



# Optimisation énergétique d'un véhicule hybride

Mert Mokukcu

## ► To cite this version:

Mert Mokukcu. Optimisation énergétique d'un véhicule hybride. Autre [cs.OH]. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. NNT : 2018SACL066 . tel-01932977

HAL Id: tel-01932977

<https://theses.hal.science/tel-01932977>

Submitted on 23 Nov 2018

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

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

# Optimisation énergétique d'un véhicule hybride

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay  
préparée à CentraleSupélec

École doctorale n° 580 sciences et technologies de  
l'information et de la communication (STIC)  
Spécialité de doctorat : Automatique

Thèse présentée et soutenue à Gif-sur-Yvette, le 5 octobre 2018, par

**Mert Mökükcü**

Composition du jury :

Michel BASSET	Président
Professeur des Universités, Univ. de Haute Alsace	
Luc LORON	Rapporteur
Professeur des Universités, Ecole Polytech' Nantes	
Eric BIDEAUX	Rapporteur
Professeur des Universités, INSA-Lyon	
Saïd MAMMAR	Examinateur
Professeur des Universités, Université d'Evry	
Frédéric KRATZ	Examinateur
Professeur des Universités, INSA Val de Loire	
Emmanuel GODOY	Directeur de thèse
Professeur, CentraleSupélec, L2S	
Cristina VLAD	Co-encadrante
Maître de Conférences, CentraleSupélec, L2S	
Philippe FIANI	Co-encadrant
Responsable R&D, Sherpa Engineering	
Atilla YAZMAN	
CEO, Sherpa Engineering	Invité



*à ma Julie...*

*à mon petit Hektor...*

*Annem, babam ve ablam için...*



## Remerciements

Je remercie sincèrement à mes encadrants de thèse à CentraleSupélec, M. Emmanuel Godoy, mon directeur de thèse et Mme. Cristina Vlad, co-encadrante. Je les remercie pour leur gentillesse, disponibilité constant et patience (je reconnaiss que c'est difficile de me supporter pendant 3 ans :)). J'ai eu la chance de pouvoir travailler avec eux et écouter leurs conseils. Sans leurs corrections, cette mémoire n'a pas été possible d'être compréhensible :).

J'adresse mes remerciements à M. Philippe Fiani, responsable R&D de Sherpa Engineering et responsable industriel de cette thèse, pour sa confiance en moi, sa disponibilité, pour partager son bureau avec moi et les longues discussions pour orienter mes travaux et ses aides au cours de ces travaux.

Je remercie très sincèrement M. Eric Bideaux et M. Luc Loron d'avoir accepté de juger mon travail en qualité de rapporteurs de cette thèse et pour les commentaires et corrections qui m'ont aidé à améliorer la qualité de cette mémoire.

Je remercie M. Michel Basset pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Je remercie M. Frédéric Kratz et M. Saïd Mammar d'avoir été fait partie de mon jury de thèse.

Je remercie également M. Atilla Yazman pour me proposer cet offre de thèse chez Sherpa Engineering et d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Mes remerciements à mon épouse, Julie, pour son soutien constant, sa compréhension, sa patience et donner la vie à notre fils Hektor. C'est ma famille qui me donne la force d'arriver tous les jours et me fait sentir que je suis capable de tout. Avec mon épouse Julie, pendant ces 3 ans de thèse, on a réussi à se marier, fêter 2 fois notre mariage et le plus important, en phase final de ces travaux, l'arrivée de Hektor qui m'a poussé pour terminer.

Annem Nurgül ve babam Ali'ye, hayatimin her anında, her seçimimde ve her zorlugumda yanımda oldukları için, bana göstermiş oldukları güven ve destek ile sosyal hayatımda ve kariyerimde her zaman benim için bir adım ileriye gitmeyi kolaylastırdıkları için, beni kendine çok güvenli ve azimli bir birey olarak yetiştirdikleri için ve en önemlisi uzakta olsalar da çok yakında gibi hissettirdikleri için teşekkür ederim.

Ablam Merve ve Can abime, tüm doktoram boyunca her zorlukta ve her önemli animda yanımda oldukları için, bana verdikleri destek ve göstermiş oldukları güven için, ayrıca ablama uzakta da olsak benim en yakın arkadaşım ve sirdasım olduğu için teşekkür ederim.

J'adresse ma reconnaissance à la famille Prunier, Nelly, Thierry, Loïc et Manon ainsi que Agathe et Alexis pour leur soutien, leur présence constant pour tous les apéros, fêtes et pour leurs efforts pour faciliter mon adaptation à la vie en France.

Je remercie mes collègues à CentraleSupélec, pour m'accueillir et partager des moments agréables quand j'étais au Campus ainsi que les pots des soutenances ! Merci à Guillaume, Nicolo (the King in the North), Mircea, Andreea, Iris, Nathan, Nolwenn, Thomas, Rajesh, Mohammed, Fetra, Ion et tout l'équipe L2S.

Je remercie mes collègues à Sherpa Engineering pour les organisations de foot à 5, les afterworks, les cafés et les échanges qu'on a eu au cours de ces travaux. Je tiens remercier aussi à mes encadrants, pour leurs conseils, compréhension et encouragements !

Son olarak Türkiye'deki ve İngiltere'deki tüm aileme bana göstermiş oldukları sevgi ve güven için teşekkür ederim. Ancak özellikle anneanneme küçüklüğünden beri "doktor olasin" diye dua ettigi için teşekkür ederim :)

Enfin, je remercie à tous mes amis : Cekirdek Terakki, cancilar, l'association LASMETE, pour tous les apéros, raki balik, les voyages, les fêtes et pour leur présence.

# Liste de publications

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse se sont déroulés au sein du département Automatique de CentraleSupélec et du département Recherche et Développement de Sherpa Engineering. Les résultats obtenus ont donné lieu à la publication d'un certain nombre d'articles à l'occasion des conférences internationales avec actes et des revues internationales et nationales.

⇒ Revues internationales :

- Mokukcu M., Fiani P., Chavanne S., Ait Taleb L., Vlad C., Godoy E. « Energy-based Functional Modelling for Control Architecture Design : an Application to Energy Management for a Hybrid Electric Vehicle ». In *Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE)*, Springer Book (accepté).

⇒ Revues nationales :

- Fiani P., Chavanne S., Ait Taleb L., Mokukcu M. « Modélisation pour la Conception et l'Evaluation de Systèmes Complexes », *Revue Ingénieurs de l'Automobile*, vol. 841, April 2016.

⇒ Conférences internationales avec actes :

- Mokukcu M., Fiani P., Chavanne S., Ait Taleb L., Godoy E., Vlad C., Fauvel C. « A New Concept of Functional Energetic Modelling and Simulation. » In *Linköping Electronic Conference Proceedings (ISSN : 1650-3686, eISSN : 1650-3740)* (9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation), pp. xx-xx, Oulu (Finland), September 2016.
- Mokukcu M., Fiani P., Chavanne S., Ait Taleb L., Godoy E., Vlad C. « Control Architecture Modeling using Functional Energetic Method : Demonstration on a Hybrid Electric Vehicle. » In *Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2017)*, Volume 1, pages 45-53, Madrid (Spain), July 2017.

⇒ Conférences nationales avec actes :

- Fiani P., Mokukcu M., « Une représentation unifiée pour la conception, l'analyse et la simulation des systèmes complexes. Application aux véhicules hybrides. » In *Proceedings of the Congrès Simulation : La simulation numérique au cœur de l'innovation automobile*, Mars 2017.



# Sommaire

<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Liste de publications</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introduction et revue méthodologique</b>	<b>1</b>
1.1 Etat de l'art sur la modélisation des véhicules électriques hybrides . . . . .	5
1.1.1 Approche Bond-Graph . . . . .	7
1.1.1.1 PhiGraph (Sherpa Engineering) . . . . .	8
1.1.1.2 REM (Représentation Energétique Macroscopique) . . . . .	9
1.1.1.3 Modélisation par flux de puissance . . . . .	9
1.2 Optimisation énergétique des véhicules automobiles . . . . .	11
1.2.1 Stratégies de gestion d'énergie fondées sur des règles (stratégies heuristiques) . . . . .	12
1.2.2 Stratégies de gestion d'énergie fondée sur des méthodes d'optimisation . . . . .	13
1.2.2.1 Minimisation de la consommation équivalente (ECMS) . . . . .	14
1.2.2.2 Commande prédictive (MPC) . . . . .	15
1.2.2.3 Commande prédictive fonctionnelle (PFC) . . . . .	17
1.3 Motivations et pistes de travail envisagées . . . . .	17
1.3.1 Modélisation fonctionnelle . . . . .	19
1.3.2 Optimisation modulaire . . . . .	19
<b>2 Eléments constitutifs d'un véhicule électrique hybride</b>	<b>25</b>
2.1 Histoire des véhicules hybrides . . . . .	26
2.2 Classification des véhicules hybrides . . . . .	29
2.2.1 Niveaux d'hybridation . . . . .	30
2.2.2 Architectures des véhicules hybrides . . . . .	31
2.3 Services & missions des véhicules hybrides . . . . .	39
2.3.1 Mobilité et cycles de conduite . . . . .	40
2.4 Modèle du véhicule et éléments constitutifs . . . . .	42
2.4.1 Modèle dynamique du véhicule . . . . .	42
2.4.2 Composants des véhicules hybrides . . . . .	43
2.4.2.1 Batterie . . . . .	44
2.4.2.2 Super Condensateurs . . . . .	49
2.4.2.3 Pile à combustible . . . . .	50
2.4.2.4 Réservoir de carburant . . . . .	51
2.4.2.5 Moteur thermique . . . . .	51
2.4.2.6 Machine électrique . . . . .	52
2.4.2.7 Réducteur . . . . .	56
2.4.2.8 Convertisseurs . . . . .	56

2.4.3 Gammes de véhicules hybrides . . . . .	57
2.5 Conclusions partielles . . . . .	57
<b>3 Modélisations fonctionnelles énergétiques</b>	<b>59</b>
3.1 Niveaux de représentation d'un système . . . . .	63
3.2 Rappel sur les bases de la modélisation multi-physiques . . . . .	65
3.3 Méthodologie de modélisation fonctionnelle . . . . .	68
3.3.1 Concept modulaire . . . . .	70
3.3.2 Sémantiques des éléments de la modélisation fonctionnelle . . . . .	71
3.3.2.1 Elément Source . . . . .	72
3.3.2.2 Elément Stockage . . . . .	73
3.3.2.3 Elément Transformateur . . . . .	74
3.3.2.4 Elément Distributeur . . . . .	75
3.3.2.5 Elément Effecteur . . . . .	76
3.3.2.6 Ensemble Organico-Fonctionnel (EOF) . . . . .	77
3.3.2.7 Rôle de Distributeurs . . . . .	78
3.3.3 Intégration dans un outil de simulation . . . . .	81
3.3.3.1 Système de traitement des eaux d'un bâtiment . . . . .	83
3.4 Conclusions partielles . . . . .	85
<b>4 Utilisation de la modélisation fonctionnelle énergétique pour l'optimisation énergétique</b>	<b>87</b>
4.1 Définition d'une architecture de commande au niveau multi-physiques fondée sur un modèle fonctionnel énergétique . . . . .	90
4.1.1 Développement et paramétrage du modèle fonctionnel à partir des caractéristiques d'un groupe de composants multi-physiques . . . . .	91
4.1.1.1 Conception de l'élément transformateur F-à-M . . . . .	93
4.1.1.2 Paramétrage de la dynamique d'éléments fonctionnels . . . . .	98
4.1.2 Interconnexion des modèles fonctionnel et multi-physiques . . . . .	99
4.2 Formalisme du problème d'optimisation . . . . .	102
4.2.1 Principes de la commande prédictive fonctionnelle . . . . .	103
4.2.1.1 Modèle du procédé . . . . .	105
4.2.1.2 Sortie de référence . . . . .	106
4.2.1.3 Structuration de la commande future . . . . .	106
4.2.1.4 Mise en oeuvre de PFC dans un cas simple . . . . .	107
4.2.2 Gestion fonctionnelle des ressources (traitement fonctionnel) . . . . .	108
4.2.2.1 Allocation de puissance dans un sous-système mono-source/multi-consommateurs . . . . .	110
4.2.2.2 Allocation de besoin dans un sous-système multi-sources/mono-consommateur . . . . .	114
4.3 Conclusions partielles . . . . .	121
<b>5 Application à l'optimisation énergétique d'un VEH</b>	<b>123</b>
5.1 Définition d'un cas d'étude pour un VEH . . . . .	125
5.1.1 Définition de la gamme et l'architecture d'un VEH . . . . .	127
5.2 Modélisation et simulation du VEH . . . . .	128
5.2.1 Modèles fonctionnel et multi-physiques . . . . .	130
5.2.1.1 Modèle fonctionnel du VEH-1 . . . . .	130
5.2.1.2 Modèle multi-physiques du VEH - 1 . . . . .	132
5.2.1.3 Modèle fonctionnel du VEH - 2 . . . . .	135

