailleurs, les modèles génériques adimensionnels développés pour les composants de la chaîne de traction devraient être évalués par rapport à des modèles plus précis de composants.

Pour cela, la modélisation par flux de puissance devrait être comparée aux modèles dynamiques dédiés à la simulation tels ceux disponibles dans les logiciels PSAT ou Advisor par exemple. Pour un même choix de composants et la même gestion de l'énergie appliquée à un profil de mission donné, une comparaison entre la consommation obtenue par ces logiciels dédiés et celle de notre simulation des flux de puissance permettrait de quantifier plus précisément l'impact des modèles génériques proposés.

Un autre élément d'étude serait la performance de la gestion d'énergie proposée. Nos résultats pourraient être comparés à ceux que fourniraient les stratégies optimales basées sur la programmation dynamique ou la commande optimale. Dans le Chapitre 4, certaines simulations n'ont pas abouti car le profil de mission conduisait la gestion d'énergie à décharger la batterie jusqu'à sa limite de capacité. La stratégie proposée ne permet pas d'anticiper les événements de la mission. Or, la matrice de Markov offre un outil de prévision car, pour un état présent donné de la mission du véhicule, elle contient les probabilités des états futurs. Ainsi, une stratégie de gestion de l'énergie temps réel pourrait être développée en s'appuyant sur les prévisions possibles avec ce modèle de l'usage d'un véhicule. De plus, la matrice de Markov peut être mise à jour en temps réel, ce qui permettrait d'imaginer une stratégie de gestion de l'énergie qui s'adapterait en continu au conducteur du véhicule et à son usage.

Dans cette thèse, nous nous sommes limités à une étude de la consommation de carburant et il serait intéressant de prendre en compte d'autres critères comme le coût de la chaîne de traction et le vieillissement des composants, notamment celui de l'organe de stockage. Cela pourrait s'envisager en étendant le plan d'expérience ou en intégrant un algorithme d'optimisation de type multicritère.

Dans le même ordre d'idée, l'influence de paramètres tels que les coefficients de charge et de décharge de la batterie serait à analyser. Les technologies de ces organes de stockage sont en pleine évolution et leurs limites sont en train d'être repoussées. Cependant, le choix des composants est une affaire de compromis et là où le coefficient de décharge de la batterie peut être augmenté, la durée de vie du composant peut en être réduite ou inversement.

Le stockage d'énergie des véhicules électriques hybrides actuellement commercialisés sur le marché automobile se fait principalement par batteries. Cette technologie pose un certain nombre de problèmes comme l'autonomie, la durée de vie et le poids. Un moyen de répondre à cette problématique consiste à associer deux systèmes de stockage d'énergie électrique, choisis de façon à présenter des caractéristiques complémentaires. Une perspective de cette étude serait donc d'appliquer notre méthode de dimensionnement en prenant en compte d'autres composants comme des supercondensateurs par exemple.

Dans ce mémoire, deux architectures hybrides ont été étudiées : série et parallèle. Une autre perspective serait d'appliquer l'étude à la structure combinée série-parallèle, voire au tout électrique. Cela permettrait d'évaluer les avantages et inconvénients de chacune des structures afin de guider le concepteur dans son choix.

Un autre point à explorer serait d'appliquer l'étude à des véhicules encore plus spécifiques comme un bus, un car, un camion de livraison ou encore un taxi. En effet, notre choix s'est porté sur le véhicule particulier standard ayant servi aux relevés GPS sur des missions au caractère spécifique et avec une variété suffisante pour notre étude. Cependant, il semblerait intéressant d'appliquer la modélisation de Markov sur des missions plus spécifiques de véhicule ou même de nature différente comme celle d'un navire hybride électrique pour s'ouvrir à d'autres domaines.

Par ailleurs, le vent peut aussi avoir une influence notable sur la puissance demandée lors d'un parcours extra-urbain, notamment pour un véhicule ayant un important coefficient de frottement aérodynamique. Une étude de sensibilité de la consommation de carburant vis-à-vis de ce paramètre permettrait d'évaluer son impact sur le dimensionnement de la chaîne de traction. Selon l'importance de son influence, le vent pourrait être intégré à la mission du véhicule par l'intermédiaire d'un modèle stochastique.

Un véhicule hybride est en soit un système complexe où les composants interagissent entre eux. Cette thèse voulait aborder la question du dimensionnement des sources et des organes de stockage d'un point de vue plus global, en y incluant la gestion d'énergie et les variables environnementales du véhicule au travers de son profil de mission {vitesse ; accélération ; inclinaison}. Les travaux décrits dans ce mémoire sont une première réponse à cette question et ouvrent naturellement la voie à de nombreuses améliorations et perspectives.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

98 références bibliographiques

2009/28/CE Directive 2009/28/CE du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables // Journal officiel de l'Union européenne. - 2009.

ADEME Transports - Eléments de Contexte - Contexte et enjeux [En ligne] // Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). - 2012. - www2.ademe.fr.

Adornato Brian [et al.] Characterizing naturalistic driving patterns for plug-in hybrid electric vehicle analysis [Conférence] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). - Dearborn, Michigan, 2009.

Akli Cossi Rockys Conception systémique d'une locomotive hybride autonome. Application à la locomotive hybride de démonstration et d'investigations en énergétique LHyDIE développée par la SNCF [Rapport] : Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse. - 2008.

Allegre Anne-Laure Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides [Rapport] : Thèse de doctorat de l'Université Lille 1. - 2010.

Anderson T. W. et Goodman L. A. Statistical inference about Markov chains [Revue] // Annals of Mathematical Statistics. - 1957. - 1 : Vol. 28. - pp. 89-110.

André Michel Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions - Part A: The ARTEMIS European driving cycles [Rapport] : Report 0411 / INRETS-LTE. - Bron : Report INRETS-LTE 0411, 2004. - INRETS/RR/04-518-ENG.

André Michel Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions - Part B: Driving cycles according to vehicle power [Rapport] : Report 0411 / INRETS-LTE. - Bron : Report INRETS-LTE 0412, 2006. - INRETS/RR/04-518-ENG.

Argonne National Laboratory Argonne TTRDC - Modeling, Simulation & Software - PSAT [En ligne]. - September 2010. - http://www.transportation.anl.gov/modeling_simulation/PSAT/index.html.

Assanis D. [et al.] Optimization approach to hybrid electric propulsion system design [Revue] Journal of Mechanics of Structures and Machines, 1999. - Vol. 27(4).

Autonomie Vehicle Modeling Approaches [En ligne] // Autonomie. - 2011. - http://www.autonomie.net/references/vehicle_mods_25.html.

Barsali Stefano, Miulli Carmine et Possenti Andrea A control strategy to minimize fuel consumption of series hybrid electric vehicles [Revue] // IEEE Transactions on Energy Conversion. - March 2004. - 1 : Vol. 19. - pp. 187-195.

Beretta Joseph Le génie électrique automobile [Livre] Lavoisier Hermes Science, 2005. - p. 341. - Traité EGEM, Série Génie électrique.

Beretta Joseph Motorisation hybride thermique-électrique [Section du livre] Techniques de l'Ingénieur BM2760, 2010.

Bernard Jérôme [et al.] Fuel-Cell Hybrid Powertrain: Toward Minimization of Hydrogen Consumption [Revue] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - September 2009. - 7 : Vol. 58. - pp. 3168-3176.

Bonnans J. F. [et al.] Parametric optimization of hybrid car engines [Revue] // Optimization and Engineering. Springer, 2004. - 4 : Vol. 5. - pp. 395-415.

- Brémaud Pierre** Initiation aux probabilités et aux chaînes de Markov [Livre]. - Berlin : Springer, 2009. - Vol. VIII : p. 308.
- Chan C. C.** The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles [Revue] // Proceedings of the IEEE Journal. - April 2007. - 4 : Vol. 95. - pp. 704-718.
- Chan C. C., Bouscayrol A. et Chen K.** Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles: Architectures and Modeling [Revue] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - February 2010. - 2 : Vol. 59. - pp. 589-598.
- Chanda Soumendu** Powertrain sizing and energy usage adaptation strategy for plug-in hybrid electric vehicles [Rapport] : Master of Science Thesis of the University of Akron. - 2008.
- Chen H., Wu J. and Gao S.** A study of autoregressive conditional heteroscedasticity model in load forecasting [Conference] // International Conference on Power System Technology PowerCon. - Chongqing, China, 2006. - pp. 1-8.
- Crolla D.A. [et al.]** Controller design for hybrid vehicles - state of the art review [Conférence] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. - Harbin, China, 2008.
- Dash P. K., Liew A. C. et Rahman S.** Fuzzy neural network and fuzzy expert system for load forecasting [Revue] // IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution. - 1996. - 1 : Vol. 143. - pp. 106-114.
- Delanoë Jérôme** Analyse prévisionnelle et stochastique des consommations électriques de charges multiples : Application aux systèmes embarqués des véhicules de combat mobiles terrestres [Rapport] : Thèse de doctorat n°503-019 de l'Université de Nantes. - 2008.
- Delprat Sébastien** Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles [Rapport] : Thèse de doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. - 2002.
- Dubray Alexandra** Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi [Rapport] : Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble. - 2002.
- Dupriez-Robin Florian** Dimensionnement d'une propulsion hybride de voilier, basé sur la modélisation par les flux de puissance [Rapport] : Thèse de doctorat n°503-090 de l'Université de Nantes. - 2010.
- Ehsani M., Rahman K. M. et Toliyat H. A.** Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles [Revue] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - February 1997. - 1 : Vol. 44. - pp. 19-27.
- Emadi Ali, Lee Young Joo et Rajashekara Kaushik** Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid electric Vehicles [Revue] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - June 2008. - 6 : Vol. 55. - pp. 2237-2245.
- Fan Hanrong, Dawson G. E. et Eastham T. R.** Model of Electric Vehicle Induction Motor Drive System [Revue] // IEEE Electrical and Computer Engineering. - September 1993. - Vol. 2. - pp. 1045-1048.
- Freyermuth Vincent, Fallas Eric et Rousseau Aymeric** Comparison of powertrain configuration for plug-in HEVs from a fuel economy perspective [Revue] SAE International 2008-01-0461, 2008.
- Gao David Wenzhong, Mi Chris et Emadi Ali** Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles [Revue] // Proceedings of the IEEE. - April 2007. - 4 : Vol. 95. - pp. 729-745.
- Gawthrop P. J. et Bevan G. P.** Bond Graph modeling, a tutorial introduction for control engineers [Article] // IEEE Control Systems magazine. - April 2007. - 2 : Vol. 27. - pp. 24-45.
- Gönen T.** Load forecasting using box-jenkins methodology [Revue] // COMPEL The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. - 1984. - 1 : Vol. 3. - pp. 35-36.

Guibet Jean-Claude Carburants liquides [Section du livre]. - [s.l.] : Techniques de l'Ingénieur BE8545, 1998.

Guzzella L. et Sciarretta A. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to modeling and optimization [Livre] Springer, 2005.

Hanini N. [et al.] Sizing Methodology of EV Drive System Based on Optimal Power Efficiency [Conférence] // SPEEDAM International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. - Ischia, Italy, 2008. - pp. 1043-1048.

Hankache Walid Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible [Rapport] Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.

Ho K. L., Hsu Y. Y. et Yang C. C. Short-term load forecasting using a multilayer neural network with an adaptive learning algorithm [Revue] // IEEE Transaction on Power Systems. - February 1992. - 1 : Vol. 7. - pp. 141-149.

Huang S. R. Short-term load forecasting using threshold autoregressive models [Revue] // IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution. - September 1997. - 5 : Vol. 144. - pp. 477-481.

Hung W.T. [et al.] Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong [Revue] // Transportation Research Part D 12. - 2007. - pp. 115-128.

Ignatova Vanya Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique [Rapport] : Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier. - 2006.

Jaafar Amine [et al.] Sizing of a Hybrid Locomotive Based on Accumulators and Ultracapacitors [Conférence] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. - Lille, France, 2010.

Jaafar Amine Traitement de la mission et des variables environnementales et intégration au processus de conception systémique [Rapport] : Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse. - 2011.

Johannesson Lars, Asbogard Mattias et Egardt Bo Assessing the Potential of Predictive Control for Hybrid Vehicle Powertrains using Stochastic Dynamic Programming [Revue] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. - 2007. - Vol. 8. - pp. 71-83.

Johannesson Lars, Pettersson Stefan et Egardt Bo Predictive energy management of a 4QT series-parallel hybrid electric bus [Revue] Control Engineering Practice 17, 2009. - pp. 1440-1453.

Karbowski Dominik [et al.] "Fair" comparison of powertrain configurations for plug-in hybrid operation using global optimization [Revue] SAE International 2009-01-1334, 2009.

Kareem Y. H. and Majeed A. R. Monthly peak-load demand forecasting for sulaimany governorate using SARIMA [Conference] // Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America TDC'06 IEEE/PES. - Caracas, Venezuela, 2006. - pp. 1-5.

Khaligh Alireza et Li Zhihao Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art [Revue] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - July 2010. - 6 : Vol. 59. - pp. 2806-2814.

Kleimaier A. et Schröder D. Optimization Strategy for Design and Control of a Hybrid Vehicle [Conférence] // Proceedings 6th International Workshop on Advanced Motion Control. - Nagoya, Japan, 2000. - pp. 459-464.

Kolmanovsky Ilya, Siverguina Irina and Lygoe Bob Optimization of powertrain operating policy for feasibility assessment and calibration: Stochastic dynamic programming approach [Conference] // IEEE American Control Conference. - 2002. - Vol. 2. - pp. 1425-1430.

- Lee T. K., Adornato B. et Filipi Z. S.** Synthesis of Real-World Driving Cycles and Their Use for Estimating PHEV Energy Consumption and Charging Opportunities: Case Study for Midwest/U.S. [Revue] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - 2011. - 9 : Vol. 60. - pp. 4153-4163.
- Lhomme Walter** Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur le représentation énergétique macroscopique [Rapport] Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- Lin Chan-Chiao [et al.]** Power management strategy for a parallel hybrid electric truck [Revue]. - [s.l.] : IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003. - 6 : Vol. 11.
- Lin Chan-Chiao, Peng Huei and Grizzle J. W.** A Stochastic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles [Conference] // Proceedings of the American Control Conference. - Boston, Massachusetts : IEEE, 2004. - pp. 4710-4715.
- Lin J. et Niemeier D. A.** Estimating Regional Air Quality Vehicle Emission Inventories: Constructing Robust Driving Cycles [Revue] // Transportation Science. - August 2003. - 3 : Vol. 37. - pp. 330-346.
- Liu Xudong, Wu Yanping et Duan Jianmin** Optimal Sizing of a Series Hybrid Electric Vehicle Using a Hybrid Genetic Algorithm [Conférence] // IEEE International Conference on Automation and Logistics. - Jinan, China, 2007. - pp. 1125-1129.
- Lukic S. M. et Emado A.** Modeling of electric machines for automotive applications using efficiency maps [Conférence] // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. - Chicago, IL, USA : Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, 2003. - pp. 543-550.
- Mbamalu G.A.N. et El-Hawary M.E.** Load forecasting via suboptimal seasonal autoregressive models and iteratively reweighted least squares estimation [Revue] // IEEE Transactions on Power Systems. - February 1993. - 1 : Vol. 8. - pp. 343-348.
- Miègeville Laurence** Contribution à l'analyse prévisionnelle et stochastique des perturbations des réseaux électriques par des charges non linéaires [Rapport] : Thèse de doctorat n°82-384 de l'Université de Nantes. - 1999.
- Mosdale Renaut** Batteries pour véhicules électriques [Section du livre] // Transport électrique routier. Techniques de l'Ingénieur D5565, 2003.
- Multon Bernard** Motorisation des véhicules électriques [Section du livre]. Techniques de l'Ingénieur E3996, 2001.
- Noureddine A. H., Alouani A. T. et Chandrasekaran A.** A new technique for short-term residential electric load forecasting including weather and lifestyle influences [Revue] // Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems. - Août 1992. - Vol. 2. - pp. 1419-1427.
- Nowicka-Zagrajek J. et Weron R.** Modeling electricity loads in California: ARMA models with hyperbolic noise [Revue] // Signal Processing. - December 2002. - 12 : Vol. 82. - pp. 1903-1915.
- Nzisabira Jonathan** Intégration de l'Ecoefficient dans la conception préliminaire des véhicules propres : une approche basée sur l'optimisation multidisciplinaire [Rapport] : Thèse de doctorat de l'Université de Liège. - 2009.
- Opila Daniel F. [et al.]** Performance Comparison of Hybrid Vehicle Energy Management Controllers on Real-World Drive Cycle Data [Conférence] // American Control Conference. - Saint-Louis, USA, 2009.
- Paganelli G. [et al.]** Equivalent Consumption Minimization Strategy for Parallel Hybrid Powertrains [Conférence] // IEEE 55th Vehicular Technology Conference. - Vancouver, Canada, 2002.
- Pérez L. V. [et al.]** Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming [Revue]. Mathematics and Computers in Simulation, 2006. - 1 : Vol. 73. - pp. 244-254.