5.2.2 Comparaison des résultats, validation du modèle et de l'architecture du VEH . . . . .	136
5.3 Comparaison des résultats et validation du modèle et de l'architecture du VEH . . . . .	138
5.3.1 Interconnexion des modèles fonctionnel et multi-physiques . . . . .	139
5.3.1.1 Interconnexion entre l'élément transformateur F-à-M et la chaîne de traction thermique . . . . .	140
5.3.1.2 Interconnexion entre l'élément transformateur E-à-M et la chaîne de traction électrique . . . . .	141
5.3.1.3 Interconnexion entre l'élément transformateur M-à-E et le groupe alternateur . . . . .	142
5.3.1.4 Interconnexion entre l'élément stockage électrique et le groupe batterie . . . . .	143
5.3.1.5 Interconnexion entre l'élément système de freinage et le groupe de freinage . . . . .	144
5.3.2 Gestion d'énergie avec la stratégie fondée sur des règles . . . . .	144
5.3.2.1 Cas d'un profil de conduite NEDC [ $P_{aux} = 2kW, \Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] avec la stratégie fondée sur des règles . . . . .	147
5.3.2.2 Cas d'un profil de conduite WLTC [ $P_{aux} = 2kW, \Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] avec la stratégie fondée sur des règles . . . . .	148
5.3.3 Stratégie de gestion d'énergie fondée sur PFC (Commande Prédictive Fonctionnelle, en Anglais : Predictive Functional Control) . . . . .	150
5.3.3.1 Choix d'horizon de prédiction et la pondération $\alpha$ . . . . .	150
5.3.3.2 Cas d'un profil de conduite NEDC [ $P_{aux} = 2kW, \Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] avec la stratégie fondée sur PFC fonctionnement en « partage des besoins par priorisation » . . . . .	156
5.3.3.3 Cas d'un profil de conduite WLTC [ $P_{aux} = 2kW, \Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation » . . . . .	157
5.4 Comparaison des résultats . . . . .	160
5.5 Conclusions partielles . . . . .	169
<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>171</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>177</b>
<b>A Gammes des véhicules</b>	<b>187</b>
<b>B Application de la commande prédictive à un véhicule électrique hybride</b>	<b>191</b>
B.1 Principe de la stratégie de commande prédictive . . . . .	191
B.2 Application de la stratégie de commande prédictive à un VEH . . . . .	191
B.3 Contraintes pour l'incrément de la commande . . . . .	195
B.4 Contraintes pour la commande . . . . .	195
<b>C Résultats des simulations</b>	<b>199</b>
C.1 Tableaux des résultats . . . . .	199
C.2 Figures des résultats . . . . .	216



# Table des figures

1.1	Emissions $CO_2$ et consommation de carburant des voitures particulières, cycle normalisé NEDC [11]. . . . .	3
1.2	Représentation mathématique des systèmes physiques. . . . .	6
1.3	Exemple de représentation Bond Graph d'un moteur électrique. . . . .	8
1.4	Eléments de base de modélisation par flux de puissance [39]. . . . .	10
1.5	Modèle du véhicule électrique (a) façon Bond-Graph, (b) façon modélisation par flux de puissance. . . . .	10
1.6	Niveaux et types d'optimisation des véhicules hybrides électrifiés. . . . .	11
1.7	Optimisation globale en modules de deux natures [32]. . . . .	20
2.1	(a) Modèle du véhicule de Jedlik [75], (b) une illustration à un chariot miniature électrique de Davenport [76]. . . . .	27
2.2	(a) Véhicule hybride de Pieper [79], (b) Auto Mixte de Lohner-Porsche [80]. . . . .	28
2.3	(a) Toyota Prius Hybride 1997 [81], (b) Toyota Prius Hybride Rechargeable 2017 [82]. . . . .	28
2.4	Les Niveaux d'Hybridation. . . . .	31
2.5	Le concept de la chaîne de traction d'un VEH [84, 85]. . . . .	32
2.6	Représentation d'un VEH Série. . . . .	33
2.7	Représentation des modes (a) traction électrique et (b) traction thermique de VEH Série. . . . .	34
2.8	Représentations des modes (a) traction hybride et (b) puissance thermique divisé de VEH Série. . . . .	34
2.9	Représentations des modes (a) freinage régénératif et (b) chargement de la batterie immobile de VEH Série. . . . .	35
2.10	Représentation d'un VEH Parallèle. . . . .	35
2.11	Représentations des modes (a) traction thermique et (b) charge de la batterie immobile de VEH Parallèle. . . . .	36
2.12	Représentations des modes (a) traction électrique et (b) puissance de thermique divisé d'un VEH Parallèle. . . . .	36
2.13	Représentations des modes (a) traction combinée et (b) freinage régénérative d'un VEH Parallèle. . . . .	37
2.14	Représentation d'un VEH Série – Parallèle. . . . .	37
2.15	Représentation d'un VEH Complexe. . . . .	38
2.16	Missions d'un véhicule avec son environnement. . . . .	39
2.17	Cycles de conduite (a) ECE15, (b) EUROCAR. . . . .	41
2.18	Cycles de conduite, (a) NEDC, (b) WLTC. . . . .	41
2.19	Les forces affectant le véhicule sur une voie inclinée. . . . .	42
2.20	L'effet de température sur l'énergie spécifique de batteries selon leur type [91].	46

3.1 Niveaux d'un système . . . . .	60
3.2 Représentation modulaire et multi-facettes. . . . .	61
3.3 Forme canonique d'un système complexe [104]. . . . .	62
3.4 Niveaux de représentations [106]. . . . .	64
3.5 Flux et effort multi-physiques. . . . .	66
3.6 Représentation multi-physiques d'un groupe motoréducteur. . . . .	67
3.7 Représentation fonctionnelle du composant génération de puissance électro-mécanique. . . . .	67
3.8 Flux et ports fonctionnels. . . . .	69
3.9 Représentation de modélisation fonctionnelle. . . . .	70
3.10 Eléments de base de la modélisation fonctionnelle. . . . .	72
3.11 Représentations des éléments (a) générique et (b) source. . . . .	73
3.12 Représentation de l'élément stockage. . . . .	74
3.13 Représentation de l'élément transformateur. . . . .	75
3.14 Représentation de l'élément distributeur. . . . .	76
3.15 Représentation de l'élément effecteur. . . . .	77
3.16 Effecteur de mobilité d'un véhicule. . . . .	77
3.17 Représentation d'un EOF. . . . .	78
3.18 EOF : une composition des éléments fonctionnels. . . . .	78
3.19 Exemple de système mono-source/multi-consommateurs. . . . .	79
3.20 Exemple de système mono-source/multi-consommateurs (Cas 1). . . . .	80
3.21 Exemple de système mono-source/multi-consommateurs (Cas 2). . . . .	80
3.22 Exemple de système multi-sources/mono-consommateur. . . . .	80
3.23 Exemple de système multi-sources/mono-consommateur (Cas 1). . . . .	81
3.24 Exemple de système multi-sources/mono-consommateur (Cas 2). . . . .	81
3.25 Représentation fonctionnelle d'un système de traitement des eaux. . . . .	83
3.26 Représentation fonctionnelle de distribution des eaux du bâtiment. . . . .	84
4.1 Représentation d'un système complexe au niveau multi-physiques [106]. . . . .	90
4.2 Représentation de l'architecture de commande au niveau fonctionnel et au niveau multi-physiques [106]. . . . .	91
4.3 Chaîne de traction thermique d'un véhicule électrique hybride. . . . .	94
4.4 Les ports et les paramètres d'élément transformateur F-à-M. . . . .	94
4.5 Caractéristiques statiques d'un moteur thermique – (a) puissance de sortie - vitesse, rendement - vitesse ; (b) couple - vitesse. . . . .	95
4.6 Caractéristiques de sortie de la chaîne de traction thermique avec trois rapports de vitesse. . . . .	96
4.7 Caractéristiques statiques couple-vitesse pour trois rapports de vitesse avec les zones de fonctionnement de rendement maximal. . . . .	97
4.8 Caractéristique statique rendement moyen - couple de la chaîne de traction thermique. . . . .	98
4.9 Puissance de charge décomposée en puissances moyenne et dynamique [84, 85].	99
4.10 Systèmes de commande et échanges des flux au niveau fonctionnel et au niveau multi-physiques [106, 107]. . . . .	100
4.11 L'interconnexion entre domaines fonctionnel et multi-physiques [106, 107]. .	101
4.12 Principe de la commande prédictive fonctionnelle (PFC). . . . .	104
4.13 Prédition de la sortie du processus. . . . .	104
4.14 Représentation du système multi-sources/multi-consommateurs. . . . .	109
4.15 Représentation du problème de gestion de ressources décomposé. . . . .	109
4.16 Représentation détaillée du problème d'allocation de ressources en Distributeur – 2. . . . .	110

4.17 Exemple 1 : allocation des ressources réalisée par le Distributeur – 2. . . . .	113
4.18 Exemple 2 : allocation des ressources réalisée par le Distributeur – 2. . . . .	114
4.19 Représentation détaillée du problème d'optimisation en Distributeur – 1. . . . .	115
4.20 Evolution d'énergie stockée selon l'état de charge du stockage électrique ( $SOC_e$ ). . . . .	115
4.21 Représentation de (a) calcul d'énergie de stockage, (b) régulateur de puissance. . . . .	116
4.22 Résultats de simulation avec la chaîne de traction thermique pour la traction du VEH (fonctionnement « boost »). . . . .	118
4.23 Résultats de simulation avec la chaîne de traction thermique et la chaîne de traction électrique pour la traction du VEH (fonctionnement boost). . . . .	119
4.24 Résultats de simulation avec la chaîne de traction thermique pour la traction d'un VEH (fonctionnement « partage de besoin par priorisation »). . . . .	120
4.25 Allocation de besoin en fonctionnement « partage de besoin par priorisation ». . . . .	120
4.26 Résultats de simulation avec la chaîne de traction thermique et la chaîne de traction électrique pour la traction du VEH (fonctionnement « partage de besoin par priorisation »). . . . .	121
5.1 Modèle fonctionnel de contexte du VEH. . . . .	129
5.2 Modèle fonctionnel du VEH - 1. . . . .	130
5.3 Architecture de l'EOF du VEH - 1. . . . .	131
5.4 Modèle multi-physiques du VEH - 1. . . . .	132
5.5 Architecture multi-physiques du système de management d'énergie du VEH - 1. . . . .	133
5.6 Modèle fonctionnel du VEH - 2. . . . .	135
5.7 Modèle Fonctionnel du VEH - 2. . . . .	135
5.8 Résultats de simulation pour les performances préliminaires du véhicule. . . . .	136
5.9 (a) Les modèles connectés, (b) le modèle fonctionnel avec les interfaces d'inter- connexion. . . . .	140
5.10 (a) Interface d'interconnexion entre l'élément transformateur F-à-M et chaîne de traction thermique et (b) ses relations de conversion. . . . .	141
5.11 (a) Interface d'interconnexion entre l'élément transformateur F-à-M et chaîne de traction thermique et (b) ses relations de conversion. . . . .	142
5.12 (a) Interface d'interconnexion entre l'élément transformateur M-à-E et groupe alternateur et (b) ses relations de conversion. . . . .	142
5.13 (a) Interface d'interconnexion entre stockage électrique et groupe batterie; (b) relations de conversion. . . . .	143
5.14 (a) Interface d'interconnexion entre système de freinage et groupe de freinage; (b) relations de conversion. . . . .	144
5.15 Résultats de simulation pour le cycle NEDC avec la stratégie fondée sur des règles. . . . .	147
5.16 Résultats de simulation pour le cycle WLTC avec la stratégie fondée sur des règles. . . . .	148
5.17 Comparaison des horizons pour les critères du véhicule : (a) Consommation de carburant, (b) Nombre de cycle allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique, (c) Consommation de carburant corrigée. . . . .	151
5.18 Comparaison des valeurs de $\alpha_2$ pour les critères du véhicule (a) Consommation de carburant, (b) Nombre de cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique et (c) Consommation de carburant corrigée. . . . .	154
5.19 Résultats de simulation pour le cycle NEDC avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation ». . . . .	156
5.20 Résultats de simulation pour le cycle WLTC avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation ». . . . .	157

5.21 Résultats de simulation en cycle du WLTC obtenus à partir de la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement « boost » . . . . .	159
5.22 Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ . . . . .	161
5.23 Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ . . . . .	162
5.24 Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ . . . . .	163
5.25 Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ . . . . .	165
5.26 Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ . . . . .	166
5.27 Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ . . . . .	167
 B.1 Vitesse et commandes en couple obtenus par application de la stratégie de la commande prédictive (WLTC). . . . .	197
 C.1 Résultats de simulation avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement boost pour le cycle NEDC. . . . .	216
C.2 Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 40\%$ . . . . .	217
C.3 Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 40\%$ . . . . .	217
C.4 Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 40\%$ . . . . .	218
C.5 Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 70\%$ . . . . .	218
C.6 Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 70\%$ . . . . .	219
C.7 Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 70\%$ . . . . .	219
C.8 Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 40\%$ . . . . .	220
C.9 Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 40\%$ . . . . .	220
C.10 Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 40\%$ . . . . .	221
C.11 Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 70\%$ . . . . .	221
C.12 Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ pour $SOC_{e,init} = 70\%$ . . . . .	222

C.13 Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement [ $P_{aux}$ , $\Delta T_{cth}$ ] pour $SOC_{e,init} = 70\%$ . . . . .	222
--	-----



# Liste des tableaux

1.1	Répartition des voitures particulières en [9]. . . . .	2
1.2	Spécifications moyennes des voitures particulières pour UE en 2015 [9]. . . . .	3
2.1	Comparaison entre les architectures des VEHs (1 : Très bien, 2 : Bien, 3 : Acceptable, 4 : Défavorable) [86]. . . . .	38
2.2	Matrice des VEHs selon l'architecture et le niveau d'hybridation [90]. . . . .	39
2.3	Liste des composants de chaîne de traction d'un VEH. . . . .	43
2.4	Comparaison entre différents types des batteries (1 : bien, 5 : mauvais) [91]. .	45
2.5	L'estimation d'autodécharge dans le temps selon les types de batterie. . . .	48
2.6	Comparaison des stockages électriques pour VEHs [98]. . . . .	50
2.7	Comparaison des types de machine électrique utilisables pour la traction des VEHs [100] (1 : Mauvais, 5 : Très Bien). . . . .	55
3.1	Nature des objets et des liens du niveau fonctionnel. . . . .	69
4.1	Exemple 1 : propriétés des éléments de Distributeur – 2. . . . .	112
4.2	Exemple 2 : propriétés des éléments de Distributeur – 2. . . . .	113
5.1	Paramètres des VEHs choisis [130], [131] . . . . .	128
5.2	Représentations des groupes de composants du modèle multi-physiques. . . .	134
5.3	Priorités d'allocation des besoins et de puissances fournies dans les distributeurs. . . . .	146
5.4	Indicateurs de performance pour la stratégie fondée sur des règles (NEDC). .	148
5.5	Indicateurs de performance pour la stratégie fondée sur des règles (WLTC). .	149
5.6	Indicateurs de performance avec la stratégie fondée sur PFC fonctionnement en « partage des besoins par priorisation » (cycle NEDC). . . . .	157
5.7	Indicateurs de performance avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation » (cycle WLTC). . . . .	158
5.8	Indicateurs de performance pour la stratégie fondée sur la PFC, fonctionnement « boost » (WLTC). . . . .	159
5.9	Comparaison des stratégies de gestion d'énergie selon les critères et segments de conduit. . . . .	168
A.1	Gammes des VEHs commercialisés en France [132]. . . . .	187
B.1	Paramètres utilisés pour la commande prédictive dans un cas d'un VEH. . . .	197
C.1	Résultats de simulation pour le cycle NEDC urbain. . . . .	199
C.2	Résultats de simulation pour le NEDC autoroute. . . . .	202
C.3	Résultats de simulation pour l'ensemble du cycle NEDC. . . . .	204
C.4	Résultats de simulation pour le cycle WLTC urbain. . . . .	207

C.5 Résultats de simulation pour le cycle WLTC périurbain. . . . .	209
C.6 Résultats de simulation pour le cycle WLTC autoroute. . . . .	211
C.7 Résultats de simulation pour l'ensemble du cycle WLTC. . . . .	214

## Chapitre 1

# Introduction et revue méthodologique

Les avancées technologiques font évoluer les systèmes énergétiques. Cette évolution mène les systèmes d'une part à devenir plus intelligents, et d'autre part à augmenter leur consommation d'énergie. L'augmentation de l'énergie demandée crée de nombreux nouveaux domaines dans le secteur de la recherche afin de parvenir à une gestion plus efficace de la demande, de faire des progrès en matière d'optimisation énergétique et de disposer de sources additionnelles.

Le dernier sujet pris en considération est la diversité des sources ajoutées dans le système d'énergie. Afin d'augmenter le rendement et aboutir à une utilisation efficace, selon l'IEA (International Energy Agency), diversifier les sources d'énergie est essentiel [1]. Cela conduit à une production décentralisée de l'énergie, solution qui permet en outre la réduction des coûts avec toutefois une augmentation de la complexité. Pour ces raisons, une approche intégrée pour rendre le système « *plus intelligent* », faciliter l'intégration et la gestion systémique de ces sources devient une problématique à résoudre.

Par ailleurs, les changements climatiques et les préoccupations environnementales conduisent les chercheurs et les politiques à prendre des décisions importantes (par exemple, la finalité de la COP21 est l'Accord de Paris). Suite à cet accord, les normes ont été modifiées afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre pour réduire le changement climatique global à une valeur maximale de 2°C [2]. Les avancées technologiques de production et d'exploitation de l'énergie décarbonisée doivent être envisagées en parallèle à ces objectifs climatiques. De plus, ces avancées étant indépendantes, elles doivent être développées et déployées en parallèle [1].

Pour augmenter la performance environnementale, l'électrification des sources et des consommateurs est une des options incontournables. Les autres avantages de cette électrification est l'amélioration du rendement et la flexibilité des systèmes. Cela aide aussi à

l'utilisation intégrée des sources. Un dernier point qui concerne la gestion de la demande d'énergie est la présence de consommateurs bidirectionnels qui conduit à la nécessité du déploiement des stockages électriques. Selon [1], l'exploitation des stockages électriques a augmenté de 50% en 2016. Cela montre que l'électrification des sources et des consommateurs est plus élevée ces dernières années. En outre, selon la même référence [1] le secteur transport représente 27% de la consommation finale d'énergie produite, dont 65% repose sur des combustibles fossiles.

Dans le but de respecter la limite d'augmentation de température à 2°C, le secteur transport doit avoir des perspectives vers l'électrification afin de diminuer ses émissions de gaz à effet de serre. Ce secteur contribue en effet à 23% des émissions globales de gaz à effet de serre et 74% de cette contribution appartient au transport routier [3]. En particulier, en France, le secteur des transports couvre 28% des émissions de gaz à effet de serre [4]. Les véhicules électrifiés sont donc soutenus par l'UE (Union Européenne), les gouvernements ainsi que les associations comme EVI (Electric Vehicle Initiation, [5]), AVERE (Association nationale pour le développement de la mobilité électrique, [6]) ou WEVA (World Electric Vehicle Association, [7]). Par exemple en France, le gouvernement propose des réductions d'impôt pour l'achat de véhicules électriques et des stations de charge, mais aussi une prime à la conversion (pour remplacement d'un ancien véhicule diesel ou essence) [8]. Ces encouragements qui accélèrent la mise en place de la mobilité électrique conduisent à un besoin de développements technologiques pour la production d'énergie électrique ainsi que des infrastructures fortes.

Afin de pouvoir évaluer les performances environnementales des véhicules, la définition des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers est donnée par l'ICCT (International Council on Clean Transportation) [9] : véhicules d'une masse maximale de 3500 kg avec 9 sièges. Dans le cadre de cette thèse, seules les voitures particulières seront prises en compte. Le Tableau 1.1 donne la répartition des voitures particulières existantes dans l'UE par rapport à leur source d'énergie. Dans le monde entier, la vente de véhicules fonctionnant avec du carburant diesel a diminué après la découverte de 2015 (dieselgate, cette découverte est d'utiliser de différentes techniques pour réduire frauduleusement les émissions CO<sub>2</sub>) [10]. En France, le marché des véhicules diesel est plus important que celui de la moyenne de l'UE. Mais comme dans le reste du monde, après le dieselgate et la décision du gouvernement d'uniformiser le niveau de taxes sur le diesel et l'essence, le marché du diesel est en diminution.

TABLEAU 1.1 – Répartition des voitures particulières en [9].

Source d'énergie du véhicule	Pourcentage
Carburant : essence	44%
Carburant : diesel	52%
Hybride – Electrique	2%
Autres	2%

Le Tableau 1.2 donne les spécifications moyennes des voitures particulières pour l'UE. Des cycles d'essais typiques sont créés pour l'évaluation des performances des véhicules selon les normes. Dans l'UE, le cycle d'essais réglementaire est le NEDC (New European

Driving Cycle). Certains cycles réglementaires (NEDC, ECE15, EUDC et WLTC) seront définis dans la Section 2.3.1.

TABLEAU 1.2 – Spécifications moyennes des voitures particulières pour UE en 2015 [9].

Spécifications	Valeurs selon ICCT
Ventes (millions)	13,7
Cylindrée du moteur (l)	1,6
Puissance du moteur (kW)	93
Poids à vide (kg)	1400
Consommation de carburant – NEDC (l/100km)	5,1
Emission CO <sub>2</sub> – NEDC (g/km)	120

Afin d'atteindre les objectifs définis par l'Accord de Paris, une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la consommation de carburant sont visées. Selon [10], en 2020 les émissions de CO<sub>2</sub> doivent diminuer à 95 g/km et la consommation moyenne de carburant à 4 l/100 km. De plus, d'ici 2025, les émissions de CO<sub>2</sub> devront baisser au niveau de 68 - 78 g/km [11]. Ces objectifs sont illustrés par les courbes de la Figure 1.1.

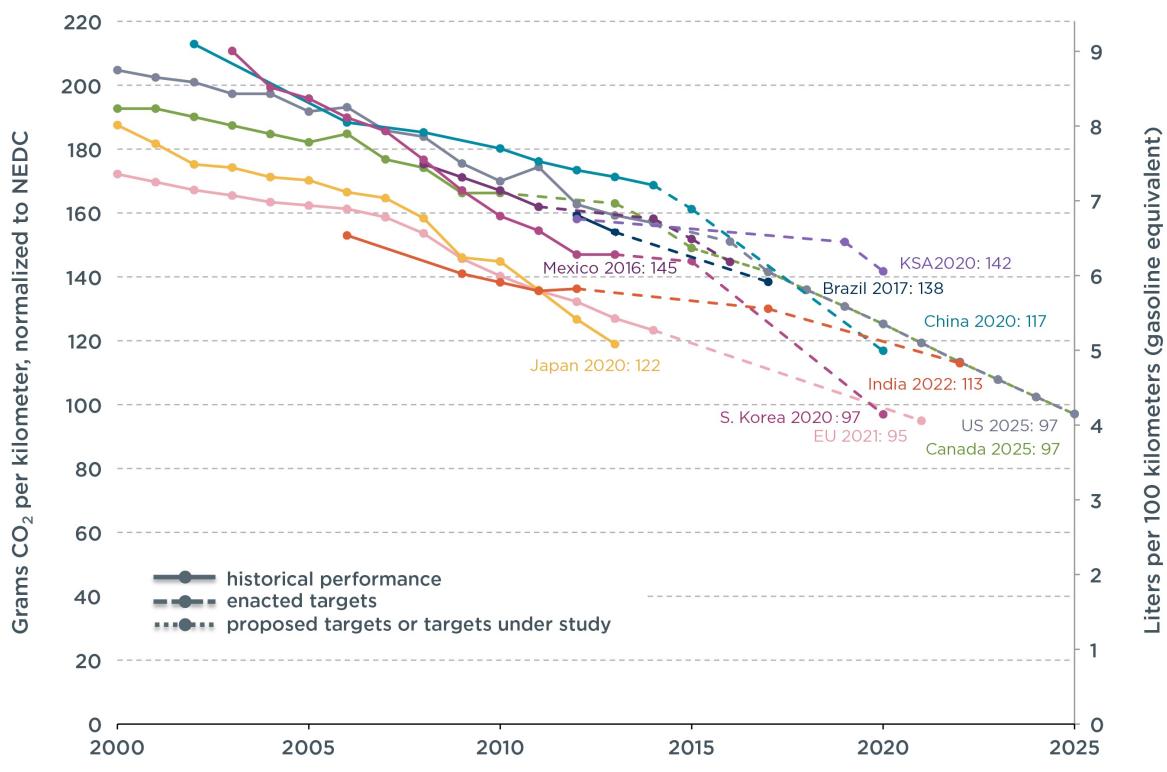


FIGURE 1.1 – Emissions CO<sub>2</sub> et consommation de carburant des voitures particulières, cycle normalisé NEDC [11].