Peterson Scott B., Apt Jay et Whitacre J. F. Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization [Revue] // Journal of Power Sources. - 2010. - Vol. 195. - pp. 2385-2392.

Pornin Maurice Traction électrique automobile routière [Section du livre] // Réseaux électriques et applications. Techniques de l'Ingénieur D840, 1981.

Rahman Khwaja M. et Schulz Steven E. Design of High-Efficiency and High-Torque-Density Switched Reluctance Motor for Vehicle Propulsion [Revue] // IEEE Transactions on Industry Applications. - November/December 2002. - 6 : Vol. 38. - pp. 1500-1507.

Rahman S. et Hazim O. A generalized knowledge-based short-term load-forecasting technique [Revue] // IEEE Transactions on Power Systems. - May 1993. - 2 : Vol. 8. - pp. 508-514.

Rahman Z., Butler K.L. et Ehsani M. A comparison study between two parallel hybrid control concepts [Revue] SAE International 2000-01-0994, 2000.

Rahman Z., Butler K.L. et Ehsani M. A study of design issues on electrically peaking hybrid electric vehicle for diverse urban driving patterns [Revue]. SAE International 1999-01-1151, 1999.

Rahman Z., Butler K.L. et Ehsani M. Designing parallel hybrid electric vehicles using V-ELPH 2.01 [Conférence] // Proceedings of the American Control Conference. - San Diego, California : IEEE, 1999. - pp. 2693-2697.

Ravey Alexandre [et al.] Energy Sources Sizing for Hybrid Fuel Cell Vehicles Based on Statistical Description of Driving Cycles [Conférence] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. - Lille, France, 2010. - pp. 1-6.

Rousseau Grégory Véhicule hybride et commande optimale [Rapport] : Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris. - 2008.

Salmasi F. R. Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends [Revue] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - 2007. - 5 : Vol. 56. - pp. 2393-2404.

Schwarz Virginie et Gindroz Bernard Dossier Stockage de l'Energie [En ligne]. - ADEME, 2005. - juin 2011. - http://www.mines-energie.org/Dossiers/Stock2005_15.pdf.

Schwarzer Volker, Ghorbani Reza et Rocheleau Richard Drive Cycle Generation for Stochastic Optimization of Energy Management Controller for Hybrid Vehicles [Conférence] // IEEE Multi-Conference on Systems and Control. - Yokohama, Japan, 2010. - pp. 536-540.

Scordia Julien Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides [Rapport] : Thèse de doctorat / Université Henri Poincaré. - Nancy, 2004.

Sinoquet Delphine, Rousseau Gregory et Milhau Yohan Design optimization and optimal control for hybrid vehicles [Revue] // Optimization and Engineering. Springer, 2011. - 1 : Vol. 12. - pp. 199-213.

Smith Kandler et Wang Chao-Yang Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles [Revue] // Journal of Power Sources, Elsevier, 2006. - 1 : Vol. 160. - pp. 662-673.

Sorin Fabrice, Broussard Lionel et Roblin Pierre Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones [Section du livre] Techniques de l'Ingénieur S7582, 2001.

Souffran Gwenaëlle [et al.] Modélisation par matrice de Markov de la puissance consommée par un véhicule terrestre [Conférence] // Electronique de Puissance du Futur. - St Nazaire, 2010.

Souffran Gwenaëlle, Miègeville Laurence et Guérin Patrick Power Sources Sizing for Hybrid Vehicles Based on a Stochastic Modeling of Driving Missions [Conférence] // Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE). - Leiria, Portugal, 2011a. - pp. 1-7.

Souffran Gwenaëlle, Miègeville Laurence et Guérin Patrick Simulation of real-world vehicle missions using a stochastic Markov model for optimal design purposes [Conférence] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). - Chicago, IL, 2011b. - pp. 1 - 6.

Souffran Gwenaëlle, Miègeville Laurence et Guérin Patrick Simulation of Real-world Vehicle Missions using a Stochastic Markov Model for Optimal Powertrain Sizing [Revue] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - Published to IEEE Xplore: Jun 28 2012.

Sun Liqing [et al.] State-of-art of Energy System for New Energy Vehicles [Conférence] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). - Harbin, China, 2008.

Tara Ehsan [et al.] Battery storage sizing in a retrofitted plug-in hybrid electric vehicle [Revue] IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010. - 6 : Vol. 59.

Trigui R. Approche systémique pour la modélisation, la gestion d'énergie et l'aide au dimensionnement des véhicules hybrides thermiques électriques [Rapport] : HDR de l'Université Lille1, LTE-IFSTTAR, dans le cadre du réseau MEGEVH. - 2011.

Trigui R., Jeanneret B. et Badin F. Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques. Construction de la bibliothèque de modèles VEHLIB [Revue] Recherche et Transport Sécurité (RTS), 2004. - Vol. 83. - pp. 129-150.

Wang Zhancheng [et al.] Particle swarm optimization for operational parameters of series hybrid electric vehicle [Conference] // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. - Kunming, 2006. - pp. 682-688.

Wipke K.B., Cuddy M.R. et Burch S.D. ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach [Revue] IEEE Transactions on Vehicular Technology, Special Issues on Hybrid and Electric Vehicles, 1999. - 6 : Vol. 48. - pp. 1751-1761.

Wu Bin [et al.] Optimisation of power management strategies for a hydraulic hybrid medium truck [Conférence] // Proceedings of the 2002 Advanced Vehicle Control Conference. - Hiroshima, Japan, 2002.

Wu Xiaolan [et al.] Component sizing optimization of plug-in hybrid electric vehicles [Revue] Applied energy, 2011. - Vol. 88. - pp. 799-804.

www.dieselnet.com Emission Test Cycles [En ligne] // DieselNet. - 2009. - <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/>.

Zhengli Zhu, Jianwu Zhang et Chengliang Yin Optimization approach for hybrid electric vehicle powertrain design [Revue] Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005. - 1 : Vol. 18.

ANNEXES

ANNEXES 189
Annexe A	Etude de sensibilité à l'inclinaison de la route191
Annexe B	Validation de la conservation de la corrélation entre les variables d'une mission192
Annexe C	Caractéristiques techniques du GPS Garmin eTrex HC193
Annexe D	Traitement des mesures194
Annexe E	Composants de la base de données PSAT.....196
Annexe F	Dimensionnements pour la structure série197
Annexe G	Dimensionnements pour la structure parallèle207

Cette annexe issue de (Souffran, et al., 2012) présente une brève analyse de la sensibilité de la pente de la route α en fonction de la vitesse v du véhicule. La littérature montre en effet que α est un facteur trop souvent négligé dans les études utilisant les cycles standards. Par exemple, les cycles européens NEDC effectués sur une route plate ne tiennent pas compte de l'influence de la pente de la route sur les tests de performance des véhicules. Or, il est naturel de penser que la consommation de carburant et les émissions de polluants varient selon que le trajet parcouru est plat, légèrement en pente ou fortement incliné comme en montagne.

Afin d'évaluer l'impact réel de la pente sur le dimensionnement de la chaîne de traction, la puissance demandée au niveau des roues a été étudiée en fonction de la vitesse du véhicule pour un certain nombre de pentes différentes, comme illustré dans la Figure A.1. Pour rappel, les équations mécaniques du véhicule sont les suivantes :

$$F_{tot} = 1/2 \times \rho \times A_f \times C_w \times v^2 + m \times g \times C_r \times \cos \alpha + m \times g \times \sin \alpha + m \times \lambda \times dv/dt \quad (A.1)$$

$$p_{roues} = v \times F_{tot} \quad (A.2)$$

Les calculs ont été effectués pour les spécifications du véhicule indiquées dans le Tableau 2.1. On peut aisément imaginé que la pente de la route aura un impact plus fort pour des véhicules dont la masse serait plus élevée comme les 4x4, les camionnettes ou les poids lourds.

D'après la Figure A.1a, l'erreur relative sur la puissance requise avec une pente de 3% est supérieure à 150% pour des vitesses faibles. Plus les vitesses sont élevées, plus l'erreur relative diminue car la force aérodynamique devient prépondérante sur les forces dues à l'inclinaison. Ainsi, pour une valeur maximale de 120 km/h, l'erreur commise sur l'évaluation de la puissance est réduite à moins de 55%. Pour cette même vitesse, une légère pente de 1% implique une augmentation non négligeable de la puissance demandée aux roues d'environ 5 kW par rapport à une pente nulle d'après la Figure A.1b. Une telle différence de niveau de puissance, même pour une route faiblement inclinée permet de conclure que l'impact de la pente ne peut pas être négligé pour un problème de dimensionnement. Ainsi, il est utile d'intégrer le paramètre α dans la définition de la mission du véhicule utilisée comme donnée d'entrée dans le processus de dimensionnement.

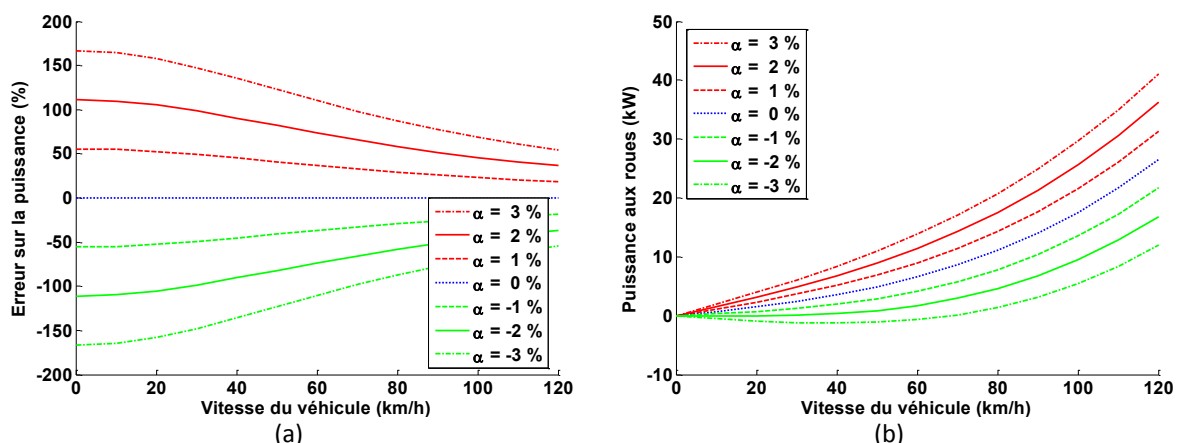


Figure A.1 Analyse de sensibilité de la puissance à l'inclinaison de la route en fonction de la vitesse du véhicule :
(a) Erreur relative – (b) Puissance aux roues

ANNEXE B VALIDATION DE LA CONSERVATION DE LA CORRELATION ENTRE LES VARIABLES D'UNE MISSION

L'étude issue de (Souffran, et al., 2012) présente dans cette annexe la validation de la conservation par la modélisation de Markov de la corrélation entre les variables de la mission d'un véhicule. D'une part, la Figure B.1a illustre la dispersion de l'accélération en fonction de la vitesse. L'accélération ou la décélération est d'autant plus grande que la vitesse est faible. Puis, lorsque la vitesse augmente, l'accélération ou la décélération diminue avec une faible dispersion. D'autre part, la Figure B.2a montre que l'accélération est réduite sur des routes à forte pente, ce qui signifie que le conducteur est amené à maintenir une vitesse constante. A l'inverse, un plus grand nombre d'accélération et de décélération sont observables sur des routes plates, voire à forte déclivité.

Afin de vérifier que la corrélation entre les variables a bien été conservée par le modèle de Markov, les Figures B.1b et B.2b présentent la dispersion des variables d'une mission simulée. Ces figures permettent, dans un premier temps, de valider la bonne adéquation entre la mesure et la simulation. Dans un deuxième temps, la corrélation des variables mesurées est correctement conservée dans la simulation. Ainsi, un cycle de conduite simulée à partir de la matrice de Markov peut être considéré comme un support fiable et bien représentatif des enregistrements.

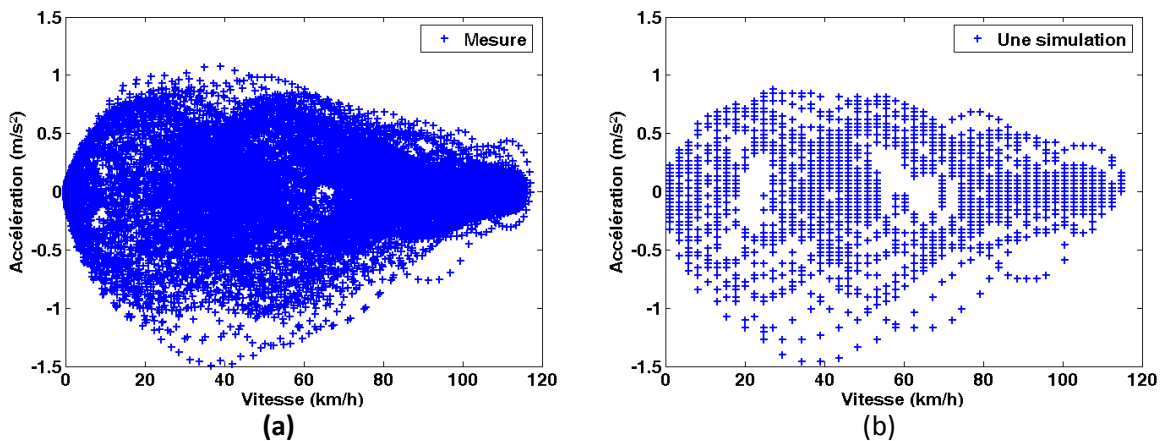


Figure B.1 Corrélation entre l'accélération et la vitesse: (a) Mesure, (b) Un exemple de simulation

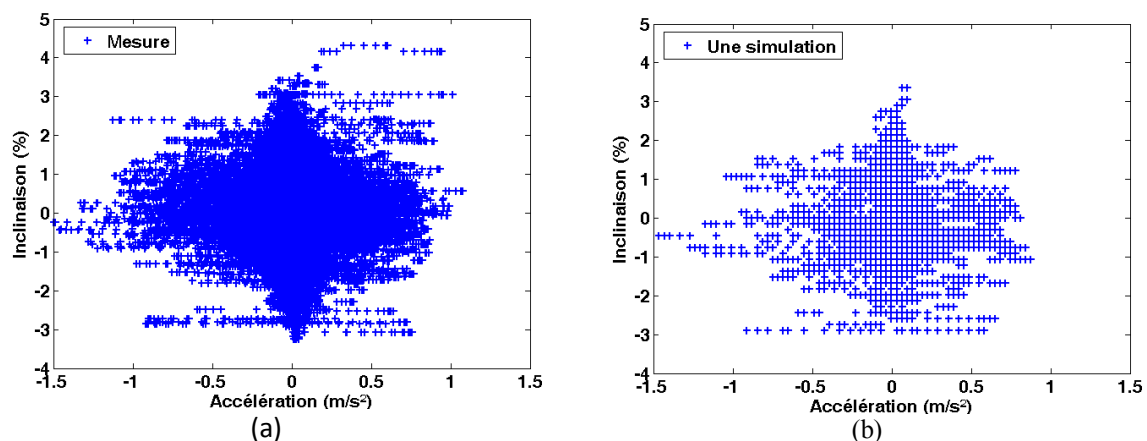


Figure B.2 Corrélation entre l'inclinaison et l'accélération : (a) Mesure, (b) Un exemple de simulation

ANNEXE

Caractéristiques techniques

Caractéristiques physiques

Dimensions : 107 H x 56 L x 30 P mm

Poids : 159 g avec les piles en place.