Par ailleurs, pour aboutir à une diminution plus effective, les procédures d'estimation de ces critères doivent représenter le monde réel. Actuellement il existe plusieurs protocoles d'essai harmonisés avec les habitudes de conduite selon les régions pour évaluer les critères définies. Par exemple, au Japon le cycle utilisé est JP08, aux Etats-Unis c'est le cycle combiné

(CAFE, Corporate Average Fuel Economy) et en Europe et Chine le NEDC est utilisé. Ainsi, le même véhicule peut générer des résultats différents pour chaque cycle. Ces protocoles de tests sont à améliorer car il existe une différence importante entre les normes et le monde réel (une comparaison est effectué dans [12, 13] pour le cycle NEDC). Afin de pouvoir effectuer une comparaison et d'obtenir un protocole plus proche de la conduite réelle, la WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures, ou en Français, Procédure d'essai mondiale harmonisée pour les voitures particulières et véhicules utilitaires légers) a été créée. Ce protocole contient le cycle WLTC pour une comparaison des exigences mondiales et pour s'approcher de la conduite réelle [13, 14]. Jusqu'à aujourd'hui la procédure pour calculer des exigences fait appel au cycle NEDC en UE. Avec l'accord concernant l'adoption de normes techniques uniformes applicables aux véhicules à roues [15], les calculs d'exigences seront effectués selon le cycle WLTC dans l'UE et en Chine après 2018.

Une autre remarque à faire sur les véhicules est le progrès de leur technologie. En effet la puissance des moteurs a augmenté et se situe à une moyenne de 95 kW (soit une augmentation de 15% depuis 15 ans), et ceci en parallèle avec une augmentation du poids. Cette dernière propriété est le résultat des composants additionnels liés aux normes de sécurité et de sûreté, et les équipements multimédia dans le véhicule (par exemple, la part due à ces composants dans la *Fiat 500* a doublé depuis les années 60-70) [16].

Concernant la réalisation de ces objectifs, il est possible d'envisager un passage par une phase avec des véhicules électriques hybrides (VEH) afin d'utiliser le potentiel des véhicules conventionnels et les moteurs thermiques jusqu'à leurs limites. Avec cette approche, les émissions de CO<sub>2</sub> peuvent diminuer au niveau de 70 g/km d'ici 2025. Une autre approche pour atteindre ce même objectif de diminution des émissions de CO<sub>2</sub> est le passage directe aux véhicules électrifiés (VE), mais il faut au moins 17% de VEs dans le monde [10]. Pour rendre les véhicules hybrides plus intéressants pour les utilisateurs, le véhicule doit avoir des performances similaires, voire meilleures, que les véhicules conventionnels (véhicules à moteur thermique). Ces performances sont la vitesse maximale, l'autonomie et une consommation faible avec en plus des émissions CO<sub>2</sub> minimales pour respecter les aspects environnementaux.

Les caractéristiques citées précédemment peuvent être atteintes par les avancées technologiques et les optimisations à faire sur le dimensionnement et la gestion d'énergie dans le véhicule. Ces avancées et évolutions font du véhicule un système énergétique avec le besoin de gestion de ses consommateurs et sources. Dans le cadre de cette thèse une approche fondée sur la modélisation des composants et du véhicule dans sa globalité est considérée. Avec cette approche, la gestion d'énergie et les simulations sont assurées dès les premières étapes de conception afin d'évaluer les caractéristiques du véhicule. Dans la suite de ce chapitre, une revue méthodologique sur la modélisation des VEHs est effectuée en prenant en compte les techniques de modélisation des éléments et des véhicules hybrides.

## 1.1 Etat de l'art sur la modélisation des véhicules électrique hybrides

Ces dernières années, les constructeurs automobiles ont réduit le cycle de développement des nouveaux véhicules afin de pouvoir répondre le plus rapidement possible aux clients [17]. Cette réduction est devenue possible grâce à l'amélioration des processus d'Ingénierie Système et à la diminution des essais réels. Selon l'AFIS (Association Française d'Ingénierie Système) [18], l'ingénierie système est une démarche méthodologique globale qui couvre l'ensemble des activités nécessaires pour concevoir, développer, faire évoluer et vérifier un système, apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client, tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes.

Cette démarche est effectuée en trois parties : spécification, conception et réalisation. La partie spécification contient la définition des exigences et missions du système (par exemple pour un véhicule automobile, les missions, de sûreté, de confort...). La partie conception peut contenir le dimensionnement des fonctions clés du système (par exemple gestion d'énergie, gestion des décisions et construction de superviseur, dimensionnement des groupes de composants...). Finalement, concernant la réalisation, la construction des modèles (par exemple modélisation de la chaîne de traction contenant moteur, boîte de vitesse) et des équipements physiques (par exemple machine électrique, batterie...) peuvent être pris en considération. Les parties spécification et conception sont le sujet de la modélisation du système global. En revanche, la partie réalisation fait plutôt appel à la modélisation physique et/ou production des prototypes physiques. Si ce processus est considéré, la partie concernant la modélisation système globale utilise l'approche de modélisation 0D (sans géométrie) contrairement au processus de réalisation qui peut exploiter l'approche de modélisation 2D/3D [19]. Dans les travaux effectués pour le sujet de cette thèse, l'approche de modélisation du système globale (0D) est utilisée et la modélisation énergétique est prise en considération.

Le travail de modélisation consiste à définir et concevoir une représentation mathématique, physique ou logique du système ou fonction ou des composants. Ceci afin de permettre la réalisation d'essais virtuels (simulations) ou pour disposer d'une vision du système dans sa globalité (modélisation systémique). L'utilisation de simulations permet aux chercheurs d'exploiter un banc d'essai virtuel, moins cher et plus sécurisé qu'un banc d'essai réel. De plus, les simulations peuvent être effectuées plus rapidement que des essais réels permettant ainsi de couvrir rapidement un nombre important de cas possibles. Ces modèles de simulation guident les chercheurs et les concepteurs afin d'obtenir une évaluation les phases initiales de conception. Cette représentation mathématique peut être détaillée par le schéma de la Figure 1.2.

L'approche modélisation et simulation des systèmes facilite la conception et la validation du système de commande des systèmes et ses composants. La validation du système de commande dépend des exigences définies à valider, et du système à développer. Une approche dérivée des approches habituelles est illustrée dans la Figure 1.2. Cette approche contient les

phases de validation du système et de son système de commande [20].

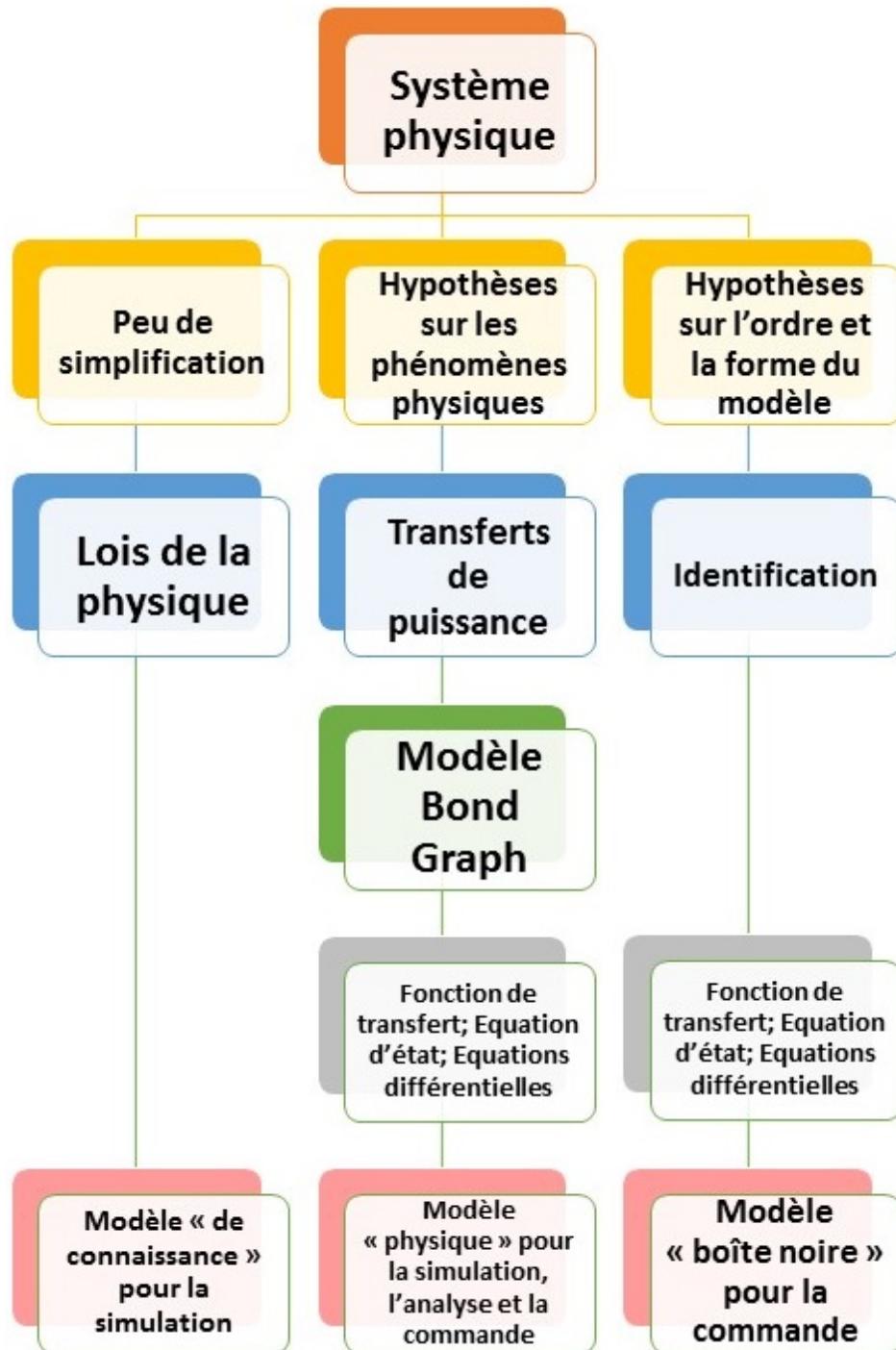


FIGURE 1.2 – Représentation mathématique des systèmes physiques.

Un modèle représente un comportement similaire à celui du procédé mais plus simple [21]. Il est possible de dire qu'un modèle est bien construit s'il associe un bon compromis entre simplicité et similarité au comportement du système. Pour les véhicules hybrides et les composants qui forment le véhicule ainsi que les missions du véhicule, de nombreuses approches de modélisation existent afin de minimiser le temps de validation et de conception du système et de son système de commande [22]. Ces approches diffèrent par les flux

échangés, le formalisme, le détail ou le niveau de la représentation du modèle.

### 1.1.1 Approche Bond-Graph

La modélisation énergétique, utilisée pour la conception et la validation des systèmes a déjà été abordée par différentes approches. Un exemple très connu est la méthode Bond-Graph (ou graphe à liens, ou graphe de liaisons) qui a été proposée par Henry M. Paynter en 1955 [23]. Les sémantiques de ses travaux sont réalisés par Karnopp et Rosenberg en 1983 [24]. Son arrivée en Europe a été possible à la fin des années 70. C'est un langage de représentation des transferts de puissance au sein d'un système. Cette approche est montée en puissance dans les environnements industriels et académiques afin de modéliser les systèmes énergétiques. De plus, la méthode Bond-Graph est unifiée pour tous les domaines de la physique. La théorie est fondée sur des interactions de causalité (les relations de cause à effet) de flux et d'effort (des exemples physiques sont données dans le [Section 3.2](#)) des éléments et des jonctions, et elle utilise les comportements physiques pour une représentation de la nature des systèmes (par exemple mécanique ou électrique) [25]. Ce lien apporte ainsi le concept de causalité au modèle du système. De plus, la multiplication des grandeurs flux et d'effort échangés donne un résultat en puissance. La représentation Bond-Graph contient les éléments de base suivants :

- Eléments passifs (reçoivent de la puissance) :
  - R : dissipation d'énergie (exemples : diode, amortisseur...),
  - C : stockage d'énergie (exemples : condensateur, ressort...),
  - I : stockage d'énergie (exemples : masse, inertie...),
- Eléments actifs (fournissent la puissance) :
  - Se : source d'effort (exemples : pesanteur, générateur de tension...),
  - Sf : source de flux (exemples : pompe, générateur de courant...),
- Eléments de jonction (conservatifs de la puissance) :
  - 0 : elle est utilisée pour coupler les éléments soumis au même effort (exemples : couplage série en mécanique, couplage parallèle en électrique...),
  - 1 : elle est utilisée pour coupler les éléments soumis au même flux (exemples : couplage parallèle en mécanique, couplage série en électrique...),
  - TF : elle est utilisée pour coupler des variables de même type dans des domaines différents (exemples : levier, transformateur électrique...),
  - GY : elle est utilisée pour coupler des variables de type opposé (effort - flux) dans des domaines différents (exemples : machine électrique...).