Affichage : écran TFT (176 x 220 pixels) transréflectif rétroéclairé 1,3 po larg. x 1,7 po haut., 256 couleurs, haute résolution.

Boîtier : robuste, avec joint d'étanchéité, résistant à l'eau, IEC-529, IPX7

Temp : -15 à 70 °C*

*La température de fonctionnement de l'eTrex peut être supérieure au seuil de température de certaines piles. Certaines piles peuvent éclater sous haute température.

Performances

Récepteur : WAAS/EGNOS activé

Temps d'acquisition : (approx.)

Démarrage à chaud : 3 secondes

Démarrage à température moyenne : < 33 secondes

Démarrage à froid : < 39 secondes

Taux de mise à jour : 1/seconde, continu

Antenne : Plaque intégrée

Compas : (Vista HCx/Summit HC uniquement) Précision : +/- 5 degrés ; résolution : 1 degré, étalonnée par l'utilisateur

Altimètre : (Vista HCx/Summit HC uniquement) Précision : +/- 3 m ; résolution : 30 cm, étalonné par l'utilisateur

Source

Source : deux piles AA 1,5 V, câble adaptateur 12 V c.c. ou adaptateur PC/USB

Autonomie : jusqu'à 25 heures pour les appareils HCx jusqu'à 14 heures pour les appareils HC

Précision

GPS : <10 mètres 95 % type*

*Soumis à une dégradation de la précision de 100 m 2DRMS en vertu du programme américain de disponibilité sélective imposé par le Département de la Défense (E.-U.) une fois activé.

GPS différentiel : <3 mètres 95 % type*

*Précision WAAS (Wide Area Augmentation System) en Amérique du Nord.

Vitesse : 0,1 m/s à l'état stable

Interfaces : exclusifs Garmin (USB)

Durée de vie des données stockées : indéfinie ; aucune pile de mémoire requise

Stockage de cartes : appareils HCx -Selon la capacité formatée de la carte microSD.
Appareils HC : 24 Mo

Le GPS Garmin eTrex HC permet d'obtenir les profils de vitesse et d'altitude. A partir du profil de vitesse présenté en Figure D.1, le profil d'accélération en est déduit après filtrage et dérivation (Figure D.2). Le filtrage, de type « filtfilt » disponible sous Matlab, n'introduit pas de déphasage puisque le profil est filtré une première fois puis inversé pour être filtré une nouvelle fois en sens inverse.

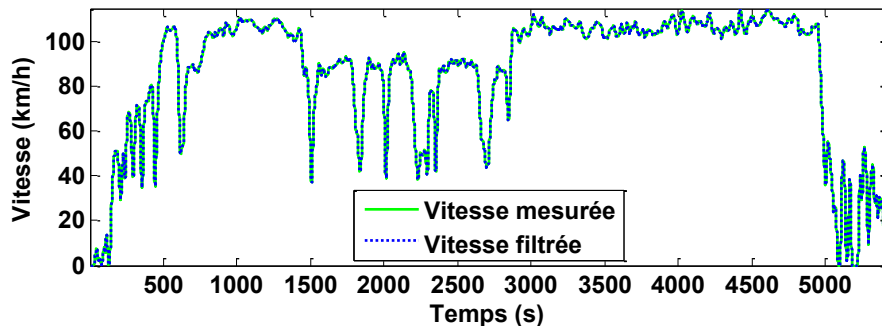


Figure D.1 Profil de la vitesse

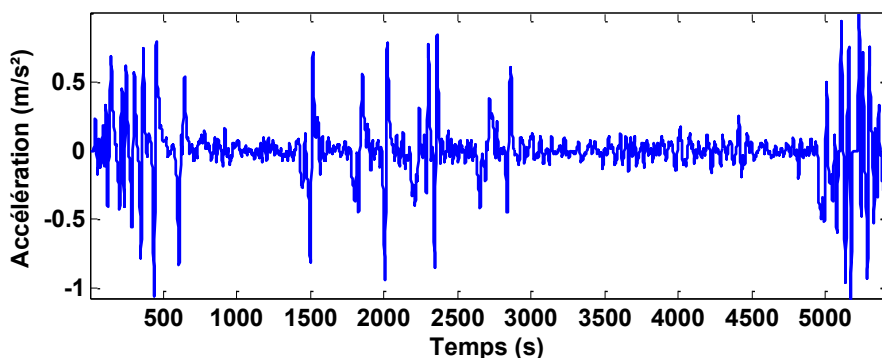


Figure D.2 Profil de l'accélération

Le profil d'inclinaison est obtenu à partir du relevé de l'altitude. Dans un premier temps, ce profil d'altitude temporel, dont un exemple est présenté en Figure D.3, est converti en fonction de la distance parcourue (les arrêts du véhicule étant supprimés) et visible en Figure D.4. Une interpolation de l'altitude tous les cent mètres a été effectuée, permettant d'en déduire l'inclinaison de la route en pourcent présentée en Figure D.5. Un filtrage « filtfilt » est appliqué à cette inclinaison, puis celle-ci est transposée en temporel comme illustré en Figure D.6.

Il est possible d'obtenir directement le profil d'inclinaison de la route à partir d'une antenne X-loc. Cette antenne permet de récupérer la trame NMEA (protocole de données GPS standard) correspondante. Cependant cette antenne nécessite d'embarquer une station d'enregistrement et l'alimentation correspondante dans le véhicule, ce qui est plus contraignant.

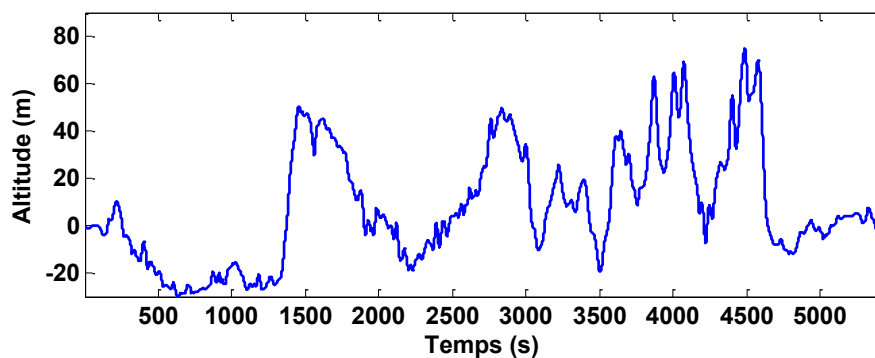


Figure D.3 Profil temporel de l'altitude

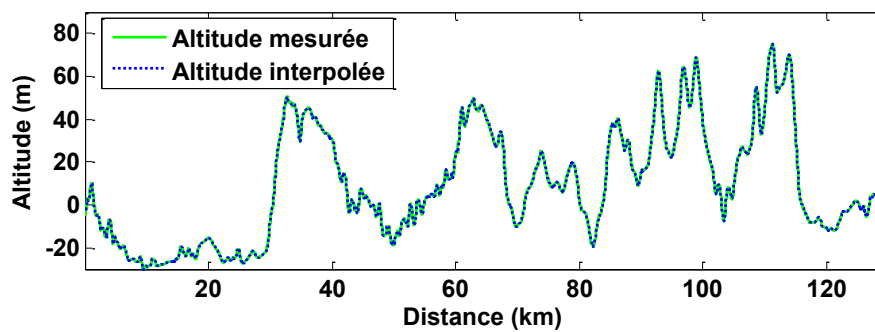


Figure D.4 Profil de l'altitude en fonction de la distance parcourue

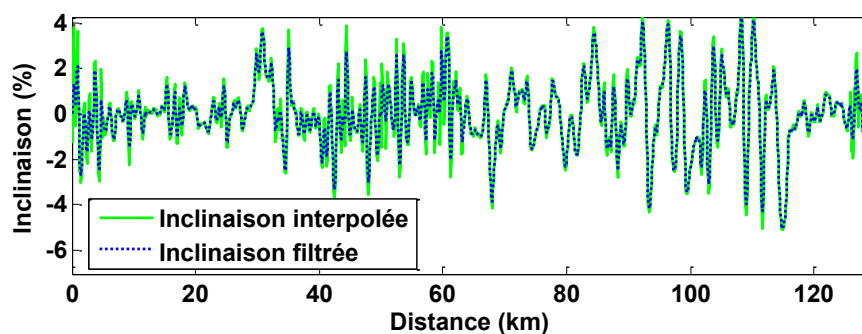


Figure D.5 Profil de l'inclinaison de la route en fonction de la distance parcourue

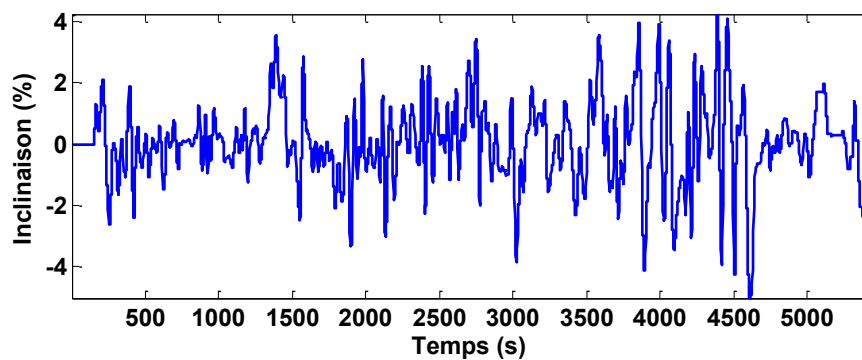


Figure D.6 Profil temporel de l'inclinaison de la route

ANNEXE E COMPOSANTS DE LA BASE DE DONNEES PSAT

Base de données PSAT version 6.2 SP1

Annexe E.1 Machines électriques

N°	Type	Puissance nominale (kW)	Puissance maximale (kW)	Véhicule
1	MSAP	7	14,2	Accord
2	MSAP	7	15	Prius
3	MSAP	10	10	Insight
4	MSAP	17	33	Escape MG2
5	MSAP	25	50	Prius
6	MSAP	32	45	
7	MSAP	33	65	Escape MG1
8	MSAP	35	70	
9	MSAP	36	75	
10	MSAP	49	49	Honda
11	MSAP	55	100	
12	MSAP	55	105	
13	MSAP	58	58	

Annexe E.2 Moteurs thermiques

N°	Type	Cylindrée (l)	Puissance (kW)	Véhicule
1	Diesel	1,7	75	Mercedes Classe A
2	Diesel	1,7	75	Mercedes Classe A
3	Diesel	1,8	75	
4	Diesel	1,8	75	
5	TDI	1,9	66	Volkswagen
6	Diesel	1,9	60	
7	TDI	1,9	67	Volkswagen
8	Diesel	1,9	110	General Motor
9	HDI	2	81	PSA
10	CIDI	2,2	92	Mercedes OM611
11	TDI	2,5	88	Audi

Annexe E.3 Moteurs thermiques pour le groupe électrogène

N°	Type	Cylindrée (l)	Puissance (kW)	Véhicule
1	Diesel	10,8	246	Cummins
2	Diesel	12	321	Caterpillar
3	Diesel	15	324	Caterpillar

ANNEXE F DIMENSIONNEMENTS POUR LA STRUCTURE SERIE

Annexe F.1 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission ECE (800s)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2		3,04	2,96	2,93	2,92	2,92	2,92	2,92	2,93	2,93	2,94	2,97	2,98	2,99	3,00
3		3,01	2,95	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,93	2,94	2,94	2,98	2,99	3,00	3,00
4		2,97	2,92	2,90	2,90	2,90	2,91	2,91	2,92	2,93	2,93	2,97	2,98	2,99	3,00
5		2,94	2,90	2,89	2,89	2,90	2,90	2,91	2,92	2,93	2,96	2,97	2,98	2,99	3,00
6		2,90	2,88	2,88	2,88	2,89	2,89	2,90	2,91	2,92	2,96	2,97	2,98	2,99	3,00
7		2,87	2,86	2,87	2,87	2,88	2,89	2,90	2,91	2,92	2,95	2,96	2,97	2,98	2,99
8	2,94	2,84	2,85	2,85	2,86	2,87	2,89	2,89	2,90	2,94	2,95	2,96	2,97	2,98	2,99
9	3,05	2,81	2,83	2,84	2,85	2,87	2,88	2,89	2,90	2,94	2,95	2,96	2,97	2,98	2,99
10	3,05	2,80	2,81	2,83	2,84	2,86	2,87	2,89	2,90	2,94	2,95	2,96	2,97	2,98	2,99
11	3,05	2,88	2,80	2,82	2,84	2,85	2,87	2,88	2,92	2,93	2,95	2,96	2,97	2,98	2,99
12	3,04	2,91	2,78	2,81	2,83	2,84	2,86	2,87	2,92	2,93	2,94	2,95	2,97	2,98	2,99
13	3,03	2,93	2,83	2,79	2,82	2,84	2,85	2,87	2,91	2,93	2,94	2,95	2,96	2,98	2,99
14	3,04	3,01	2,84	2,78	2,80	2,83	2,85	2,89	2,91	2,92	2,93	2,95	2,96	2,97	2,99
15	3,19	3,02	2,86	2,77	2,79	2,82	2,84	2,88	2,90	2,92	2,93	2,95	2,96	2,97	2,98
16	3,20	3,01	2,87	2,82	2,79	2,81	2,83	2,88	2,90	2,91	2,92	2,94	2,95	2,97	2,98
17	3,21	3,01	2,87	2,83	2,77	2,80	2,85	2,87	2,89	2,90	2,92	2,94	2,95	2,96	2,98
18	3,23	3,01	2,94	2,84	2,77	2,79	2,84	2,87	2,88	2,90	2,92	2,93	2,95	2,96	2,98
19	3,25	3,03	2,96	2,85	2,81	2,78	2,84	2,86	2,88	2,90	2,91	2,93	2,94	2,96	2,97
20	3,26	3,04	2,98	2,86	2,82	2,80	2,83	2,85	2,87	2,89	2,91	2,93	2,94	2,96	2,97
21	3,27	3,05	3,01	2,92	2,84	2,81	2,82	2,85	2,87	2,89	2,91	2,92	2,94	2,95	2,97
22	3,28	3,05	3,03	2,91	2,84	2,85	2,82	2,84	2,86	2,89	2,90	2,92	2,94	2,95	2,97
23	3,29	3,05	3,04	2,93	2,88	2,86	2,82	2,84	2,86	2,88	2,90	2,92	2,93	2,95	2,97
24	3,30	3,06	3,05	2,94	2,88	2,87	2,85	2,83	2,86	2,88	2,90	2,92	2,94	2,95	2,97
25	3,33	3,08	3,06	2,95	2,94	2,88	2,86	2,83	2,85	2,87	2,89	2,92	2,93	2,95	2,97
26	3,37	3,09	3,07	3,01	2,95	2,88	2,87	2,83	2,85	2,87	2,89	2,91	2,93	2,94	2,97
27	3,39	3,09	3,08	3,03	2,95	2,88	2,87	2,87	2,84	2,86	2,88	2,91	2,93	2,94	2,95
28	3,40	3,10	3,09	3,04	2,95	2,91	2,88	2,87	2,84	2,86	2,89	2,90	2,92	2,94	2,95
29	3,41	3,10	3,13	3,05	2,96	2,94	2,89	2,87	2,85	2,86	2,88	2,90	2,92	2,94	2,96
30	3,43	3,11	3,14	3,06	2,97	2,95	2,89	2,88	2,88	2,86	2,88	2,89	2,92	2,94	2,95
31	3,45	3,12	3,15	3,07	3,00	2,95	2,90	2,89	2,88	2,86	2,87	2,89	2,91	2,93	2,95
32	3,46	3,15	3,16	3,08	3,02	2,96	2,93	2,89	2,89	2,88	2,87	2,89	2,91	2,93	2,95
33	3,47	3,16	3,17	3,09	3,03	2,96	2,95	2,90	2,91	2,90	2,87	2,88	2,91	2,93	2,95
34	3,50	3,17	3,18	3,09	3,04	2,97	2,95	2,91	2,91	2,90	2,87	2,89	2,91	2,93	2,94
35	3,54	3,19	3,19	3,11	3,05	2,97	2,96	2,92	2,91	2,90	2,89	2,88	2,90	2,92	2,94
36	3,56	3,20	3,20	3,12	3,06	2,98	2,97	2,94	2,91	2,91	2,91	2,88	2,90	2,92	2,94
37	3,58	3,20	3,21	3,13	3,07	3,01	2,97	2,96	2,91	2,92	2,91	2,90	2,90	2,92	2,94
38	3,59	3,20	3,23	3,13	3,08	3,03	2,98	2,96	2,92	2,92	2,91	2,91	2,89	2,92	2,94
39	3,61	3,34	3,23	3,14	3,09	3,05	2,98	2,97	2,92	2,93	2,92	2,93	2,90	2,92	2,94
40	3,66	3,37	3,26	3,15	3,10	3,06	2,98	2,97	2,95	2,93	2,93	2,92	2,93	2,90	2,93
41	3,65	3,39	3,27	3,17	3,11	3,06	2,99	2,98	2,97	2,93	2,94	2,93	2,93	2,91	2,93
42	3,68	3,41	3,28	3,18	3,12	3,07	3,00	2,98	2,98	2,94	2,94	2,93	2,94	2,92	2,92
43	3,70	3,42	3,29	3,20	3,13	3,09	3,04	2,99	2,99	2,94	2,94	2,94	2,95	2,94	2,92
44	3,71	3,45	3,29	3,21	3,14	3,09	3,05	2,99	2,99	2,97	2,94	2,95	2,94	2,96	2,93
45	3,74	3,44	3,30	3,22	3,15	3,10	3,06	2,99	2,99	2,98	2,94	2,95	2,94	2,95	2,95
46	3,74	3,47	3,32	3,23	3,15	3,10	3,07	3,00	2,99	3,00	2,95	2,96	2,96	2,95	2,96
47	3,79	3,46	3,32	3,25	3,16	3,12	3,08	3,02	3,00	2,99	2,96	2,96	2,97	2,96	2,98
48	3,80	3,49	3,33	3,25	3,18	3,13	3,09	3,03	3,01	3,00	2,99	2,96	2,96	2,96	2,97
49	3,82	3,48	3,35	3,27	3,17	3,14	3,10	3,05	3,00	3,01	3,00	2,97	2,97	2,97	2,96
50	3,84	3,50	3,36	3,28	3,19	3,14	3,11	3,07	3,02	3,01	3,01	2,97	2,98	2,97	2,97

Annexe F.2 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission EUDC (390s)

P _{ge} (kW)	E _{bat} (kWh)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
9				4,11	4,07	4,05	4,04	4,03	4,03	4,03	4,03	4,05	4,05	4,06	4,06
10				4,09	4,05	4,03	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,04	4,05	4,05	4,06
11				4,07	4,04	4,02	4,02	4,01	4,01	4,02	4,03	4,04	4,04	4,05	4,06
12				4,06	4,03	4,02	4,01	4,01	4,01	4,01	4,03	4,03	4,04	4,05	4,05
13				4,04	4,02	4,01	4,00	4,00	4,01	4,01	4,03	4,03	4,04	4,05	4,05
14				4,09	4,02	4,01	4,00	4,00	4,00	4,02	4,02	4,03	4,04	4,05	4,05
15				4,07	4,01	4,00	3,99	3,99	3,99	4,00	4,02	4,02	4,03	4,04	4,05
16				4,05	4,00	3,99	3,98	3,98	3,99	3,99	4,01	4,02	4,03	4,04	4,05
17				4,03	3,98	3,97	3,97	3,98	3,98	4,00	4,01	4,02	4,03	4,04	4,05
18				4,01	3,97	3,96	3,97	3,97	3,98	4,00	4,01	4,02	4,02	4,03	4,04
19				4,00	3,95	3,95	3,95	3,96	3,97	3,99	4,00	4,01	4,02	4,03	4,04
20				3,98	3,93	3,94	3,95	3,95	3,97	3,98	3,99	4,00	4,02	4,02	4,03
21				3,97	3,92	3,93	3,94	3,95	3,97	3,98	3,99	4,00	4,01	4,02	4,03
22				3,96	3,91	3,92	3,93	3,94	3,96	3,97	3,99	4,00	4,01	4,02	4,03
23				3,94	3,90	3,91	3,92	3,95	3,96	3,97	3,98	3,99	4,00	4,01	4,02
24		4,04	3,93	3,90	3,90	3,91	3,94	3,95	3,97	3,98	3,99	4,00	4,01	4,02	4,03
25		4,03	3,93	3,89	3,89	3,91	3,93	3,95	3,96	3,97	3,98	4,00	4,01	4,02	4,03
26		4,01	3,92	3,88	3,88	3,91	3,93	3,94	3,96	3,97	3,98	3,99	4,01	4,01	4,03
27		4,01	3,91	3,88	3,87	3,90	3,92	3,94	3,95	3,96	3,98	3,99	4,00	4,01	4,03
28		4,22	3,90	3,87	3,87	3,89	3,91	3,93	3,95	3,96	3,98	3,99	4,00	4,01	4,02
29		4,24	4,22	3,87	3,87	3,89	3,91	3,92	3,94	3,96	3,97	3,98	4,00	4,01	4,02
30		4,27	4,23	3,86	3,87	3,88	3,90	3,92	3,94	3,95	3,97	3,98	3,99	4,01	4,02
31		4,29	4,18	4,18	3,87	3,87	3,90	3,91	3,93	3,95	3,96	3,98	3,99	4,00	4,02
32		4,29	4,19	4,22	3,87	3,86	3,89	3,91	3,93	3,95	3,96	3,98	3,99	4,00	4,02
33		4,28	4,20	4,22	3,87	3,87	3,88	3,90	3,92	3,94	3,96	3,97	3,99	4,00	4,02
34		4,27	4,19	4,17	3,86	3,86	3,88	3,90	3,92	3,94	3,95	3,97	3,99	4,00	4,01
35	4,39	4,28	4,21	4,17	4,15	3,86	3,87	3,90	3,91	3,93	3,95	3,96	3,98	3,99	4,01
36	4,38	4,26	4,22	4,17	4,16	3,86	3,86	3,89	3,91	3,93	3,94	3,96	3,98	3,99	4,01
37	4,40	4,27	4,22	4,17	4,22	3,86	3,86	3,88	3,91	3,92	3,94	3,96	3,98	3,99	4,01
38	4,39	4,28	4,22	4,18	4,21	3,86	3,86	3,88	3,90	3,92	3,94	3,96	3,97	3,99	4,01
39	4,39	4,28	4,22	4,19	4,20	4,10	3,85	3,87	3,89	3,92	3,94	3,96	3,97	3,99	4,00
40	4,40	4,28	4,23	4,19	4,20	4,14	3,85	3,87	3,89	3,91	3,93	3,95	3,97	3,98	4,00
41	4,40	4,27	4,23	4,19	4,21	4,24	3,84	3,86	3,89	3,91	3,93	3,95	3,96	3,98	4,00
42	4,41	4,28	4,23	4,20	4,21	4,25	3,85	3,86	3,88	3,91	3,93	3,94	3,96	3,98	3,99
43	4,42	4,28	4,22	4,20	4,20	4,26	4,08	3,86	3,88	3,90	3,93	3,94	3,96	3,98	3,99
44	4,41	4,28	4,22	4,19	4,22	4,26	4,12	3,86	3,87	3,89	3,92	3,94	3,96	3,98	3,99
45	4,42	4,28	4,22	4,20	4,22	4,26	4,14	3,86	3,86	3,89	3,91	3,94	3,95	3,97	3,99
46	4,44	4,29	4,24	4,21	4,22	4,27	4,22	4,04	3,86	3,89	3,91	3,94	3,95	3,97	3,99
47	4,44	4,28	4,24	4,21	4,22	4,26	4,26	4,07	4,03	3,88	3,91	3,93	3,95	3,97	3,99
48	4,44	4,29	4,24	4,22	4,23	4,26	4,30	4,08	4,05	3,88	3,91	3,93	3,95	3,97	3,99
49	4,46	4,28	4,25	4,22	4,25	4,26	4,30	4,15	3,88	3,89	3,90	3,93	3,94	3,96	3,98
50	4,47	4,30	4,24	4,23	4,25	4,27	4,31	4,16	4,05	4,03	3,90	3,92	3,94	3,96	3,98

Annexe F.3 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission NEDC (1180s)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4				▲ 3,85	▲ 3,79	▲ 3,76	▲ 3,75	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,77	▲ 3,78
5				▲ 3,84	▲ 3,78	▲ 3,75	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,73	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,76	▲ 3,77	▲ 3,78
6				▲ 3,80	▲ 3,76	▲ 3,74	▲ 3,73	● 3,73	● 3,73	▲ 3,73	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,76	▲ 3,77	▲ 3,78
7				▲ 3,78	▲ 3,75	▲ 3,73	● 3,73	● 3,73	● 3,73	● 3,73	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,76	▲ 3,77	▲ 3,77
8				▲ 3,77	▲ 3,74	● 3,73	● 3,72	● 3,72	● 3,72	● 3,73	● 3,73	▲ 3,75	▲ 3,76	▲ 3,77	▲ 3,77
9				▲ 3,75	● 3,73	● 3,72	● 3,72	● 3,72	● 3,72	● 3,72	● 3,73	▲ 3,75	▲ 3,76	▲ 3,77	▲ 3,77
10				● 3,73	● 3,71	● 3,71	● 3,71	● 3,71	● 3,71	● 3,72	● 3,72	▲ 3,75	▲ 3,75	▲ 3,76	▲ 3,77
11				● 3,72	● 3,70	● 3,70	● 3,70	● 3,70	● 3,71	● 3,71	▲ 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76	▲ 3,77
12				● 3,70	● 3,69	● 3,69	● 3,69	● 3,70	● 3,70	● 3,71	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76	▲ 3,77
13				● 3,69	● 3,68	● 3,68	● 3,68	● 3,69	● 3,70	● 3,71	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76	▲ 3,77
14			▲ 3,80	▲ 3,76	● 3,67	● 3,67	● 3,68	● 3,69	● 3,70	● 3,72	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76	▲ 3,76
15			▲ 3,79	▲ 3,76	▲ 3,76	● 3,66	● 3,67	● 3,68	● 3,69	● 3,71	● 3,72	▲ 3,74	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76
16			▲ 3,78	▲ 3,76	▲ 3,75	● 3,66	● 3,67	● 3,68	● 3,69	● 3,71	● 3,72	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76
17			▲ 3,77	▲ 3,75	▲ 3,75	▲ 3,76	● 3,66	● 3,67	● 3,70	● 3,71	● 3,72	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76
18			▲ 3,77	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,75	● 3,65	● 3,67	● 3,69	● 3,70	● 3,72	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76
19			▲ 3,75	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,77	● 3,66	● 3,68	● 3,70	● 3,71	● 3,72	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75
20			▲ 3,89	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,76	▲ 3,79	● 3,68	● 3,69	● 3,71	● 3,72	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75
21			▲ 3,88	● 3,72	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,77	▲ 3,79	● 3,67	● 3,69	● 3,70	● 3,71	● 3,73	▲ 3,74	▲ 3,75
22			▲ 3,88	● 3,72	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,77	▲ 3,80	● 3,80	● 3,69	● 3,70	● 3,71	● 3,72	▲ 3,74	▲ 3,75
23			▲ 3,87	▲ 3,87	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,78	▲ 3,80	▲ 3,81	▲ 3,78	● 3,69	● 3,71	● 3,72	● 3,73	▲ 3,74
24		▲ 3,90	▲ 3,87	▲ 3,88	▲ 3,74	▲ 3,75	▲ 3,79	▲ 3,80	▲ 3,82	▲ 3,81	● 3,69	● 3,70	● 3,72	● 3,73	▲ 3,74
25		▲ 3,89	▲ 3,87	▲ 3,88	● 3,73	▲ 3,75	▲ 3,79	▲ 3,80	▲ 3,82	▲ 3,82	▲ 3,79	● 3,70	● 3,71	● 3,73	▲ 3,74
26		▲ 3,89	▲ 3,87	▲ 3,88	● 3,73	▲ 3,77	▲ 3,79	▲ 3,81	▲ 3,82	▲ 3,83	▲ 3,82	▲ 3,79	● 3,71	● 3,72	▲ 3,74
27		▲ 3,89	▲ 3,87	▲ 3,88	● 3,72	▲ 3,77	▲ 3,79	▲ 3,81	▲ 3,82	▲ 3,84	▲ 3,83	▲ 3,81	● 3,71	● 3,72	▲ 3,73
28		▲ 3,89	▲ 3,87	▲ 3,88	● 3,73	▲ 3,77	▲ 3,79	▲ 3,81	▲ 3,82	▲ 3,84	▲ 3,84	▲ 3,83	▲ 3,80	● 3,72	● 3,73
29		▲ 3,89	▲ 3,87	▲ 3,89	▲ 3,91	▲ 3,77	▲ 3,79	▲ 3,81	▲ 3,83	▲ 3,84	▲ 3,85	▲ 3,84	▲ 3,83	▲ 3,80	● 3,73
30		▲ 4,06	▲ 3,88	▲ 3,89	▲ 3,94	▲ 3,77	▲ 3,79	▲ 3,81	▲ 3,83	▲ 3,84	▲ 3,86	▲ 3,84	▲ 3,84	▲ 3,82	● 3,73
31		▲ 4,06	▲ 3,88	▲ 3,90	▲ 3,94	▲ 3,77	▲ 3,80	▲ 3,81	▲ 3,83	▲ 3,85	▲ 3,86	▲ 3,85	▲ 3,84	▲ 3,84	▲ 3,82
32		▲ 4,07	▲ 3,89	▲ 3,91	▲ 3,94	▲ 3,77	▲ 3,80	▲ 3,82	▲ 3,84	▲ 3,86	▲ 3,87	▲ 3,86	▲ 3,85	▲ 3,85	▲ 3,83
33		▲ 4,08	▲ 3,89	▲ 3,92	▲ 3,95	▲ 3,77	▲ 3,80	▲ 3,82	▲ 3,84	▲ 3,86	▲ 3,87	▲ 3,88	▲ 3,86	▲ 3,85	▲ 3,85
34		▲ 4,09	▲ 3,89	▲ 3,92	▲ 3,95	▲ 3,78	▲ 3,80	▲ 3,82	▲ 3,84	▲ 3,86	▲ 3,88	▲ 3,89	▲ 3,87	▲ 3,86	▲ 3,86
35	▲ 4,31	▲ 4,10	▲ 3,91	▲ 3,93	▲ 3,95	▲ 3,78	▲ 3,80	▲ 3,82	▲ 3,85	▲ 3,86	▲ 3,88	▲ 3,89	▲ 3,88	▲ 3,87	▲ 3,86
36	▲ 4,32	▲ 4,10	▲ 3,92	▲ 3,94	▲ 3,96	▲ 3,78	▲ 3,80	▲ 3,83	▲ 3,85	▲ 3,87	▲ 3,88	▲ 3,90	▲ 3,91	▲ 3,88	▲ 3,87
37	▲ 4,32	▲ 4,11	▲ 3,92	▲ 3,94	▲ 3,97	▲ 3,78	▲ 3,80	▲ 3,83	▲ 3,85	▲ 3,87	▲ 3,89	▲ 3,91	▲ 3,92	▲ 3,89	▲ 3,88
38	▲ 4,33	▲ 4,13	▲ 3,91	▲ 3,94	▲ 3,97	▲ 3,79	▲ 3,81	▲ 3,83	▲ 3,85	▲ 3,87	▲ 3,89	▲ 3,91	▲ 3,92	▲ 3,91	▲ 3,89
39	▲ 4,34	▲ 4,12	▲ 3,92	▲ 3,95	▲ 3,98	▲ 3,93	▲ 3,81	▲ 3,83	▲ 3,86	▲ 3,87	▲ 3,90	▲ 3,91	▲ 3,93	▲ 3,93	▲ 3,90
40	▲ 4,33	▲ 4,13	▲ 3,94	▲ 3,96	▲ 3,99	▲ 3,95	▲ 3,81	▲ 3,83	▲ 3,86	▲ 3,88	▲ 3,90	▲ 3,92	▲ 3,94	▲ 3,93	▲ 3,92
41	▲ 4,34	▲ 4,13	▲ 3,94	▲ 3,96	▲ 3,99	▲ 3,98	▲ 3,81	▲ 3,84	▲ 3,86	▲ 3,88	▲ 3,90	▲ 3,92	▲ 3,94	▲ 3,94	▲ 3,93
42	▲ 4,36	▲ 4,15	▲ 3,95	▲ 3,97	▲ 4,00	▲ 3,99	▲ 3,82	▲ 3,83	▲ 3,86	▲ 3,89	▲ 3,91	▲ 3,93	▲ 3,95	▲ 3,95	▲ 3,94
43	▲ 4,37	▲ 4,16	▲ 3,95	▲ 3,97	▲ 4,00	▲ 4,06	▲ 3,82	▲ 3,84	▲ 3,87	▲ 3,89	▲ 3,91	▲ 3,93	▲ 3,95	▲ 3,96	▲ 3,95
44	▲ 4,38	▲ 4,16	▲ 3,95	▲ 3,97	▲ 4,01	▲ 4,05	▲ 3,83	▲ 3,84	▲ 3,87	▲ 3,89	▲ 3,92	▲ 3,94	▲ 3,95	▲ 3,97	▲ 3,95
45	◆ 4,40	▲ 4,16	▲ 3,96	▲ 3,98	▲ 4,01	▲ 4,08	▲ 3,83	▲ 3,85	▲ 3,87	▲ 3,90	▲ 3,92	▲ 3,94	▲ 3,96	▲ 3,97	▲ 3,96
46	◆ 4,42	▲ 4,18	▲ 3,97	▲ 3,98	▲ 4,02	▲ 4,07	▲ 3,83	▲ 3,85	▲ 3,88	▲ 3,90	▲ 3,93	▲ 3,94	▲ 3,96	▲ 3,98	▲ 3,97
47	◆ 4,43	▲ 4,18	▲ 3,98	▲ 3,99	▲ 4,03	▲ 4,09	▲ 3,84	▲ 3,85	▲ 3,88	▲ 3,90	▲ 3,93	▲ 3,95	▲ 3,97	▲ 3,99	▲ 3,98
48	◆ 4,43	▲ 4,19	▲ 3,98	▲ 4,00	▲ 4,04	▲ 4,10	▲ 3,85	▲ 3,86	▲ 3,88	▲ 3,91	▲ 3,93	▲ 3,95	▲ 3,97	▲ 3,99	▲ 3,99
49	◆ 4,46	▲ 4,19	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 4,05	▲ 4,10	▲ 3,85	▲ 3,86	▲ 3,89	▲ 3,91	▲ 3,93	▲ 3,96	▲ 3,98	▲ 3,99	▲ 3,99
50	◆ 4,47	▲ 4,20	▲ 3,99	▲ 4,01	▲ 4,06	▲ 4,10	▲ 3,86	▲ 3,87	▲ 3,89	▲ 3,91	▲ 3,94	▲ 3,96	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 4,00