Ces éléments généralisés avec les variables généralisées (effort et flux avec l'addition du déplacement -  $q = \int f$ , et l'énergie de moment -  $p = \int e$ ) permettent aux chercheurs et concepteurs de :

- Faciliter le dialogue entre spécialistes de domaines physiques différents,
- Structurer la démarche de modélisation,
- Avoir un langage de représentation unifié,
- Simplifier la construction de modèles pluridisciplinaires,
- Fait apparaître explicitement les transferts de puissance et les relations de cause à effet,
- Permettre de faire des bilans énergétiques.

Un exemple d'un modèle de système électromécanique de moteur électrique en représentation Bond-Graph est illustré par la Figure 1.3.

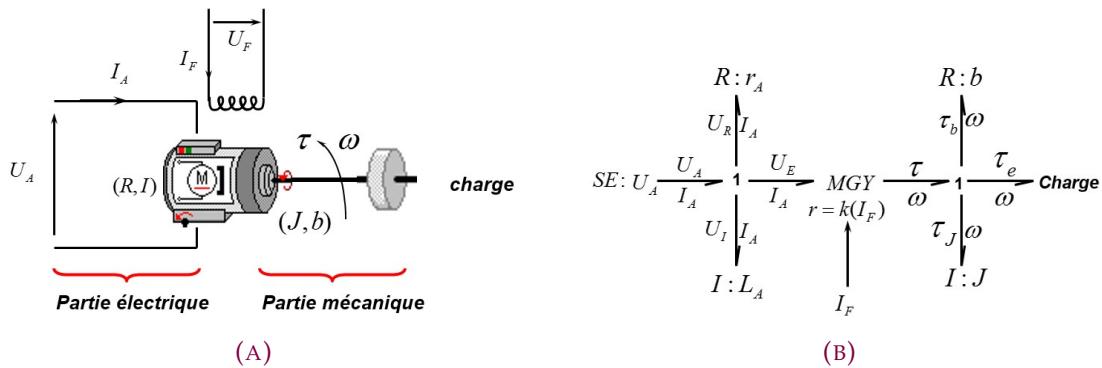


FIGURE 1.3 – Exemple de représentation Bond Graph d'un moteur électrique.

Variés formalismes de la modélisation multi-physiques fondées sur l'approche Bond-Graph sont proposés : par exemple i) PhiGraph [17, 26] ; ii) REM (Représentation Energétique Macroscopique) [27] ; iii) modélisation par flux de puissance [28, 29].

#### 1.1.1.1 PhiGraph (Sherpa Engineering)

La causalité des liens entre les blocs est une chose qui limite la modélisation des systèmes physiques dans un environnement de diagrammes de blocs. En effet, dans un outil comme Simulink, les connexions entre blocs sont des flèches indiquant la direction du flux de calcul. Mais si l'on considère une connexion physique entre deux systèmes, on ne peut pas présumer du sens du flux de calcul et de plus l'information doit transiter dans les deux sens. Selon la théorie du Bond-Graph, les systèmes physiques sont interconnectés avec des liens qui transportent une certaine quantité d'énergie par unité de temps définie par le produit de deux variables : l'effort et le flux. Pour garantir la conservation de la masse et de l'énergie sur un système fermé, un système ne peut pas imposer à la fois l'effort et le flux : si le flux est une sortie, l'effort doit être une entrée.

L'approche PhiGraph est une méthodologie pour programmer les modèles et libraires des systèmes multi-physiques dans un environnement de digrammes par blocs. C'est un concept adapté à l'approche Bond-Graph, il permet de définir les règles afin de représenter les interfaces physiques entre les sous-systèmes et de lier les éléments. Les prolongements de

cette approche sont Phi-Link et PhiSim. Phi-Link inclut une méthodologie qui contient divers nœuds (c'est l'entrecroisement de plusieurs composants) de ports (où l'échange de flux et effort est effectué) et la possibilité de développer des modèles multiports [26]. Finalement, PhiSim est une extension de concept PhiGraph utilisant l'approche Phi-Link. Il consiste à garder un signal en apparence sur la représentation au moyen de diagramme par blocs et à transporter l'information de rétroaction à travers des liens virtuels [30].

Dans le cadre de cette thèse, le formalisme PhiGraph avec l'outil PhiSim sont utilisés pour le développement d'une représentation et d'un modèle multi-physics du véhicule qui sera considéré pour les cas d'étude envisagés.

### 1.1.1.2 REM (Représentation Energétique Macroscopique)

La Représentation Energétique Macroscopique est introduite dans [27] et elle peut être considérée comme un prolongement du Graph Informationnel Causal (GIC) introduit par [31]. La REM est développée pour la représentation des systèmes électromécaniques complexes. Ce formalisme offre un point de vue plus énergétique que le GIC. Pareillement à PhiGraph, ses sémantiques s'appuient sur les éléments avec des multiports. Ses échanges représentent des variables de flux et d'effort.

Contrairement au formalisme Bond-Graph, les modèles sont bien plus détaillés avec les représentations des fonctionnements comme la dissipation et le stockage [32]. La REM est utilisée pour des systèmes énergétiques variés et a été le sujet de différentes thèses de l'Université de Lille [33-37]. Cette représentation peut mener aussi à la conception du système de commande par inversion du modèle [38].

### 1.1.1.3 Modélisation par flux de puissance

La modélisation par flux de puissance est un formalisme fondé sur Bond-Graph et il est développé par [28, 29]. Dans ce formalisme, la multiplication d'effort et de flux existants dans les liens multi-physics des Bond-Graphs, donne la puissance. Cette puissance est utilisée pour l'échange entre les composants. L'objectif de cette modélisation est de représenter les composants sous forme de rendement des groupes des composants du système. Ce rendement peut être constant ou peut varier par rapport à un phénomène énergétique [39]. Les éléments utilisés pour ce type de modélisation sont montrés en Figure 1.4.

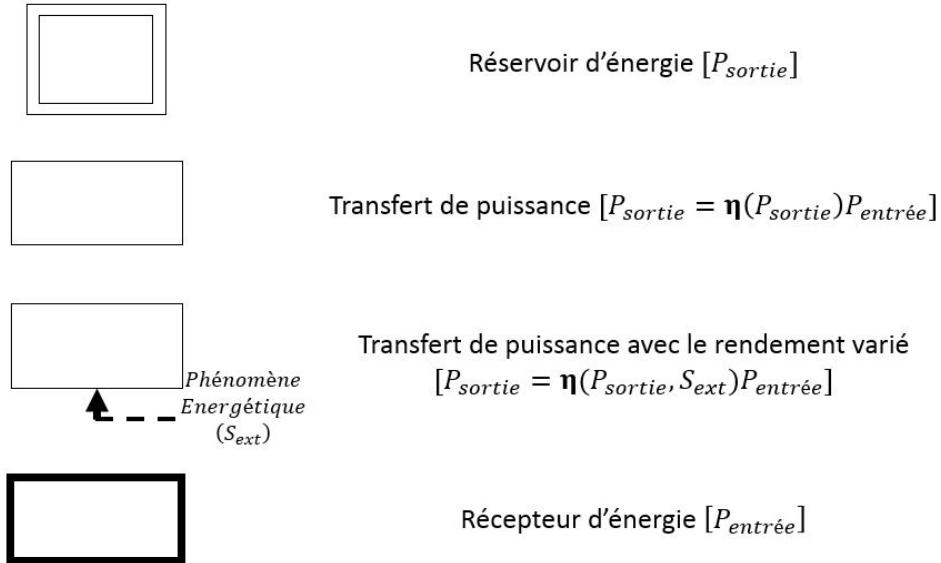


FIGURE 1.4 – Eléments de base de modélisation par flux de puissance [39].

L'exemple d'un véhicule électrique modélisé par la modélisation par flux de puissance est illustré par le schéma de la Figure 1.5 :

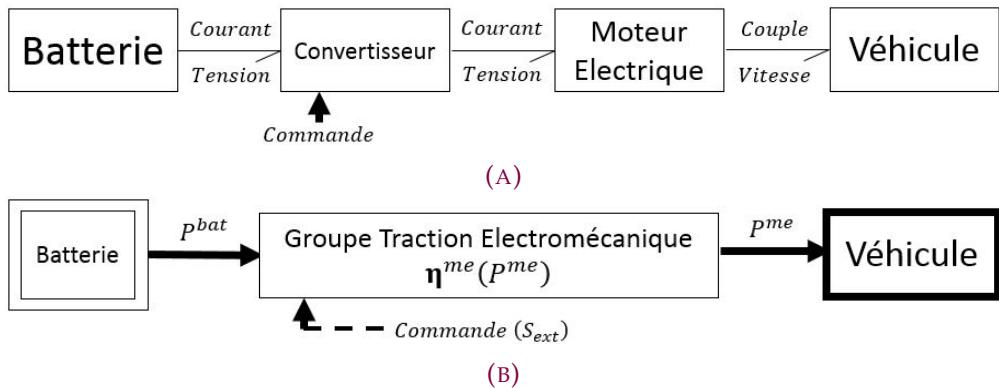


FIGURE 1.5 – Modèle du véhicule électrique (a) façon Bond-Graph, (b) façon modélisation par flux de puissance.

où  $P^{me} = \eta^{me}(P^{me}, S_{ext})P^{bat}$ . Dans ce type de modélisation, afin de calculer le rendement, une cartographie globale des composants peut être prise en considération. Afin d'obtenir ces informations, un logiciel type PSAT peut être utilisé.

Les approches existantes de modélisation sont utilisées dans le milieu de la recherche industrielle facilitant l'analyse du comportement du système et de ses composants. Dans le cadre de cette thèse, une méthodologie de modélisation simplifiée en prenant en compte les comportements physiques des groupes des composants est proposée et étudiée. Les sorties attendues et les objectifs de la modélisation « juste nécessaire » et modulaire seront détaillés dans la Section 1.3.

## 1.2 Optimisation énergétique des véhicules automobiles

L'optimisation énergétique des véhicules automobiles est un sujet très étudié ces dernières années. Le besoin d'amélioration du rendement global des véhicules afin d'aboutir à un niveau de performance selon les normes, et les réglementations, et aussi pour diminuer les effets environnementaux néfastes comme ceux cités dans la [Section 1.1](#), ont conduit les chercheurs à optimiser énergétiquement les systèmes des véhicules conventionnels. Cela a mené l'industrie à développer des chaînes de traction thermique avec des meilleurs rendements. Une autre exploitation de ces progrès est le développement du marché des véhicules électrifiés depuis la fin des années 90. Dans le cas des véhicules hybrides électrifiés, les niveaux et types d'optimisation énergétique possibles peuvent être définis comme illustré sur la [Figure 1.6](#).

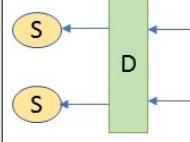
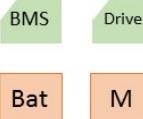
	CONTROLE	DIMENSIONNEMENT
N.1		<p>Niveau Système de Mission :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Architecture de la chaîne de traction</li> <li>• Architecture de la climatisation</li> <li>• ...</li> </ul>
N.2		<p>Niveau Fonctionnel :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stockage électrique</li> <li>• Stockage fuel</li> <li>• Puissance électrique</li> <li>• ...</li> </ul>
N.3		<p>Niveau Multi-Physique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau tension</li> <li>• Couple</li> <li>• Transmission</li> <li>• Machine Electrique</li> <li>• ...</li> </ul>

FIGURE 1.6 – Niveaux et types d'optimisation des véhicules hybrides électrifiés.

L'optimisation du premier niveau, nommé système décisionnel permet de sélectionner les architectures (chaîne de traction, climatisation, ...) et de paramétrier les priorisations pour avoir les propriétés du véhicule. Dans le deuxième niveau du système, l'optimisation de la commande du système (contrôle) a un rôle très important sur les performances attendues des VEHs. Cela peut affecter directement la consommation de carburant, donc les émissions CO<sub>2</sub>, et même les performances comme la vitesse maximale et le temps d'accélération. Ce type et ce niveau d'optimisation sont également importants pour tous les types de véhicules (conventionnel, hybride électrique, électrique). L'optimisation de la commande à ce niveau peut être considérée comme une gestion des ressources. Dans le cadre de cette thèse ce type d'optimisation est étudié. L'optimisation du dimensionnement dans le même niveau est aussi importante. Les puissances minimales/maximales et les limitations énergétiques sont définies dans cette partie. Dans le dernier niveau du système, l'optimisation de contrôle est la commande rapprochée. Cette optimisation est utilisée pour les contrôleurs locaux. Enfin,

le dimensionnement géométrique ou le dimensionnement des limitations physiques sont effectués à ce niveau d'optimisation.