Annexe F.4 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission Artemis urbain (15min)

P _{ge} (kW)	E _{bat} (kWh)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2				▲ 4,17	▲ 4,06	▲ 4,01	▲ 3,99	▲ 3,97	▲ 3,97	▲ 3,96	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 4,01
3				▲ 4,15	▲ 4,05	▲ 4,00	▲ 3,98	▲ 3,97	▲ 3,96	▲ 3,96	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 4,01
4				▲ 4,33	▲ 4,12	▲ 4,03	▲ 3,99	▲ 3,97	▲ 3,96	▲ 3,96	▲ 3,98	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 4,01
5				▲ 4,29	▲ 4,10	▲ 4,01	▲ 3,98	▲ 3,96	▲ 3,96	▲ 3,95	▲ 3,98	▲ 3,98	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 4,01
6				▲ 4,25	▲ 4,07	▲ 4,00	▲ 3,97	▲ 3,95	▲ 3,95	▲ 3,95	▲ 3,97	▲ 3,98	▲ 3,98	▲ 3,99	▲ 4,00
7				▲ 4,21	▲ 4,05	▲ 3,98	▲ 3,95	▲ 3,94	▲ 3,94	▲ 3,94	▲ 3,97	▲ 3,97	▲ 3,98	▲ 3,99	▲ 4,00
8				▲ 4,17	▲ 4,03	▲ 3,96	▲ 3,94	● 3,93	● 3,93	▲ 3,96	▲ 3,96	▲ 3,97	▲ 3,98	▲ 3,99	▲ 4,00
9				▲ 4,14	▲ 4,00	▲ 3,95	● 3,93	● 3,92	● 3,92	▲ 3,95	▲ 3,96	▲ 3,96	▲ 3,97	▲ 3,98	▲ 3,99
10				▲ 4,11	▲ 3,98	● 3,93	● 3,91	● 3,91	● 3,91	▲ 3,94	▲ 3,95	▲ 3,96	▲ 3,97	▲ 3,98	▲ 3,99
11				▲ 4,07	▲ 3,96	● 3,91	● 3,90	● 3,90	● 3,93	▲ 3,93	▲ 3,94	▲ 3,95	▲ 3,96	▲ 3,98	▲ 3,99
12				▲ 4,04	▲ 3,93	● 3,89	● 3,88	● 3,89	● 3,92	● 3,93	▲ 3,94	▲ 3,95	▲ 3,96	▲ 3,97	▲ 3,98
13				▲ 4,01	● 3,91	● 3,88	● 3,87	● 3,88	● 3,91	● 3,92	▲ 3,93	▲ 3,94	▲ 3,96	▲ 3,97	▲ 3,98
14				▲ 3,98	● 3,89	● 3,86	● 3,86	● 3,89	● 3,90	● 3,91	● 3,92	▲ 3,94	▲ 3,95	▲ 3,96	▲ 3,98
15				▲ 4,39	▲ 3,96	● 3,87	● 3,84	● 3,84	● 3,88	● 3,89	● 3,91	● 3,92	▲ 3,93	▲ 3,95	▲ 3,96
16				▲ 4,46	▲ 4,05	● 3,85	● 3,83	● 3,83	● 3,87	● 3,88	● 3,90	● 3,91	● 3,92	▲ 3,94	▲ 3,95
17				▲ 4,48	▲ 4,05	● 3,83	● 3,81	● 3,84	● 3,86	● 3,87	● 3,89	● 3,90	● 3,92	▲ 3,93	▲ 3,95
18				▲ 4,46	▲ 4,04	● 3,88	● 3,80	● 3,83	● 3,84	● 3,86	● 3,88	● 3,89	● 3,91	● 3,93	▲ 3,94
19				▲ 4,45	▲ 4,11	● 3,90	● 3,78	● 3,81	● 3,83	● 3,85	● 3,87	● 3,89	● 3,91	● 3,92	▲ 3,94
20				▲ 4,44	▲ 4,14	● 3,90	● 3,80	● 3,80	● 3,82	● 3,84	● 3,86	● 3,88	● 3,90	● 3,92	▲ 3,94
21				▲ 4,46	▲ 4,18	● 3,94	● 3,84	● 3,78	● 3,81	● 3,83	● 3,85	● 3,87	● 3,90	● 3,91	▲ 3,93
22				▲ 4,45	▲ 4,20	● 3,94	● 3,86	● 3,78	● 3,80	● 3,82	● 3,84	● 3,87	● 3,89	● 3,91	● 3,92
23				▲ 4,49	▲ 4,21	● 3,98	● 3,85	● 3,77	● 3,79	● 3,81	● 3,84	● 3,86	● 3,88	● 3,90	● 3,92
24				▲ 4,50	▲ 4,30	● 3,98	● 3,86	● 3,81	● 3,78	● 3,80	● 3,83	● 3,85	● 3,88	● 3,90	● 3,92
25	▲ 5,07	▲ 4,51	▲ 4,31	▲ 4,03	● 3,89	● 3,83	● 3,76	● 3,80	● 3,82	● 3,84	● 3,87	● 3,89	● 3,91	▲ 3,93	▲ 3,95
26	▲ 5,04	▲ 4,54	▲ 4,34	▲ 4,05	● 3,91	● 3,83	● 3,78	● 3,79	● 3,82	● 3,84	● 3,86	● 3,88	● 3,91	▲ 3,92	▲ 3,95
27	▲ 5,07	▲ 4,55	▲ 4,35	▲ 4,06	● 3,92	● 3,83	● 3,81	● 3,78	● 3,81	● 3,83	● 3,86	● 3,88	● 3,90	● 3,92	▲ 3,94
28	▲ 5,05	▲ 4,69	▲ 4,38	▲ 4,11	● 3,91	● 3,86	● 3,82	● 3,77	● 3,80	● 3,82	● 3,85	● 3,87	● 3,89	● 3,92	▲ 3,96
29	▲ 5,07	▲ 4,76	▲ 4,38	▲ 4,12	▲ 3,94	● 3,87	● 3,83	● 3,78	● 3,79	● 3,82	● 3,84	● 3,87	● 3,89	● 3,92	▲ 3,96
30	▲ 5,09	▲ 4,77	▲ 4,38	▲ 4,19	▲ 3,96	● 3,88	● 3,82	● 3,81	● 3,78	● 3,81	● 3,84	● 3,86	● 3,89	▲ 3,94	▲ 3,95
31	▲ 5,10	▲ 4,80	▲ 4,38	▲ 4,25	▲ 3,98	● 3,89	● 3,83	● 3,82	● 3,77	● 3,80	● 3,83	● 3,86	● 3,88	● 3,92	▲ 3,95
32	▲ 5,12	▲ 4,81	▲ 4,39	▲ 4,27	▲ 3,99	● 3,91	● 3,85	● 3,83	● 3,79	● 3,80	● 3,83	● 3,86	● 3,87	● 3,92	▲ 3,95
33	▲ 5,13	▲ 4,82	▲ 4,37	▲ 4,28	▲ 4,02	● 3,90	● 3,86	● 3,83	● 3,82	● 3,79	● 3,82	● 3,84	● 3,90	● 3,92	▲ 3,94
34	▲ 5,10	▲ 4,83	▲ 4,39	▲ 4,29	▲ 4,10	● 3,92	● 3,87	● 3,83	● 3,82	● 3,79	● 3,81	● 3,84	● 3,89	● 3,92	▲ 3,93
35	▲ 5,11	▲ 4,84	▲ 4,41	▲ 4,31	▲ 4,10	▲ 3,93	● 3,88	● 3,84	● 3,84	● 3,80	● 3,81	● 3,83	● 3,88	● 3,91	● 3,93
36	▲ 5,14	▲ 4,85	▲ 4,42	▲ 4,33	▲ 4,11	▲ 3,94	● 3,90	● 3,86	● 3,84	● 3,83	● 3,80	● 3,85	● 3,88	● 3,90	● 3,93
37	▲ 5,16	▲ 4,87	▲ 4,42	▲ 4,35	▲ 4,17	▲ 3,95	● 3,92	● 3,87	● 3,83	● 3,83	● 3,81	● 3,85	● 3,88	● 3,90	● 3,93
38	▲ 5,19	▲ 4,87	▲ 4,44	▲ 4,36	▲ 4,18	▲ 3,99	● 3,91	● 3,88	● 3,83	● 3,84	● 3,81	● 3,84	● 3,87	● 3,90	● 3,92
39	▲ 5,21	▲ 4,89	▲ 4,46	▲ 4,34	▲ 4,20	▲ 4,01	● 3,92	● 3,88	● 3,86	● 3,85	● 3,86	● 3,84	● 3,87	● 3,90	● 3,92
40	▲ 5,23	▲ 4,90	▲ 4,47	▲ 4,38	▲ 4,21	▲ 4,07	● 3,93	● 3,90	● 3,86	● 3,85	● 3,87	● 3,84	● 3,86	● 3,88	● 3,92
41	▲ 5,24	▲ 4,92	▲ 4,47	▲ 4,38	▲ 4,24	▲ 4,08	● 3,92	● 3,91	● 3,89	● 3,84	● 3,88	● 3,84	● 3,85	● 3,88	● 3,92
42	▲ 5,27	▲ 4,94	▲ 4,48	▲ 4,38	▲ 4,25	▲ 4,13	▲ 3,94	● 3,92	● 3,89	● 3,88	● 3,88	● 3,87	● 3,85	● 3,88	● 3,90
43	◆ 5,29	▲ 4,95	▲ 4,49	▲ 4,41	▲ 4,29	▲ 4,14	▲ 3,98	● 3,93	● 3,90	● 3,90	● 3,89	● 3,88	● 3,85	● 3,88	● 3,90
44	◆ 5,29	▲ 4,97	▲ 4,49	▲ 4,41	▲ 4,30	▲ 4,15	▲ 4,00	● 3,93	● 3,91	● 3,90	● 3,88	● 3,89	● 3,85	● 3,88	● 3,90
45	◆ 5,32	▲ 4,97	▲ 4,53	▲ 4,42	▲ 4,31	▲ 4,16	▲ 4,05	▲ 3,93	▲ 3,94	● 3,92	● 3,88	● 3,89	● 3,89	● 3,86	● 3,90
46	◆ 5,35	▲ 4,98	▲ 4,55	▲ 4,43	▲ 4,32	▲ 4,17	▲ 4,07	▲ 3,93	▲ 3,95	● 3,92	● 3,89	● 3,90	● 3,89	● 3,87	● 3,89
47	◆ 5,38	▲ 4,99	▲ 4,55	▲ 4,44	▲ 4,33	▲ 4,18	▲ 4,07	▲ 3,94	▲ 3,96	● 3,93	● 3,91	● 3,89	● 3,90	● 3,87	● 3,89
48	◆ 5,39	▲ 5,06	▲ 4,56	▲ 4,45	▲ 4,34	▲ 4,22	▲ 4,13	▲ 3,98	▲ 3,96	▲ 3,94	● 3,92	● 3,90	● 3,90	● 3,89	● 3,89
49	◆ 5,40	▲ 5,09	▲ 4,58	▲ 4,46	▲ 4,35	▲ 4,25	▲ 4,13	▲ 4,02	▲ 3,96	▲ 3,96	● 3,93	● 3,90	● 3,92	● 3,90	● 3,88
50	◆ 5,44	▲ 5,05	▲ 4,59	▲ 4,47	▲ 4,37	▲ 4,23	▲ 4,14	▲ 4,03	▲ 3,97	▲ 3,97	▲ 3,94	● 3,92	● 3,92	● 3,91	● 3,89

Annexe F.5 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission Artemis extra-urbain (16min)

P_{ge} (kW)	E_{bat} (kWh)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8					▲ 4,10	▲ 4,02	▲ 3,99	▲ 3,97	▲ 3,96	● 3,95	● 3,95	● 3,95	● 3,95	▲ 3,96	▲ 3,98
9					▲ 4,06	▲ 4,02	▲ 3,99	▲ 3,97	● 3,96	● 3,95	● 3,95	● 3,95	● 3,95	▲ 3,97	▲ 3,97
10					▲ 4,05	▲ 4,01	▲ 3,98	▲ 3,96	● 3,95	● 3,95	● 3,95	● 3,95	● 3,95	▲ 3,97	▲ 3,97
11					▲ 4,03	▲ 4,00	▲ 3,97	● 3,95	● 3,95	● 3,94	● 3,94	● 3,95	● 3,95	▲ 3,97	▲ 3,97
12					▲ 4,03	▲ 3,99	▲ 3,96	● 3,95	● 3,94	● 3,94	● 3,94	● 3,94	▲ 3,96	▲ 3,96	▲ 3,97
13					▲ 4,02	▲ 3,98	● 3,96	● 3,94	● 3,94	● 3,93	● 3,93	● 3,94	● 3,96	▲ 3,96	▲ 3,97
14					▲ 4,00	▲ 3,97	● 3,95	● 3,94	● 3,93	● 3,93	● 3,93	● 3,94	● 3,95	▲ 3,96	▲ 3,97
15				▲ 4,05	▲ 3,99	▲ 3,96	● 3,94	● 3,93	● 3,92	● 3,92	● 3,93	● 3,94	● 3,95	● 3,96	▲ 3,96
16				▲ 4,03	▲ 3,98	● 3,95	● 3,93	● 3,92	● 3,92	● 3,92	● 3,92	● 3,94	● 3,95	● 3,95	▲ 3,96
17				▲ 4,02	▲ 3,97	● 3,94	● 3,93	● 3,92	● 3,91	● 3,91	● 3,92	● 3,94	● 3,95	● 3,95	▲ 3,96
18				▲ 4,00	● 3,95	● 3,93	● 3,92	● 3,91	● 3,91	● 3,91	● 3,93	● 3,93	● 3,94	● 3,95	▲ 3,96
19				▲ 3,98	● 3,94	● 3,92	● 3,91	● 3,90	● 3,90	● 3,91	● 3,92	● 3,93	● 3,94	● 3,95	▲ 3,96
20				▲ 3,97	● 3,93	● 3,91	● 3,90	● 3,90	● 3,90	● 3,90	● 3,92	● 3,93	● 3,94	● 3,95	▲ 3,95
21				▲ 4,07	● 3,92	● 3,90	● 3,90	● 3,89	● 3,89	● 3,91	● 3,92	● 3,92	● 3,94	● 3,94	● 3,95
22				▲ 4,07	● 3,95	● 3,90	● 3,89	● 3,89	● 3,89	● 3,91	● 3,91	● 3,92	● 3,93	● 3,94	● 3,95
23				▲ 4,05	▲ 4,03	● 3,90	● 3,88	● 3,88	● 3,88	● 3,90	● 3,91	● 3,92	● 3,93	● 3,94	● 3,95
24				▲ 4,03	▲ 4,02	● 3,93	● 3,89	● 3,87	● 3,89	● 3,90	● 3,91	● 3,92	● 3,93	● 3,94	● 3,95
25				▲ 4,03	▲ 4,01	▲ 4,00	● 3,90	● 3,87	● 3,89	● 3,89	● 3,90	● 3,91	● 3,92	● 3,93	● 3,95
26			▲ 4,12	▲ 4,03	▲ 4,00	▲ 4,01	▲ 3,98	● 3,89	● 3,88	● 3,89	● 3,90	● 3,91	● 3,92	● 3,93	● 3,94
27			▲ 4,13	▲ 4,03	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 3,99	● 3,92	● 3,89	● 3,88	● 3,89	● 3,91	● 3,92	● 3,93	● 3,94
28			▲ 4,16	▲ 4,03	▲ 4,00	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 3,99	● 3,90	● 3,88	● 3,89	● 3,90	● 3,91	● 3,93	● 3,94
29			▲ 4,16	▲ 4,04	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 4,00	● 3,92	● 3,90	● 3,89	● 3,90	● 3,91	● 3,93	● 3,95
30			▲ 4,21	▲ 4,06	▲ 3,99	▲ 3,98	▲ 4,00	▲ 4,01	▲ 4,01	● 3,92	● 3,90	● 3,90	● 3,91	● 3,92	● 3,95
31			▲ 4,18	▲ 4,06	▲ 4,03	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 4,01	▲ 4,00	● 3,94	● 3,91	● 3,90	● 3,91	● 3,92	● 3,95
32			▲ 4,23	▲ 4,11	▲ 4,04	▲ 3,99	▲ 3,99	▲ 4,01	▲ 4,01	▲ 4,01	● 3,93	● 3,91	● 3,91	● 3,93	● 3,94
33			▲ 4,23	▲ 4,12	▲ 4,04	▲ 4,00	▲ 3,99	▲ 4,00	▲ 4,01	▲ 4,01	● 3,95	● 3,92	● 3,92	● 3,93	● 3,94
34			▲ 4,25	▲ 4,14	▲ 4,04	▲ 4,01	▲ 4,00	▲ 4,00	▲ 4,01	▲ 4,02	▲ 4,01	● 3,94	● 3,92	● 3,93	● 3,94
35			▲ 4,28	▲ 4,13	▲ 4,05	▲ 4,01	▲ 4,00	▲ 4,00	▲ 4,01	▲ 4,02	▲ 4,02	● 3,95	● 3,95	● 3,94	● 3,94
36			▲ 4,29	▲ 4,18	▲ 4,07	▲ 4,02	▲ 4,00	▲ 4,00	▲ 4,01	▲ 4,02	▲ 4,04	▲ 4,01	▲ 3,97	● 3,95	● 3,95
37		▲ 4,34	▲ 4,30	▲ 4,19	▲ 4,08	▲ 4,03	▲ 4,01	▲ 4,00	▲ 4,01	▲ 4,02	▲ 4,04	▲ 4,05	▲ 3,98	▲ 3,96	● 3,95
38		▲ 4,36	▲ 4,30	▲ 4,20	▲ 4,09	▲ 4,05	▲ 4,01	▲ 4,00	▲ 4,01	▲ 4,02	▲ 4,04	▲ 4,07	▲ 4,03	▲ 3,98	▲ 3,97
39		▲ 4,36	▲ 4,31	▲ 4,22	▲ 4,13	▲ 4,06	▲ 4,02	▲ 4,01	▲ 4,01	▲ 4,03	▲ 4,04	▲ 4,07	▲ 4,07	▲ 4,03	▲ 3,97
40		▲ 4,47	▲ 4,33	▲ 4,23	▲ 4,14	▲ 4,08	▲ 4,04	▲ 4,01	▲ 4,02	▲ 4,03	▲ 4,04	▲ 4,07	▲ 4,08	▲ 4,04	▲ 3,99
41		▲ 4,48	▲ 4,34	▲ 4,24	▲ 4,15	▲ 4,09	▲ 4,04	▲ 4,02	▲ 4,02	▲ 4,03	▲ 4,05	▲ 4,07	▲ 4,09	▲ 4,05	▲ 4,00
42		▲ 4,49	▲ 4,37	▲ 4,27	▲ 4,15	▲ 4,09	▲ 4,04	▲ 4,03	▲ 4,02	▲ 4,03	▲ 4,05	▲ 4,07	▲ 4,09	▲ 4,09	▲ 4,05
43		▲ 4,50	▲ 4,36	▲ 4,28	▲ 4,18	▲ 4,11	▲ 4,05	▲ 4,04	▲ 4,02	▲ 4,03	▲ 4,06	▲ 4,07	▲ 4,09	▲ 4,09	▲ 4,06
44		▲ 4,53	▲ 4,35	▲ 4,28	▲ 4,19	▲ 4,10	▲ 4,05	▲ 4,04	▲ 4,03	▲ 4,05	▲ 4,06	▲ 4,08	▲ 4,09	▲ 4,12	▲ 4,09
45		▲ 4,54	▲ 4,35	▲ 4,28	▲ 4,20	▲ 4,12	▲ 4,06	▲ 4,05	▲ 4,03	▲ 4,05	▲ 4,06	▲ 4,08	▲ 4,09	▲ 4,12	▲ 4,10
46		▲ 4,55	▲ 4,34	▲ 4,28	▲ 4,21	▲ 4,13	▲ 4,07	▲ 4,05	▲ 4,04	▲ 4,05	▲ 4,07	▲ 4,08	▲ 4,10	▲ 4,12	▲ 4,12
47	◆ 4,67	▲ 4,56	▲ 4,35	▲ 4,28	▲ 4,22	▲ 4,13	▲ 4,08	▲ 4,05	▲ 4,06	▲ 4,06	▲ 4,07	▲ 4,08	▲ 4,10	▲ 4,12	▲ 4,13
48	◆ 4,66	▲ 4,57	▲ 4,36	▲ 4,29	▲ 4,22	▲ 4,14	▲ 4,09	▲ 4,06	▲ 4,07	▲ 4,06	▲ 4,07	▲ 4,08	▲ 4,10	▲ 4,12	▲ 4,14
49	◆ 4,70	▲ 4,58	▲ 4,37	▲ 4,37	▲ 4,23	▲ 4,15	▲ 4,12	▲ 4,07	▲ 4,06	▲ 4,07	▲ 4,07	▲ 4,09	▲ 4,11	▲ 4,12	▲ 4,15
50	◆ 4,71	▲ 4,59	▲ 4,37	▲ 4,37	▲ 4,24	▲ 4,15	▲ 4,11	▲ 4,10	▲ 4,07	▲ 4,07	▲ 4,08	▲ 4,09	▲ 4,11	▲ 4,12	▲ 4,15

Annexe F.6 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission urbaine mesurée (29h 15min)

	E _{sat} (kWh)																								
P _{re} (kW)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
3																									
4																									
5																									
6																									
7																									
8																									
9																									
10																									
11																									
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39																									
40																									
41																									
42																									
43																									
44																									
45																									
46																									
47																									
48																									
49																									
50																									

Annexe F.7 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour les missions urbaines simulées (1000x1200s)

P _{ge} (kW)	E _{bat} (kWh)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3							3,38	3,42	3,44	3,46	3,48	3,50
4						3,36	3,41	3,43	3,45	3,47	3,48	3,50
5						3,39	3,42	3,44	3,46	3,48	3,49	3,51
6					3,35	3,40	3,42	3,44	3,46	3,48	3,50	3,51
7					3,36	3,40	3,43	3,45	3,47	3,50	3,50	3,51
8					3,37	3,42	3,43	3,46	3,49	3,49	3,50	3,51
9					3,39	3,41	3,43	3,47	3,48	3,49	3,50	3,51
10					3,38	3,41	3,45	3,47	3,48	3,49	3,50	3,51
11					3,38	3,41	3,46	3,47	3,47	3,48	3,49	3,50
12					3,39	3,42	3,45	3,46	3,47	3,48	3,49	3,50
13					3,42	3,44	3,45	3,46	3,47	3,48	3,49	3,50
14				3,40	3,43	3,45	3,44	3,45	3,46	3,47	3,48	3,50
15				3,42	3,46	3,46	3,45	3,45	3,46	3,47	3,48	3,50
16				3,44	3,48	3,47	3,45	3,45	3,46	3,47	3,48	3,49
17				3,46	3,49	3,48	3,46	3,45	3,45	3,46	3,48	3,49
18				3,49	3,51	3,49	3,47	3,46	3,45	3,46	3,47	3,50
19				3,51	3,51	3,50	3,48	3,46	3,46	3,46	3,47	3,50
20				3,53	3,52	3,51	3,49	3,48	3,46	3,46	3,47	3,50
21				3,54	3,53	3,52	3,50	3,48	3,47	3,47	3,48	3,49
22				3,54	3,54	3,53	3,51	3,49	3,48	3,48	3,49	3,49
23				3,56	3,55	3,53	3,52	3,50	3,49	3,48	3,49	3,49
24			3,57	3,57	3,56	3,54	3,53	3,52	3,50	3,50	3,50	3,50
25			3,60	3,59	3,57	3,55	3,54	3,52	3,51	3,51	3,50	3,51
26			3,63	3,60	3,58	3,56	3,55	3,53	3,52	3,52	3,51	3,51
27			3,65	3,62	3,59	3,57	3,55	3,54	3,54	3,53	3,52	3,52
28			3,67	3,63	3,59	3,58	3,56	3,55	3,55	3,53	3,53	3,52
29			3,69	3,65	3,60	3,58	3,57	3,56	3,55	3,54	3,54	3,53
30			3,70	3,67	3,61	3,59	3,58	3,58	3,57	3,56	3,55	3,54
31			3,71	3,68	3,63	3,60	3,59	3,59	3,57	3,56	3,55	3,54
32			3,72	3,70	3,64	3,61	3,59	3,59	3,58	3,57	3,57	3,56
33			3,73	3,71	3,66	3,61	3,61	3,60	3,59	3,58	3,57	3,56
34			3,75	3,72	3,67	3,62	3,62	3,61	3,60	3,59	3,58	3,57
35		3,81	3,76	3,73	3,68	3,63	3,63	3,62	3,61	3,60	3,59	3,58
36		3,83	3,78	3,74	3,68	3,65	3,64	3,62	3,61	3,61	3,59	3,59
37		3,86	3,78	3,75	3,70	3,66	3,65	3,63	3,62	3,61	3,60	3,60
38		3,87	3,79	3,76	3,71	3,68	3,65	3,64	3,63	3,61	3,61	3,60
39		3,90	3,82	3,76	3,73	3,69	3,66	3,65	3,64	3,63	3,62	3,61
40		3,91	3,83	3,78	3,74	3,70	3,67	3,66	3,64	3,63	3,63	3,63
41		3,92	3,85	3,79	3,76	3,72	3,67	3,66	3,65	3,64	3,63	3,64
42		3,94	3,86	3,81	3,77	3,72	3,68	3,67	3,66	3,65	3,64	3,64
43		3,95	3,87	3,82	3,77	3,74	3,70	3,68	3,67	3,66	3,66	3,65
44		3,97	3,88	3,82	3,78	3,74	3,71	3,68	3,68	3,66	3,66	3,66
45	4,15	3,98	3,90	3,83	3,79	3,76	3,72	3,69	3,69	3,67	3,67	3,67
46	4,17	3,99	3,91	3,84	3,80	3,77	3,73	3,70	3,69	3,69	3,68	3,67
47	4,21	4,00	3,92	3,86	3,81	3,78	3,74	3,71	3,70	3,70	3,69	3,68
48	4,23	4,03	3,93	3,87	3,82	3,79	3,75	3,72	3,71	3,71	3,70	3,69
49	4,25	4,04	3,95	3,88	3,82	3,79	3,76	3,73	3,72	3,72	3,70	3,69
50	4,27	4,07	3,96	3,89	3,84	3,80	3,77	3,74	3,73	3,72	3,71	3,70