Comme citée précédemment, dans le cadre de cette thèse, l'optimisation au niveau de la gestion des ressources est considérée. Celle-ci est un sujet très abordé dans le secteur automobile pour les véhicules hybrides tant dans le milieu industriel que dans le milieu académique. Dans un premier temps une étude des stratégies de gestion d'énergie est effectuée en fonction de l'optimalité de la solution déterminée et du profil de puissance demandée (considéré connu *a priori* ou inconnu). Dans le cadre des travaux de thèse réalisés, les approches proposées pour les VEHs sont divisées en deux catégories :

- i. Stratégies de gestion d'énergie fondées sur des règles,
- ii. Stratégies de gestion d'énergie utilisant des algorithmes d'optimisation.

Etant donné que l'objectif principal est la minimisation de la consommation de carburant, l'objectif du système de commande consiste à déterminer les commandes (consignes de puissance) nécessaires pour accomplir les missions du véhicule en utilisant les mesures ou les estimations des grandeurs significatives du système comme données d'entrée, tout en respectant des critères liés à la consommation de carburant ou les performances du véhicule [40].

### 1.2.1 Stratégies de gestion d'énergie fondées sur des règles (stratégies heuristiques)

Ce type de stratégie de gestion de l'énergie est fondé sur l'expertise d'utilisateur, l'intuition, les heuristiques et même sur les modèles mathématiques [41]. Ils n'ont pas besoin d'une connaissance à priori de la mission du véhicule. Les règles définies pour l'optimisation énergétique peuvent être construites de différentes façons. Ces règles peuvent être très simples, par exemple conserver l'état de charge de la batterie pendant le mouvement dans les limites prédéfinies et utiliser la chaîne de traction électrique quand l'état de charge atteint ces limites. Ces règles peuvent également être plus complexes, par exemple conserver l'utilisation de la chaîne de traction électrique à certaines vitesses du véhicule ou lors de certaines demandes de puissance.

Les stratégies fondées sur des règles pour la gestion énergétique des VEHs ont pour but ultime de garder le point de fonctionnement où le rendement global est le plus élevé possible. Il y a deux types de stratégies utilisées en général : déterministe [42] et logique floue [43]. Ces stratégies reposent sur des informations intégrant la dynamique des composants du véhicule, obtenues à partir des mesures ou d'estimations des grandeurs d'intérêt. Des machines d'état et des organigrammes sont établis pour déterminer la prochaine commande à appliquer à partir de la commande précédente et de la dynamique des composants afin de maximiser le rendement global du véhicule. Les avancées effectuées en logique floue orientent les chercheurs ([43] par exemple) car ils contribuent à un contrôleur haut-niveau pour l'optimisation globale du système et de plus réduisent la charge de calcul [40].

Par exemple, dans les travaux de [42] une stratégie de gestion d'énergie pour un véhicule hybride rechargeable est prise en considération. Les simulations sont effectuées pour la stratégie proposée avec des cycles de conduites prédéfinis. La comparaison des résultats est effectuée entre la stratégie de gestion d'énergie d'un véhicule hybride parallèle proposée par l'outil ADVISOR (ADvanced VehIcle SimulatOR, c'est est un ensemble de modèles, de données et de fichiers texte de script dans l'environnement Matlab/Simulink, développés par NREL (National Renewable Energy Laboratory), la stratégie de gestion d'énergie utilisée dans Toyota Prius et la stratégie de gestion d'énergie pour un véhicule hybride rechargeable proposée dans ces travaux. La consommation de carburant est définie comme l'indicateur de performance à évaluer pour cette application. Une amélioration sur la consommation de carburant de 6% est notée en utilisant la stratégie de gestion d'énergie proposée dans ces travaux par rapport à l'utilisation de la stratégie de l'outil ADVISOR, et une amélioration de 16% par rapport à l'utilisation de la stratégie utilisée dans Toyota Prius.

Un autre exemple est donné dans [44], où une stratégie de gestion d'énergie en utilisant la programmation dynamique et une stratégie fondée sur des règles sont comparées. Le véhicule hybride étudié a une architecture parallèle. Il résulte de l'utilisation des deux stratégies que la consommation de carburant est comparable (3,71 l/100 km pour la stratégie avec programmation dynamique et 3,77 l/100 km pour la stratégie fondée sur des règles). Mais la différence importante entre les résultats des deux stratégies est le temps de calcul. Pour la programmation dynamique, le temps de calcul est de 420 s et pour la stratégie fondée sur des règles, ce critère est de 2 s. Cela montre que pour des performances similaires, la stratégie fondée sur des règles a besoin d'une puissance de calcul peu importante contrairement à la stratégie fondée sur la programmation dynamique.

### 1.2.2 Stratégies de gestion d'énergie fondée sur des méthodes d'optimisation

Les mesures qui décrivent le comportement des composants et les cycles de conduite du véhicule doivent être précises et correctes afin de pouvoir utiliser le contrôleur de façon efficace. Les avancées technologiques des capteurs (pour les mesures) et la possibilité de connaître le chemin parcouru d'un véhicule accroissent les perspectives des travaux de développement des algorithmes d'optimisation en ligne. Contrairement aux stratégies de gestion d'énergie fondées sur des règles, celles utilisant des algorithmes d'optimisation cherchent plutôt la solution optimale à partir d'une fonction de coût. Les approches peuvent être divisées en deux catégories : l'optimisation fondée sur les données historiques (hors-ligne) et l'optimisation fondée sur les données en temps réel (en ligne) [40, 41].

Les contrôleurs qui adoptent la stratégie d'optimisation sur les données historiques cherchent le minimum de la fonction de coût dans le cas d'un cycle de conduite prédéfini avant la mise en œuvre dans le véhicule. Un exemple d'approche de cette méthode peut être la programmation dynamique. Comme c'est une méthode d'optimisation hors-ligne, elle est dépendante du cycle de conduite et de l'architecture de la chaîne de traction [40]. Par conséquent, leur implémentation sur des VEHs avec des architectures complexes de la

chaîne de traction, devient aussi complexe et nécessitent une puissance de calcul importante. D'autres approches d'optimisation permettant d'obtenir des solutions hors-ligne sont les algorithmes génétiques [45].

D'autre part, les superviseurs utilisant des problèmes d'optimisation résolus en temps réel font appel à des approches telles que la stratégie de minimisation de la consommation équivalente (en anglais, ECMS : Equivalent Consumption Minimization Strategy), la stratégie de la commande prédictive à base de modèle (en anglais, MPC : Model Predictive Control) ou de la commande prédictive fonctionnelle (en anglais, PFC : Predictive Functional Control).

### 1.2.2.1 Minimisation de la consommation équivalente (ECMS)

Cette méthode d'optimisation consiste à évaluer la fonction de coût comme une somme de la consommation de carburant et de la consommation de carburant corrigée. La consommation corrigée est calculée en utilisant la variation de l'état de charge de la batterie [46]. Comme les consommations de la source carburant et de la source électrique ne sont pas directement comparables, un facteur d'équivalence est nécessaire. Ce facteur peut être calculé par les trajectoires énergétiques moyennes des sources du véhicule. Comme les rendements des composants peuvent différer selon les zones d'opération, cette méthodologie est valable pour les évaluations des valeurs moyennes. Dans le [Chapitre 5](#), un des critères d'évaluation de la performance du véhicule, la consommation corrigée, est calculée en considérant cette approche, mais elle n'est pas utilisée pour l'optimisation énergétique du véhicule dans le cadre de cette thèse.

Dans [47], une stratégie de gestion d'énergie fondée sur la minimisation de la consommation équivalente est mise en œuvre pour les véhicules hybrides avec une architecture de chaîne de traction parallèle. Les simulations sont effectuées pour un cycle de conduite NEDC, pour un véhicule hybride ayant un moteur thermique, lequel s'il est utilisé seul (fonctionnement comme un véhicule conventionnel) conduit à une consommation de carburant de 8 l/100 km. Les résultats des simulations montrent que le véhicule hybride pris en considération a une consommation de carburant de 6,9 l/100 km, et en complément à ce résultat une augmentation de l'état de charge de la batterie de 1,5% est remarquée. Finalement, si cette augmentation est considérée, une consommation de carburant de 6,6 l/100 km est estimée et menant ainsi à une amélioration de 17,5% de la consommation de carburant.

Un autre exemple pour cette stratégie est décrit dans [48]. Cette analyse a été effectuée par TU Eindhoven et porte sur l'utilisation d'un démarreur-générateur intégré pour l'hybridation du véhicule considéré. Dans la stratégie proposée, la consommation de carburant pour charger la batterie est exprimée en fonction de la puissance utilisée. Ainsi, la consommation équivalente de la chaîne de traction électrique est prise en considération et avec cette valeur la consommation de carburant totale (la consommation corrigée) est utilisée. Les simulations sont effectuées avec un cycle de conduite NEDC comme dans l'exemple précédent, et les résultats de ces simulations illustrent que la performance de la stratégie de gestion d'énergie dépend aussi de la variation de l'état de charge de la batterie. Cela montre que dans cette

application, conserver l'état de charge à son niveau initial peut générer des dynamiques importantes aux composants et augmenter la consommation. Mais conserver l'état de charge initial en fin de conduite (pour le segment de conduite type autoroute pour ce cycle) et pas dans l'ensemble du cycle peut être avantageux selon les résultats de cet exemple. Néanmoins, l'écart entre les résultats est faible ( $\sim 1\%$ ). En conclusion, les auteurs précisent que la stratégie proposée pour l'implémentation dans le véhicule exclut des algorithmes d'optimisation complexes.

### 1.2.2.2 Commande prédictive (MPC)

La commande prédictive (en anglais MPC : Model Based Predictive Control) est une stratégie de commande fondée sur l'utilisation explicite d'un modèle pour prédire la sortie du processus sur une durée relativement importante. Plus précisément, ce n'est pas une stratégie spécifique mais un ensemble de techniques de commandes fondée sur des principes communs [20, 41, 49-55].

MPC a certains avantages par rapport à d'autres types de méthodes. Il permet :

- i. de résoudre des problèmes de commande pour des systèmes ayant une dynamique importante,
- ii. de traiter les systèmes multivariables,
- iii. d'introduire naturellement une compensation des perturbations mesurées,
- iv. de prendre en compte des contraintes sur une variable manipulée ou une variable contrôlée.

En revanche, MPC nécessite un temps de calcul relativement important ce qui représente un handicap important pour les processus rapides (systèmes mécaniques, robotique, ...).

Le désavantage principal est la nécessité d'un modèle représentant fidèlement le comportement dynamique du procédé. Une modélisation ou une identification du système est donc nécessaire ce qui représente, en général, un investissement important. La mise au point de la commande MPC peut être ensuite rapide.

Les principes d'une commande MPC sont :

- A chaque instant  $t$ , la sortie du processus est prédite sur un horizon relativement long (par rapport à l'approche PFC, Commande Prédictive Fonctionnelle). La prédiction utilise un modèle du procédé, elle dépend aussi du scénario de commande qu'on désire appliquer à partir de l'instant  $t$ .
- Une suite de commandes est ensuite déterminée de manière à minimiser l'écart entre la prédiction de la sortie du processus et la trajectoire de référence. Il est à noter que, dans la plupart des méthodes, la commande est créée dans le futur.
- Le premier échantillon de la séquence « *optimale* » de commande est appliqué. Les autres éléments ne seront pas utilisés : toute la procédure sera réitérée à l'instant suivant  $t + 1$ . Ce principe est appelé « *stratégie à horizon glissant* ».

La stratégie décrite ci-dessus met en évidence les éléments caractéristiques d'une commande MPC :

- prédition à l'aide d'un modèle,
- choix d'une trajectoire de référence,
- développement de la commande future,
- algorithme d'optimisation du scénario de commande.

Pour chacun de ces éléments, plusieurs options sont possibles, ce qui différencie entre elles les méthodes MPC. Des détails et une application sur un véhicule hybride électrique sont données en [Annexe B](#).

Dans [49] un cas d'étude est abordé avec l'application de gestion d'énergie d'un véhicule hybride rechargeable (poids-lourd, par exemple bus). Dans cette application, le véhicule hybride a plusieurs éléments de stockage électrique (batterie et super capacité) avec un ensemble d'éléments de puissance (chaîne de traction thermique) pour la traction. L'approche proposée fait appel à l'utilisation de MPC pour la répartition de puissance entre les stockages électriques et une stratégie fondée sur des règles pour la répartition de puissance entre les chaînes de traction thermique et électrique. Le processus de l'approche MPC utilise la prédition sur un horizon fixé de la vitesse future. La résolution a été effectuée par programmation dynamique afin d'optimiser la stratégie de commande. L'approche est évaluée selon trois cycles de conduite différents. Ces cycles sont adaptés pour l'utilisation dans des applications pour des véhicules poids-lourd. Les résultats montrent que l'approche proposée dans les travaux effectuées conduit à une amélioration de la consommation de carburant de 21,88% pour le cycle Manhattan.

Un autre exemple [52] porte sur une application d'un véhicule hybride avec une architecture Séries (en anglais range-extender). Les auteurs utilisent l'information obtenue par le système de navigation pour le déplacement du véhicule afin de résoudre le problème d'optimisation globale hors-ligne. La commande prédictive proposée assimile cette trajectoire obtenue hors-ligne (trajectoire de l'état de charge de la batterie) comme des points de consigne pour chaque horizon glissant. Les simulations sont effectuées avec un état de charge initial de la batterie de 50% et les résultats des simulations montrent une amélioration de 15,18% de la consommation de carburant pour le cycle de conduite donné.

Un dernier exemple de la commande prédictive pour la gestion d'énergie d'un véhicule hybride est décrit dans [54]. Ce travail a été réalisé par le National Cheng Kung University, Taiwan. Dans ces travaux, un véhicule hybride rechargeable est pris en compte. Une approche est proposée pour la gestion des ressources entre les chaînes de traction électrique et thermique pour une architecture parallèle afin de réduire la consommation de carburant. La stratégie présentée est utilisée pour déterminer les cycles d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique. Les simulations sont effectuées avec 6 cycles NEDC et 6 cycles UDDS, au lieu d'un seul cycle de chaque norme de conduite, pour prolonger les distances parcourues en traction électrique (car les PHEV ont des stockages électriques avec des capacités relativement

importantes) afin d'obtenir une meilleure estimation de la consommation de carburant. Les résultats de simulation montrent une amélioration comprise entre 18,3% et 3,9% pour les cycles NEDC et entre 10,3% et 3,7% pour les cycles UDDS comparativement aux stratégies fondées sur des règles et ECMS.

#### 1.2.2.3 Commande prédictive fonctionnelle (PFC)

La commande prédictive fonctionnelle (en anglais, PFC : Predictive Functional Control) est une méthode de commande appartenant à la famille des commandes MPC. Elle diffère des autres méthodes par le choix des éléments principaux qui seront précisés dans la [Section 4.2](#).

Dans la littérature, cette approche est utilisée plutôt pour des applications industrielles mais les exemples sur les applications des véhicules hybrides de la MPC peuvent être considérés ainsi pour PFC [20, 56-58].

Ces stratégies de gestion d'énergie utilisant des méthodes d'optimisation doivent être résolues par des méthodes de résolutions adaptées : la programmation dynamique [59-62], la programmation quadratique [50], [63-65] (procédé qui permet de trouver une solution à un problème d'optimisation quadratique, elle est utilisée dans ces travaux pour résoudre le problème d'optimisation posé par la commande prédictive dans le [Chapitre 4](#)), la programmation linéaire [66] (méthode permettant de résoudre un problème d'optimisation linéaire) et les algorithmes génétiques [67, 68].

## 1.3 Motivations et pistes de travail envisagées

Le contexte économique et écologique évoqués dans la [Section 1.1](#) encourage les constructeurs automobiles au développement d'une gestion énergétique innovante faisant intervenir à la fois une combinaison des composants énergétiques, des lois de commande appropriées et une électronique adaptée en conséquence. La complexité de cette problématique est double : d'une part la variété importante de sources énergétiques et des architectures, d'autre part, la globalité de la problématique énergétique qui doit minimiser la consommation en satisfaisant de multiples prestations dans des situations de vie diversifiées. Il faut également noter l'aspect multicritères qui est parfois à considérer sur le cycle de vie du véhicule.

Si on ajoute à cela le « *temps nécessaire d'industrialisation* » qui a tendance à diminuer, nous mettons en évidence la difficulté des concepteurs à proposer une solution innovante, performante, fiable et viable d'un point de vue économique et écologique.

D'un point de vue technique, les concepteurs d'architectures énergétiques évaluent dans un premier temps leurs solutions candidates en simulation. Cette simulation utilise un modèle du véhicule, dit énergétique, fondé sur des équations analytiques (typiquement le premier principe de la dynamique). Ces modèles, actuellement très répandus dans le secteur automobile, utilisent des modèles de chacun des équipements de l'architecture sélectionnée.

Les difficultés rencontrées à ce niveau sont multiples. Principalement :

- Comment définir le modèle et son paramétrage alors que les équipements n'existent pas encore ?
- Nécessité de revoir l'ensemble du superviseur énergétique à chaque modification de l'architecture.

Ces difficultés allongent sensiblement le temps de l'évaluation, ce qui se traduit par la diminution du nombre de solutions potentielles analysées ou l'allongement du temps de conception.

Face à ces défis, il est indispensable de mettre au point une nouvelle méthodologie outillée, toujours fondée sur la modélisation, mais utilisant le niveau d'abstraction *juste nécessaire* et intégrant de façon modulaire des modèles fonctionnels et des stratégies de gestion d'énergie.

Le premier objectif est de développer un outil de simulation pour l'évaluation de l'ensemble producteur multi-énergie d'un véhicule automobile hybride. Cet outil aura pour finalité d'être le support à l'évaluation rapide de différentes architectures et stratégies de gestion d'énergies. L'évaluation étant multicritères : performance, consommation, confort, autonomie, coût, ...

Pour répondre à la problématique, il est important de se contraindre selon les principes suivants :

- Simulation du système (véhicule hybride) dans sa globalité en se focalisant sur le point de vue énergétique des prestations,
- Modélisation avec un niveau d'abstraction *juste nécessaire* permettant de faire des bilans énergétiques pour une série de scénarios,
- Stratégie de gestion d'énergie modulaire pour s'adapter rapidement à toute architecture retenue,
- Extraction du modèle et de la stratégie obtenue afin de l'utiliser comme superviseur des niveaux d'abstractions complexes.

Dans ce cadre, l'objectif des travaux de recherche est de répondre à certaines questions, à savoir :

- i. Quel est le formalisme de modélisation à adopter ? Le niveau fonctionnel semble le mieux adapté. Est-il suffisant et comment le formaliser ?
- ii. Comment assurer une optimisation globale et une modularité ? Quelles stratégies de gestion d'énergie à utiliser ?
- iii. Comment aider les concepteurs à remodéliser leur système avec une représentation fonctionnelle sachant qu'ils disposent d'un modèle composant relativement complexe ?
- iv. Comment faire l'extraction du modèle choisi et comment l'intégrer dans les modèles plus évolués ?

### 1.3.1 Modélisation fonctionnelle

L'importance de la modélisation fonctionnelle a été mise en évidence par [69] et a été reprise ensuite par la plupart des théoriciens des systèmes complexes [70-72] et en particulier avec la méthode Sagace [71] et la théorie Axiomatic Design [72]. Cependant, le formalisme à utiliser (équations, flux de variables, ...) est, peu, voire pas du tout précisé dans la littérature.

Malgré tout, quelques invariants peuvent se dégager :

- Le modèle peut être construit à partir d'un ensemble restreint de processeurs opérant une transformation selon l'une des 3 catégories : temporelle (T), spatiale (espace – E) ou de la forme (F),
- Les flux échangés entre ces processeurs sont des flux de matière, d'énergie ou d'information.

A titre d'exemple, si on s'intéresse à la mobilité d'un véhicule : c'est le moteur et son pilotage qui va fournir la puissance de traction demandée en prélevant l'énergie nécessaire et disponible dans le stockage.

C'est dans cette direction que nous proposons de poursuivre les travaux en prenant comme cas d'étude la représentation énergétique d'un véhicule hybride qui présente une grande diversité d'architectures et d'usages. L'objectif étant de pouvoir formuler, avec la complexité juste nécessaire, la représentation fonctionnelle d'un système.

### 1.3.2 Optimisation modulaire

Une des principales avancées des travaux de thèse de C. Fauvel (effectué en collaboration avec Sherpa Engineering) est la division du problème d'optimisation globale en modules de deux natures [32] :

- Problème inter-sources : choix du meilleur prélèvement aux sources pour un besoin donné,
- Problème inter-clients : arbitrage des prestations pour une disponibilité énergétique donnée.

Cette division, a priori astucieuse, pose le problème de l'obtention d'un minimum local : le découpage d'un problème d'optimisation en sous-problèmes ne garantit pas la convergence vers le minimum global. Il est donc important d'introduire une flexibilité et des indicateurs de performance de l'optimisation pour s'assurer que le résultat obtenu est satisfaisant. C'est cet aspect qui constitue le verrou à lever dans les travaux de recherche. Il faut aussi bien sélectionner et adapter les algorithmes d'optimisation adéquats.

Cette étude porte sur la modélisation, l'analyse des performances et la minimisation de la consommation de carburant en respectant les missions à saisir d'une chaîne de traction d'un véhicule hybride. L'association d'un moteur à combustion interne et d'un

moteur électrique avec des sources additionnelles de génération/stocage d'énergie permet la réduction de la consommation de carburant et donc des émissions de  $CO_2$ . Cependant, les performances dépendent du choix de l'architecture du véhicule, le dimensionnement des composants (par exemple la puissance maximale ou le couple maximal d'une machine électrique) et de la gestion d'énergie entre les multi-sources (moteur à combustion interne, batteries, pile-à-combustible, etc.) et les multi-consommateurs (auxiliaires électriques, mouvement, système de chauffage, etc.). De plus, du point de vue du fonctionnement, la chaîne de traction d'un véhicule hybride représente un système complexe composé d'un ensemble de sous-systèmes permettant plusieurs configurations d'interconnexion.

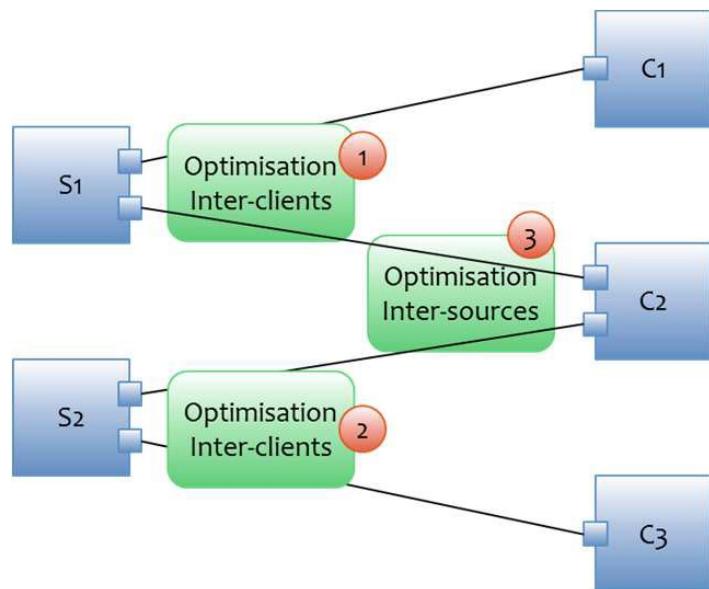


FIGURE 1.7 – Optimisation globale en modules de deux natures [32].

L'objectif fixé consiste en la réalisation d'un simulateur permettant : l'analyse du flux d'énergie d'une chaîne de traction d'un véhicule hybride en utilisant des modèles énergétiques des sous-systèmes, la reconfiguration des sous-systèmes selon l'architecture de véhicule hybride étudié, la validation et l'évaluation des performances des stratégies dédiées à la gestion d'énergie selon différents critères (minimisation de la consommation de carburant, confort des passagers – conditions de température, etc.).

Concernant la modélisation de la chaîne de traction, une structure modulaire est préférable afin de modifier facilement l'architecture du système. De plus, pour chaque élément du système, un compromis complexité/précision doit être envisagé dans la conception du modèle. La définition des modèles d'une complexité réduite est envisagée, tout en fournissant une approximation satisfaisante du comportement réel. Ces modèles seront utilisés dans la suite des travaux, pour la simulation du comportement dynamique de l'ensemble du système et également pour la résolution des problèmes d'optimisation de l'énergie.

Du point de vue de la gestion d'énergie, différentes stratégies pour la gestion d'énergie seront proposées et utilisées afin de gérer la distribution d'énergie dans l'ensemble du système. L'objectif est de développer des méthodes systématiques pour la mise en œuvre des

stratégies de gestion d'énergie pour les véhicules hybrides (système multi-sources/multi-consommateurs). Ces méthodes doivent répondre aux exigences industrielles (simplicité de compréhension des méthodes proposées, simplicité de la procédure de réglage des paramètres, modularité pour permettre d'essayer des différentes stratégies (fondées sur des règles, prédictives, etc.), l'adaptabilité aux différentes architectures de chaîne de traction, complexité de calcul réduite afin de faciliter une éventuelle implantation en temps réel), tout en utilisant des concepts théoriques solides.