	3,47	100% des missions assurées (10% des consommations les plus faibles)
	3,44	100% des missions assurées : Dimensionnement le meilleur
	3,92	100% des missions assurées (10% des consommations les plus élevées)
	3,96	100% des missions assurées : Dimensionnement le pire
	3,70	100% des missions assurées (80% des consommations moyennes)
	4,23	95% des missions (au moins) sont assurées
	3,35	95% des missions (au moins) sont assurées : Dimensionnement le meilleur
		Moins de 95% des missions sont assurées

Annexe F.8 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission extra-urbaine mesurée (12h 33min)

	E _{bat} (kWh)																								
P _{ge} (kW)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39																									
40																									
41																									
42																									
43																									
44																									
45																									
46																									
47																									
48																									
49																									
50																									

Annexe F.9 Consommation de carburant moyenne C_{carb} pour la mission extra-urbaine mesurée sans inclinaison

	E _{bat} (kWh)																								
P _{ge} (kW)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39																									
40																									
41																									
42																									
43																									
44																									
45																									
46																									
47																									
48																									
49																									
50																									

Annexe F.10 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour les missions extra-urbaine simulées (1000x2h)

	E _{bat} (kWh)																								
P _{ge} (kW)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39	4.73	4.73	4.69	4.65	4.64	4.62	4.61	4.60	4.60	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.62	4.62	4.63	4.63	4.64	4.64	4.65	4.66	4.66	4.67	4.68
40	4.75	4.74	4.70	4.67	4.65	4.63	4.62	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.62	4.62	4.62	4.63	4.63	4.64	4.64	4.65	4.65	4.66	4.67	4.67	4.69
41	4.76	4.75	4.71	4.68	4.66	4.64	4.63	4.62	4.63	4.62	4.62	4.62	4.62	4.63	4.63	4.63	4.64	4.64	4.65	4.65	4.66	4.67	4.67	4.68	4.70
42	4.78	4.77	4.73	4.69	4.67	4.65	4.64	4.63	4.64	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63	4.64	4.64	4.64	4.65	4.65	4.66	4.67	4.67	4.68	4.68	4.70
43	4.79	4.78	4.74	4.71	4.68	4.66	4.65	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.65	4.65	4.66	4.66	4.67	4.67	4.68	4.68	4.70	4.71
44	4.81	4.80	4.75	4.72	4.69	4.67	4.66	4.66	4.65	4.65	4.64	4.64	4.64	4.65	4.65	4.65	4.66	4.66	4.67	4.67	4.68	4.68	4.69	4.71	4.71
45	4.82	4.81	4.76	4.73	4.70	4.68	4.67	4.66	4.66	4.66	4.65	4.65	4.65	4.65	4.66	4.66	4.66	4.67	4.67	4.68	4.68	4.69	4.69	4.71	4.72
46	4.84	4.83	4.78	4.74	4.71	4.69	4.68	4.67	4.67	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.67	4.67	4.68	4.68	4.68	4.69	4.69	4.71	4.72	4.72
47	4.85	4.84	4.79	4.75	4.73	4.71	4.70	4.68	4.68	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.68	4.68	4.68	4.69	4.69	4.70	4.72	4.72	4.73
48	4.87	4.86	4.80	4.76	4.74	4.72	4.71	4.69	4.69	4.68	4.68	4.67	4.67	4.67	4.68	4.68	4.68	4.69	4.69	4.70	4.70	4.71	4.72	4.73	4.73
49	4.88	4.87	4.81	4.77	4.74	4.73	4.72	4.70	4.69	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.69	4.69	4.69	4.70	4.70	4.71	4.72	4.73	4.73	4.74
50	4.90	4.89	4.83	4.78	4.75	4.75	4.73	4.71	4.70	4.70	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.70	4.70	4.71	4.71	4.73	4.73	4.74	4.74

ANNEXE G DIMENSIONNEMENTS POUR LA STRUCTURE PARALLELE

Annexe G.1 Consommation de carburant moyenne
 C_{carb} en l/100km pour la mission ECE

P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	
	1	2
1		4,91
2		4,37
3		3,95
4		3,68
5		3,52
6		3,41
7		3,32
8	3,37	3,23
9	3,26	3,16
10	3,11	3,07
11	3,00	3,02
12	2,83	2,96
13	2,69	2,83
14	2,55	2,69
15	2,56	2,58
16	2,53	2,55
17	2,48	2,50
18	2,95	2,97
19	2,96	2,98
20	2,91	2,92
21	2,33	2,58
22	2,26	2,54
23	2,27	2,46
24	2,25	2,36
25	2,21	2,33

Annexe G.2 Consommation de carburant moyenne
 C_{carb} en l/100km pour la mission ECE

P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)	
	1	2
1		5,04
2		4,37
3		3,95
4		3,68
5		3,52
6		3,41
7		3,32
8	3,37	3,23
9	3,26	3,16
10	3,43	3,07
11	3,39	3,02
12	3,24	3,11
13	3,22	3,05
14	3,20	3,04
15	3,24	2,64
16	3,24	2,77
17	3,23	2,80
18	3,33	2,97
19	3,42	2,98
20	3,42	2,92
21	3,61	3,48
22	3,64	3,48
23	3,67	3,44
24	3,70	3,39
25	3,80	3,69

Annexe G.3 Consommation de carburant moyenne
 C_{carb} en l/100km pour la mission EUDC

P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)				
	1	2	3	4	5
8				5,41	5,32
9				5,25	5,18
10				5,11	5,05
11				4,97	4,93
12				4,90	4,86
13				4,85	4,81
14				4,79	4,76
15			4,84	4,75	4,72
16			4,79	4,70	4,68
17			4,75	4,67	4,65
18			4,70	4,60	4,63
19			4,60	4,55	4,55
20			4,53	4,49	4,50
21			4,46	4,42	4,45
22			4,41	4,38	4,40
23		4,45	4,35	4,34	4,37
24		4,82	4,31	4,30	4,33
25		4,76	4,27	4,27	4,30
26		4,71	4,24	4,24	4,27
27		4,67	4,22	4,21	4,25
28		4,65	4,18	4,20	4,23
29		4,60	4,15	4,18	4,21
30		4,58	4,68	4,15	4,19
31		4,54	4,67	4,13	4,17
32	4,81	4,48	4,66	4,12	4,16
33	4,76	4,47	4,62	4,10	4,15
34	4,69	4,46	4,59	4,59	4,14
35	4,68	4,42	4,57	4,73	4,10
36	4,94	4,39	4,54	4,72	4,08
37	4,96	4,39	4,51	4,70	4,06
38	4,97	4,36	4,49	4,69	4,05
39	4,98	4,37	4,46	4,68	4,63
40	5,01	4,36	4,45	4,67	4,82
41	5,06	4,34	4,43	4,65	4,82
42	5,07	4,35	4,42	4,64	4,80
43	5,10	4,33	4,39	4,63	4,79
44	5,14	4,29	4,41	4,61	4,80
45	5,10	4,31	4,38	4,57	4,78
46	5,13	4,28	4,38	4,58	4,76
47	5,15	4,31	4,36	4,56	4,76
48	5,18	4,30	4,36	4,53	4,75
49	5,16	4,33	4,36	4,51	4,75
50	5,20	4,30	4,36	4,50	4,74
51	5,22	4,33	4,36	4,51	4,72
52	5,25	4,32	4,35	4,48	4,72
53	5,26	4,37	4,38	4,46	4,72
54	5,26	4,38	4,38	4,44	4,73
55	5,30	4,42	4,38	4,40	4,73

Annexe G.4 Consommation de carburant moyenne
 C_{carb} en l/100km pour la mission NEDC

P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)				
	1	2	3	4	5
4					5,40
5				5,32	5,10
6				5,03	4,90
7				4,81	4,73
8				4,69	4,63
9				4,57	4,53
10				4,47	4,43
11				4,36	4,33
12				4,30	4,27
13				4,25	4,23
14				4,19	4,18
15			4,45	4,15	4,14
16			4,41	4,10	4,10
17			4,38	4,35	4,06
18			4,34	4,33	4,04
19			4,30	4,32	4,31
20			4,27	4,28	4,30
21			4,22	4,24	4,30
22			4,47	4,20	4,29
23		4,38	4,44	4,18	4,28
24		4,57	4,43	4,17	4,28
25		4,56	4,41	4,16	4,27
26		4,55	4,40	4,51	4,26
27		4,52	4,39	4,51	4,25
28		4,52	4,38	4,51	4,24
29		4,51	4,36	4,51	4,24
30		4,50	4,36	4,51	4,20
31		4,50	4,34	4,50	4,20
32	4,78	4,49	4,33	4,50	4,21
33	4,75	4,50	4,31	4,50	4,63
34	4,73	4,52	4,30	4,50	4,63
35	4,90	4,51	4,29	4,50	4,64
36	4,92	4,51	4,26	4,50	4,63
37	4,95	4,52	4,24	4,49	4,63
38	4,99	4,52	4,24	4,48	4,64
39	5,01	4,53	4,22	4,46	4,64
40	5,05	4,53	4,21	4,47	4,64
41	5,09	4,54	4,50	4,47	4,66
42	5,11	4,57	4,53	4,47	4,65
43	5,12	4,56	4,59	4,47	4,66
44	5,15	4,82	4,64	4,47	4,66
45	5,14	4,86	4,68	4,46	4,67
46	5,17	4,91	4,74	4,46	4,66
47	5,19	4,94	4,75	4,45	4,67
48	5,22	4,99	4,76	4,44	4,66
49	5,22	5,04	4,77	4,41	4,66
50	5,24	5,13	4,79	4,42	4,66
51	5,27	5,17	4,81	4,42	4,66
52	5,30	5,15	4,83	4,41	4,66
53	5,31	5,19	4,85	4,42	4,68
54	5,33	5,22	4,87	4,41	4,67
55	5,36	5,23	4,89	4,40	4,68

Annexe G.5 Consommation de carburant moyenne
 C_{carb} en l/100km pour la mission Artemis urbaine

P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)					
	1	2	3	4	5	6
1				7,15	7,05	6,89
2				6,54	6,37	6,37
3				6,07	5,92	5,95
4				5,74	5,58	5,64
5			5,73	5,44	5,36	5,38
6			5,48	5,24	5,11	5,19
7			5,25	5,06	4,97	5,00
8			5,09	4,89	4,83	4,89
9			4,96	4,78	4,72	4,77
10			4,81	4,65	4,63	4,67
11			4,71	4,56	4,54	4,58
12			4,59	4,48	4,46	4,50
13			4,51	4,41	4,40	4,43
14		4,75	4,44	4,34	4,33	4,37
15		4,63	4,35	4,28	4,28	4,33
16		4,91	4,28	4,22	4,23	4,27
17		4,88	4,19	4,17	4,17	4,22
18		5,05	4,33	4,11	4,13	4,18
19		4,94	4,39	4,06	4,08	4,14
20		4,91	4,37	4,01	4,03	4,09
21		4,86	4,47	4,15	3,99	4,05
22		4,77	4,52	4,17	3,95	4,01
23	5,59	4,78	4,62	4,21	3,91	3,98
24	5,50	4,89	4,66	4,19	3,89	3,95
25	5,47	4,87	4,66	4,30	4,04	3,92
26	5,46	4,89	4,82	4,38	4,09	3,89
27	5,37	4,85	4,79	4,36	4,12	3,87
28	5,38	4,95	4,81	4,46	4,11	3,89
29	5,45	4,96	4,82	4,51	4,15	4,04
30	5,43	4,97	4,79	4,51	4,23	4,10
31	5,60	5,01	4,73	4,56	4,28	4,11
32	5,57	5,03	4,75	4,72	4,29	4,10
33	5,55	5,09	4,75	4,85	4,37	4,14
34	5,56	5,11	4,73	4,87	4,41	4,21
35	5,56	5,14	4,73	4,90	4,42	4,27
36	5,58	5,16	4,67	4,94	4,49	4,28
37	5,66	5,16	4,64	4,94	4,64	4,30
38	5,66	5,18	4,65	5,00	4,66	4,37
39	5,71	5,22	4,64	5,01	4,79	4,42
40	5,70	5,23	4,63	4,97	4,80	4,43
41	5,74	5,24	4,70	4,96	4,84	4,44
42	5,74	5,27	4,73	4,96	4,85	4,50
43	5,78	5,25	4,77	4,95	4,93	4,66
44	5,87	5,27	4,78	4,98	5,02	4,67
45	5,74	5,31	4,81	4,94	5,02	4,79
46	5,84	5,31	4,83	4,94	5,03	4,81
47	5,83	5,37	4,88	4,93	5,04	4,82
48	5,87	5,37	4,88	4,91	5,06	4,85
49	5,85	5,56	4,86	4,92	5,07	4,87

Annexe G.6 Consommation de carburant moyenne
 C_{carb} en l/100km pour la mission Artemis extra-urbaine

P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)					
	1	2	3	4	5	6
7					6,83	6,45
8					6,60	6,10
9					6,42	5,17
10					5,73	5,06
11					5,01	4,96
12					4,91	4,86
13					4,83	4,78
14					4,75	4,69
15					4,68	4,63
16				4,68	4,62	4,58
17				4,63	4,57	4,53
18				4,58	4,53	4,49
19				4,54	4,48	4,44
20				4,49	4,44	4,41
21				4,44	4,39	4,38
22				4,41	4,36	4,33
23				4,36	4,33	4,30
24				4,37	4,28	4,27
25			4,60	4,52	4,26	4,25
26			4,56	4,50	4,31	4,22
27			4,52	4,46	4,43	4,24
28			4,53	4,43	4,44	4,28
29			4,56	4,42	4,41	4,45
30			4,61	4,43	4,41	4,47
31			4,68	4,42	4,40	4,48
32			4,65	4,44	4,41	4,44
33			4,73	4,48	4,39	4,43
34		4,76	4,72	4,49	4,40	4,42
35		4,90	4,70	4,55	4,42	4,41
36		4,91	4,69	4,58	4,47	4,42
37		4,91	4,79	4,60	4,47	4,42
38		4,95	4,75	4,57	4,46	4,42
39		4,95	4,72	4,59	4,47	4,46
40		4,94	4,67	4,63	4,51	4,45
41		4,96	4,67	4,66	4,55	4,47
42		4,96	4,66	4,77	4,64	4,51
43	5,20	4,97	4,65	4,78	4,66	4,53
44	5,16	4,97	4,66	4,81	4,68	4,56
45	5,19	4,97	4,66	4,81	4,64	4,58
46	5,17	4,97	4,69	4,81	4,63	4,58
47	5,19	5,06	4,77	4,81	4,77	4,58
48	5,25	5,09	4,83	4,82	4,77	4,62
49	5,26	5,07	4,83	4,87	4,77	4,63
50	5,28	5,09	4,85	4,85	4,77	4,64
...						
76	5,68	5,46	5,51	5,22	5,20	5,07

Annexe G.7 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission Artemis autoroute

P_{mt} (kW)	E_{bat} (kWh)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19										
20										9,72
21									9,82	9,54
22									9,69	9,16
23								9,78	9,30	8,80
24								9,50	8,90	8,38
25							9,74	9,04	8,54	8,18
26						9,90	9,28	8,62	8,19	7,08
27						9,68	8,79	8,28	7,04	7,02
28						9,01	8,22	7,61	6,98	6,98
29						8,46	7,96	6,96	6,94	6,93
30						8,12	6,94	6,91	6,90	6,89
31						6,93	6,89	6,87	6,85	6,85
32					6,91	6,87	6,84	6,83	6,82	6,81
33					6,86	6,83	6,80	6,78	6,77	6,77
34					6,81	6,77	6,75	6,74	6,73	6,72
35					6,76	6,73	6,70	6,69	6,69	6,68
36					6,72	6,69	6,67	6,65	6,64	6,65
37					6,67	6,64	6,62	6,62	6,61	6,61
38					6,63	6,60	6,59	6,57	6,58	6,58
39					6,59	6,56	6,56	6,54	6,54	6,55
40					6,55	6,53	6,51	6,51	6,51	6,51
41				6,53	6,51	6,49	6,48	6,47	6,47	6,48
42				6,48	6,47	6,45	6,44	6,44	6,44	6,45
43				6,47	6,44	6,42	6,41	6,41	6,42	6,43
44				6,59	6,43	6,38	6,38	6,38	6,38	6,40
45				6,55	6,44	6,37	6,35	6,35	6,36	6,37
46				6,54	6,54	6,37	6,33	6,32	6,34	6,35
47				6,51	6,50	6,39	6,33	6,30	6,32	6,33
48				6,52	6,50	6,48	6,33	6,29	6,29	6,31
49				6,53	6,48	6,47	6,36	6,30	6,27	6,29
50			6,65	6,56	6,49	6,46	6,38	6,30	6,27	6,27
...										
100	7,65	7,74	7,62	7,62	7,51	7,60	7,32	7,29	7,28	7,33

Annexe G.8 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour la mission urbaine mesurée

P_{mt} (kW)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
2																									
3																									
4																									
5																									
6																									
7																									
8																									
9																									
10																									
11																									
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39																									
40																									
41																									
42																									
43																									
44																									
45																									
46																									
47																									
48																									
49																									
50																									
...																									
71																									

Annexe G.9 Consommation de carburant moyenne C_{carb} en l/100km pour les missions urbaines simulées

	E _{bat} (kWh)																					
P _{mt} (kW)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
12					3.61	3.68	3.70	3.76	3.76	3.77	3.77	3.78	3.79	3.81	3.82	3.83	3.86	3.87	3.88	3.90	3.91	3.94
13					3.58	3.65	3.71	3.71	3.73	3.73	3.73	3.74	3.74	3.76	3.78	3.79	3.80	3.81	3.84	3.85	3.86	3.88
14				3.64	3.58	3.62	3.66	3.67	3.68	3.68	3.70	3.70	3.71	3.73	3.74	3.75	3.76	3.78	3.79	3.80	3.83	3.85
15				3.70	3.65	3.63	3.63	3.63	3.63	3.64	3.66	3.67	3.68	3.70	3.71	3.72	3.73	3.75	3.76	3.77	3.78	3.80
16				3.76	3.71	3.64	3.59	3.59	3.62	3.63	3.64	3.66	3.67	3.69	3.69	3.71	3.73	3.74	3.74	3.74	3.76	3.77
17				3.77	3.78	3.66	3.58	3.58	3.58	3.60	3.61	3.64	3.65	3.66	3.68	3.69	3.69	3.70	3.72	3.73	3.74	3.76
18				3.82	3.85	3.70	3.58	3.56	3.56	3.59	3.60	3.61	3.64	3.65	3.67	3.68	3.68	3.69	3.71	3.72	3.73	3.75
19				3.86	3.89	3.75	3.63	3.56	3.55	3.56	3.59	3.60	3.61	3.63	3.64	3.65	3.66	3.68	3.69	3.69	3.71	3.72
20				3.88	3.90	3.82	3.70	3.60	3.55	3.54	3.57	3.58	3.60	3.61	3.62	3.63	3.65	3.67	3.68	3.70	3.71	3.71
21				3.89	3.93	3.86	3.73	3.61	3.55	3.54	3.55	3.56	3.57	3.58	3.61	3.62	3.64	3.65	3.66	3.68	3.69	3.70
22				3.95	3.95	3.88	3.79	3.67	3.57	3.54	3.54	3.55	3.56	3.57	3.58	3.61	3.62	3.63	3.65	3.66	3.67	3.70
23				3.89	3.93	3.95	3.91	3.82	3.70	3.63	3.57	3.54	3.53	3.54	3.56	3.57	3.58	3.60	3.61	3.64	3.65	3.67
24				3.91	3.94	3.97	3.93	3.87	3.77	3.68	3.60	3.54	3.52	3.53	3.54	3.56	3.58	3.59	3.61	3.62	3.63	3.65
25				3.96	3.97	3.99	3.95	3.88	3.78	3.74	3.65	3.58	3.53	3.53	3.54	3.55	3.57	3.58	3.61	3.62	3.63	3.64
26				4.00	3.98	3.99	3.96	3.89	3.83	3.74	3.65	3.58	3.54	3.52	3.53	3.55	3.56	3.57	3.58	3.60	3.62	3.64
27				4.03	4.03	4.01	3.96	3.94	3.87	3.79	3.68	3.61	3.58	3.53	3.52	3.53	3.53	3.56	3.57	3.59	3.61	3.64
28				4.04	4.05	4.02	3.98	3.93	3.87	3.79	3.74	3.66	3.60	3.55	3.52	3.52	3.54	3.56	3.57	3.59	3.60	3.63
29				4.04	4.06	4.03	3.98	3.97	3.92	3.84	3.77	3.72	3.66	3.60	3.55	3.52	3.53	3.54	3.55	3.56	3.60	3.61
30				4.06	4.07	4.06	3.99	3.96	3.93	3.89	3.82	3.76	3.69	3.61	3.56	3.52	3.51	3.53	3.55	3.56	3.58	3.58
31				4.07	4.10	4.05	4.01	4.00	3.95	3.87	3.83	3.76	3.64	3.58	3.54	3.51	3.51	3.52	3.55	3.57	3.57	3.58
32				4.04	4.09	4.13	4.07	4.02	3.98	3.95	3.92	3.87	3.80	3.72	3.66	3.60	3.56	3.52	3.53	3.51	3.54	3.57
33				4.10	4.10	4.14	4.08	4.03	4.01	3.95	3.90	3.87	3.81	3.74	3.69	3.66	3.61	3.57	3.53	3.52	3.52	3.54
34				4.15	4.12	4.15	4.09	4.05	4.02	3.99	3.94	3.88	3.82	3.75	3.70	3.64	3.59	3.52	3.52	3.52	3.52	3.54
35				4.19	4.12	4.18	4.12	4.07	4.05	4.02	3.98	3.93	3.88	3.82	3.77	3.71	3.66	3.61	3.57	3.55	3.53	3.53
36				4.24	4.13	4.19	4.13	4.09	4.05	4.03	4.01	3.96	3.91	3.86	3.80	3.75	3.70	3.64	3.59	3.54	3.53	3.53
37				4.28	4.14	4.20	4.16	4.11	4.07	4.07	4.00	3.98	3.93	3.87	3.81	3.76	3.71	3.66	3.61	3.58	3.55	3.53
38				4.29	4.15	4.19	4.15	4.11	4.10	4.05	4.00	3.96	3.91	3.86	3.79	3.75	3.70	3.64	3.61	3.57	3.55	3.55
39				4.33	4.18	4.19	4.14	4.17	4.12	4.12	4.05	4.02	3.97	3.92	3.87	3.81	3.76	3.71	3.66	3.61	3.59	3.55
40				4.36	4.20	4.21	4.17	4.18	4.14	4.15	4.09	4.06	4.02	3.97	3.92	3.86	3.81	3.76	3.71	3.62	3.61	3.57
41				4.37	4.22	4.20	4.18	4.22	4.17	4.16	4.12	4.10	4.10	4.08	4.03	3.98	3.89	3.86	3.78	3.75	3.74	3.76
42				4.41	4.25	4.21	4.16	4.23	4.19	4.16	4.12	4.13	4.10	4.09	4.04	4.00	3.94	3.86	3.84	3.78	3.74	3.76
43				4.58	4.38	4.25	4.21	4.20	4.26	4.22	4.18	4.19	4.15	4.14	4.10	4.06	4.04	3.99	3.92	3.86	3.81	3.79
44				4.43	4.27	4.22	4.19	4.27	4.24	4.20	4.18	4.15	4.14	4.11	4.09	4.06	4.02	3.97	3.94	3.84	3.79	3.78
45				4.63	4.47	4.29	4.21	4.19	4.29	4.25	4.23	4.18	4.14	4.11	4.09	4.02	3.96	3.93	3.92	3.83	3.78	3.79
46				4.65	4.50	4.30	4.20	4.21	4.25	4.29	4.25	4.20	4.19	4.18	4.14	4.13	4.06	4.02	3.93	3.92	3.86	3.81
47				4.68	4.52	4.33	4.22	4.19	4.27	4.30	4.29	4.24	4.23	4.19	4.20	4.16	4.11	4.10	4.03	3.91	3.85	3.83
48				4.71	4.53	4.34	4.21	4.20	4.29	4.32	4.30	4.27	4.23	4.20	4.21	4.18	4.14	4.09	4.09	4.01	3.96	3.95
49				4.70	4.57	4.36	4.20	4.21	4.23	4.35	4.33	4.28	4.28	4.25	4.23	4.21	4.18	4.13	4.08	4.09	4.03	3.97
50				4.74	4.58	4.36	4.22	4.22	4.25	4.38	4.32	4.30	4.29	4.24	4.25	4.25	4.21	4.19	4.15	4.10	4.06	3.97
51				4.76	4.60	4.39	4.24	4.23	4.26	4.39	4.34	4.31	4.33	4.28	4.27	4.23	4.20	4.18	4.14	4.12	4.08	4.01
52				4.79	4.62	4.43	4.25	4.25	4.27	4.39	4.36	4.32	4.34	4.29	4.26	4.26	4.24	4.22	4.14	4.12	4.10	4.02
53				4.82	4.64	4.47	4.27	4.27	4.29	4.35	4.39	4.35	4.36	4.31	4.27	4.29	4.23	4.23	4.20	4.19	4.12	4.06
54				4.83	4.67	4.50	4.28	4.27	4.29	4.39	4.38	4.36	4.33	4.30	4.29	4.27	4.22	4.20	4.14	4.10	4.04	4.01
55				4.86	4.68	4.52	4.31	4.30	4.30	4.41	4.41	4.37	4.33	4.36	4.32	4.31	4.30	4.27	4.22	4.21	4.15	4.08
56				4.88	4.70	4.56	4.34	4.32	4.31	4.32	4.39	4.40	4.35	4.39	4.35	4.31	4.30	4.27	4.28	4.23	4.18	4.12
57				4.90	4.73	4.57	4.35	4.32	4.33	4.35	4.43	4.45	4.34	4.40	4.36	4.34	4.32	4.28	4.25	4.21	4.17	4.16
...				5.35	5.27	5.19	5.10	4.91	4.84	4.69	4.66	4.70	4.73	4.75	4.75	4.80	4.78	4.76	4.76	4.87	4.84	4.80
93				3.47	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
100				3.47	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
100				3.47	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
100				3.47	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44

100% des missions assurées (10% des consommations les plus faibles)

100% des missions assurées : Dimensionnement le meilleur

100% des missions assurées (10% des consommations les plus élevées)



100% des missions assurées (80% des consommations moyennes)

95% des missions (au moins) sont assurées

Moins de 95% des missions sont assurées

Annexe G.10 Consommation de carburant moyenne C_carb en l/100km pour la mission extra-urbaine mesurée

P _{net} (kW)	E _{car} (kWh)																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39																									
40																									
41																									
42																									
43																									
44																									
45																									
46																									
47																									
48																									
49																									
50																									
51																									
52																									
53																									
54																									
55																									
56																									
57																									
58																									
59																									
60																									
61																									
62																									
63																									
64																									
65																									

Annexe G.11 Consommation de carburant moyenne C_carb en l/100km pour les missions extra-urbaines simulée

P _{mt} (kW)	E _{bat} (kWh)																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									
26																									
27																									
28																									
29																									
30																									
31																									
32																									
33																									
34																									
35																									
36																									
37																									
38																									
39																									
40																									
41																									
42																									
43																									
44																									
45																									
46																									
47																									
48																									
49																									
50																									

Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission

A l'heure où l'automobile doit répondre à des enjeux environnementaux majeurs, le dimensionnement de la chaîne de traction est l'une des problématiques clef dans la conception d'un véhicule électrique hybride afin d'améliorer sa consommation énergétique. Dans ce contexte, nous proposons de pré-dimensionner les éléments de la chaîne de traction (moteur thermique, machine électrique et batterie) en considérant les profils de mission liés à l'usage du véhicule (urbain, extra-urbain) et sans choix a priori, ni de la structure (série ou parallèle), ni de la puissance nominale des composants.

L'originalité des travaux repose ainsi sur deux axes. D'une part, un modèle de l'usage d'un véhicule est développé afin de caractériser une mission définie par le trio de variables {vitesse ; accélération ; inclinaison}. Ce modèle, basé sur la matrice de Markov, permet de conserver la corrélation entre les trois variables ainsi que leurs caractéristiques statistiques. Suite à cette modélisation, de nombreuses missions peuvent être générées aléatoirement. D'autre part, la chaîne de traction hybride est modélisée selon une approche par flux de puissance pour les deux structures série et parallèle. Des modèles génériques adimensionnels des composants sont alors utilisés de manière à ne pas faire de choix a priori sur leur valeur nominale et une stratégie de gestion de l'énergie en ligne maximisant le rendement de la chaîne de traction est proposée.

Enfin, un algorithme de dimensionnement a été développé de manière à minimiser la consommation de carburant du véhicule sur un ensemble de missions simulées. Le dimensionnement obtenu est donc optimisé par rapport à l'usage prévu du véhicule.

Mots-clés : Véhicule électrique hybride, Matrice de Markov, Cycle de conduite, Profils de mission, Approche stochastique, Modélisation par flux de puissance, Dimensionnement, Gestion d'énergie en ligne

Powertrain sizing for hybrid electric vehicles based on a stochastic modeling of driving missions

At a time when the automobile must comply with increasingly stringent environmental issues, the powertrain sizing is a major concern in the design of a hybrid electric vehicle which is at the heart of the energy savings challenge. In this context, the present work introduces a methodological approach to pre-size the drivetrain elements (engine, electric machine and battery) given the mission profiles related to the vehicle use (urban, extra urban) and considering no prior choice in selecting either the powertrain structure (serial or parallel) or the components rated power.

The originality of the work is focused on two prime advances. On one hand, a model of the vehicle use is implemented to characterize a mission defined by the triplet of variables {speed; acceleration; road slope}. This model, based on the Markov matrix formulation, preserves the correlation between these variables and their statistical characteristics. Further to this modeling, a large family of vehicle missions can be randomly generated. On the other hand, the hybrid powertrain is modeled along a power flow approach for both series and parallel structures. Generic per-unit models of the components are used in order to avoid an a priori choice of their rated power and an online energy management maximizing the drivetrain efficiency is proposed.

Finally, a sizing algorithm is implemented to minimize the vehicle fuel consumption on a set of simulated vehicle missions. The resulting sizing is thus optimized with respect to the intended vehicle use.

Keywords : Hybrid electric vehicle, Markov matrix, Driving cycle, Mission profiles, Stochastic approach, Power exchanges modeling, Sizing, Online energy management