La réalisation du simulateur consiste dans l'intégration des méthodes de modélisations et des stratégies de gestion d'énergie pour une optimisation énergétique. Pour un scenario de test choisi au préalable (gamme du véhicule et l'architecture de la chaîne de traction par exemple), différents niveaux de modèles et différentes stratégies de gestion d'énergie envisagées seront testés et comparés en simulation. L'évaluation des performances sera effectuée en utilisant les profils de vitesse des cycles de conduite standardisés (NEDC et WLTC). En dépit du fait que ces travaux traitent le cas d'application d'une voiture hybride, les méthodologies de modélisation et de gestion d'énergie pourront être adaptées facilement pour d'autres applications (traitement des eaux usées, smart grid, etc.).

Dans ce cadre, l'objectif des travaux de recherche sont :

1. Définir un formalisme de modélisation fonctionnelle modulaire,
2. Développer une méthodologie, et les stratégies de gestion d'énergie, afin d'assurer une optimisation énergétique globale et une modularité,
3. Développer une méthodologie permettant de reformuler les modèles existants des composants système, relativement complexes, en utilisant la représentation fonctionnelle proposée,
4. Développer une méthodologie d'extraction du modèle fonctionnel afin de remplacer le superviseur ou le gestionnaire énergétique d'un modèle multi-physiques ou même le système.

Les travaux abordés au cours de cette thèse sont organisés de la façon suivante :

- Le deuxième chapitre sera consacré à la compréhension détaillée du système d'un véhicule hybride. Tout d'abord, l'évolution des véhicules électrifiés sera présentée. Ensuite, les architectures de la chaîne de traction des VEHs existants seront détaillées avec les modes d'opération pour l'architecture Séries et l'architecture Parallèle. Il s'en suivra les services et missions à satisfaire pour les consommateurs (dynamique du véhicule, auxiliaires électriques comme GPS ou autoradio, confort thermique comme la climatisation, etc.) du véhicule. Ces informations sont complétées par les normes et réglementations européennes pour le mouvement du véhicule, c'est-à-dire, les cycles de conduite utilisés pour l'évaluation des performances des véhicules. Après l'introduction des cycles de conduite, le modèle dynamique du véhicule est exploité afin de définir les forces affectant le mouvement du véhicule. Enfin, un état de l'art des éléments constitutifs d'un VEH sera effectué afin de disposer d'une vision du niveau de

modélisation juste nécessaire en prenant en compte les caractéristiques et les comportements de ces éléments. Cela est important pour la définition du niveau de modélisation (si trop abstrait ou très détaillé) ainsi que pour le paramétrage du système (par exemple l'état de charge initial de la batterie et son état de charge minimal). Pour conclure, le choix des gammes des véhicules à simuler sera effectué (le détail des gammes des véhicules commercialisés en France est donné en [Annexe A](#)).

- Dans le troisième chapitre, le formalisme proposé est exploité. Ce chapitre débutera par l'introduction des niveaux de représentation d'un système : le niveau téléologique, où les missions et les services du système sont définis avec les règlements et les normes à respecter, le niveau fonctionnel, où l'ensemble des fonctions clés du système sont définis avec l'architecture associée, et le niveau multi-physiques, où les modèles des composants et équipements sont définis pour réaliser les fonctions clés du système. Puis, un rappel sur les bases de la modélisation multi-physiques sera brièvement effectué. Dans cette section, il faut souligner l'importance des natures de flux échangés ainsi que de la représentation des équipements avec les modèles mathématiques utilisés. Ceci sera suivi par l'introduction de la méthodologie de modélisation fonctionnelle. Dans cette section, la définition des ports source et consommateur, les natures des flux échangés, le concept modulaire avec les modèles mathématiques (les équations) utilisés afin de parcourir la tâche des éléments seront illustrés. De plus, les sémantiques, c'est-à-dire la présentation des éléments de base de modélisation fonctionnelle (source, stockage, distributeur, transformateur et effecteur), et l'ensemble organico fonctionnel (EOF) seront mis en évidence. Ce chapitre sera conclu par l'explication du rôle des distributeurs avec l'intégration dans un outil de simulation et enfin un exemple d'un modèle fonctionnel d'un système de traitement des eaux d'un bâtiment.
- Le quatrième chapitre débutera par une brève revue méthodologique des stratégies de gestion d'énergie pour des VEHs. Il introduira l'architecture de commande proposée avec l'abstraction du modèle fonctionnel et l'utilisation du modèle obtenu comme le gestionnaire énergétique d'un modèle multi-physiques. Après cette introduction, l'identification des paramètres fonctionnels du véhicule hybride à partir de son modèle multi-physiques sera exposée. Cette approche est renforcée par l'exemple d'un groupe de composants de la chaîne de traction thermique pour l'obtention d'un élément transformateur fuel-à-mécanique. Ceci montre les processus du paramétrage fonctionnel et du choix du type d'élément en utilisant les données obtenues du constructeur. Ensuite, l'interconnexion entre les modèles fonctionnel et multi-physiques sera détaillée avec un exemple relativement plus simple qu'un modèle de VEH (modèle d'un véhicule électrique). Cette interconnexion permet d'extraire le modèle fonctionnel et conduit à l'utilisation de cette abstraction comme le gestionnaire énergétique d'un modèle multi-physiques avec les interfaces nécessaires. Ces interfaces sont essentielles car le changement de domaine des flux et signaux est réalisé par ces blocs. Cela sera suivi par le choix d'un formalisme du problème d'optimisation. Dans cette partie, le système multi-sources/multi-consommateurs est divisé en deux parties afin de simplifier le problème d'optimisation et d'aboutir à une répartition optimale. Cette division a été

abordée par [73], elle sera détaillée dans cette partie du mémoire avec des propositions de stratégies de répartition : une stratégie de répartition des besoins pour la partie mono-source/multi-consommateurs, et deux stratégies (fonctionnement boost, fonctionnement priorité prédictif) de répartition des puissances fournies pour la partie multi-sources/mono-consommateur.

- Le cinquième chapitre présentera l'application de la modélisation et des stratégies de gestion d'énergie sur un véhicule hybride. Tout d'abord, la définition d'un cas d'étude pour un VEH en prenant en compte la gamme du VEH sera détaillée. Il s'en suivra les représentations des modèles fonctionnel et multi-physiques du VEH choisi. L'étape suivante sera de comparer les résultats de simulation et les données du constructeur afin de valider le modèle et l'architecture du VEH. De plus, cette validation sera complétée par les présentations des critères d'évolution des performances (la consommation de carburant, la variation d'état de charge du stockage électrique qui conduit au calcul de la consommation de carburant corrigée et le nombre de cycles d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique). Ensuite, la stratégie de gestion d'énergie du VEH sera détaillée par l'interconnexion des modèles fonctionnel et multi-physiques (celle-ci est exploitée pour tous les éléments fonctionnels). Pour les répartitions des besoins et puissances fournies, trois stratégies différentes seront proposées. Ces deux stratégies sont la stratégie heuristique, qui est fondée sur la priorisation et les règles des éléments, et la stratégie fondée sur la répartition avec le fonctionnement boost et avec le fonctionnement de priorisation prédictive. Avec le choix des pondérations des stratégies proposées, des simulations sont effectuées selon des conditions de fonctionnements définies pour les cycles de conduite NEDC et WLTC en prenant en compte toutes les stratégies exploitées. Les résultats de ces simulations sont comparés au moyen des critères introduits en début de ce chapitre. Le meilleur compromis afin de choisir la stratégie la plus adaptée au cycle de conduite ou au type de conduite sera exprimé.
- Finalement, les conclusions dans le cadre de ces travaux seront faites en prenant en compte les remarques sur les résultats obtenus et les difficultés rencontrées. Les perspectives de généralisation d'interconnexion entre les niveaux de modélisation, ainsi qu'une amélioration sur la stratégie de répartition d'énergie fournie ou de besoin afin de minimiser la consommation de carburant (pour les normes et les aspects environnementaux) et le nombre de cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique (pour minimiser la consommation de carburant et le confort mécanique des passagers) seront abordées.



## Chapitre 2

# Eléments constitutifs d'un véhicule électrique hybride

Dans le chapitre précédent, l'objectif de cette thèse a été défini comme étant la proposition d'un outil de simulation pour l'évaluation globale d'un véhicule automobile hybride. Les propriétés de cet outil sont de donner la possibilité de procéder à une évaluation rapide multi-critères, de permettre à l'utilisateur de modifier rapidement l'architecture du système avec un niveau de modularité important et de proposer l'évaluation des bilans énergétiques du système. Les différentes composantes des critères considérés prennent en compte la performance du véhicule, la consommation des sources, la satisfaction du confort qui est offert par le véhicule et les autonomies (distances parcourues) selon les motorisations électriques et hybrides. Afin de trouver une solution à cette problématique, en prenant en compte le système dans son ensemble, nous proposerons dans les chapitres suivants un formalisme énergétique qui permet de simuler le système dans sa globalité et de faire les bilans énergétiques nécessaires à l'optimisation de la consommation par exemple.

Dans ce cadre, il est important de comprendre le système «*Véhicule Automobile Hybride*» ou «*Véhicule Electrique Hybride*» (VEH) dans sa globalité, aussi bien ses missions, ses architectures existantes, ses standards et règlementations, que ses éléments constitutifs. Pour comprendre le système il faut étudier son comportement dans son environnement avec l'aide d'un modèle approprié. A cette fin, il n'est pas nécessaire de rappeler l'importance de la modélisation et d'une représentation performante avec la précision juste nécessaire d'un système, afin de diminuer le «*délai avant commercialisation*» et de pouvoir évaluer différentes solutions qui contiennent de multiples architectures avec des types de sources diverses.

Dans ce chapitre, afin d'appréhender le système VEH étudié, l'histoire des véhicules hybrides sera tout d'abord présentée, en prenant en compte les architectures de chaînes de tractions des VEHs existantes. Les services et missions des VEHs avec les cycles de conduite des standards utilisés par les constructeurs automobiles pour calculer la consommation et

l'autonomie du véhicule seront ensuite introduites. Enfin, un modèle dynamique et le bilan des éléments constitutifs d'un VEH ainsi que les différentes gammes de VEHs existantes seront détaillés.

## 2.1 Histoire des véhicules hybrides

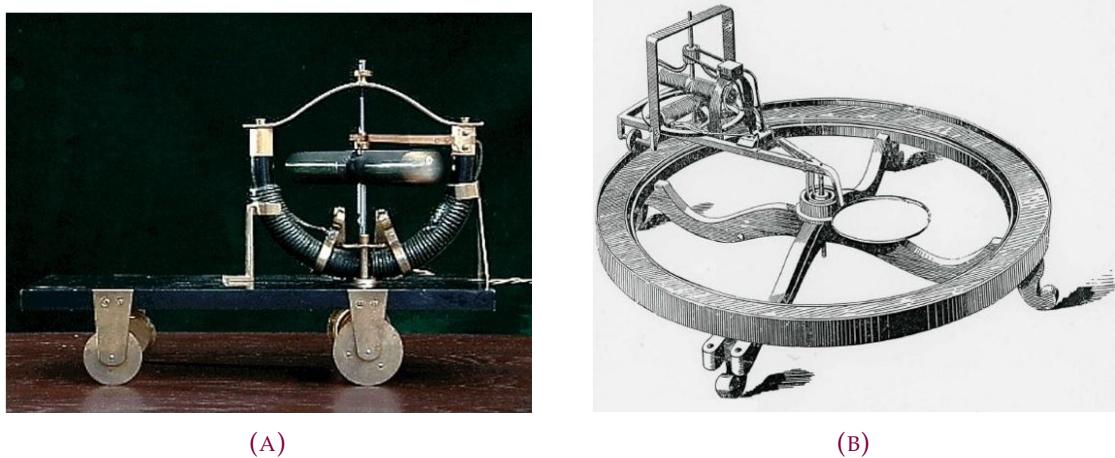
Pour appréhender l'évolution des VEHs et diriger les chercheurs sur la voie la plus appropriée pour un avancement efficace, débuter par comprendre l'histoire des automobiles est une démarche pertinente. Cette approche peut en effet permettre de comprendre les points forts et les points faibles de ces automobiles et des automobiles électrifiées. L'histoire des VEHs et des véhicules électriques (VE), que ce soit d'un passé lointain ou proche, présente de nombreuses similitudes.

Depuis toujours, l'homme a voulu voyager et transporter des marchandises le plus rapidement et de la façon la plus efficace possible. Pour cela il a d'abord utilisé les chevaux. Puis, afin d'aller plus vite et avant l'innovation des moteurs à propulsion, la voile a été utilisée en utilisant la force du vent. Des preuves que son utilisation avait commencé au 6<sup>me</sup> siècle av. J-C. [74] ont été mises en évidence dans certains travaux.

Après la construction de véhicules à voiles, des véhicules automoteurs ont été conçus au Moyen Age. Léonard de Vinci avait de cette manière conçu le premier véhicule avec sa propulsion interne par des ressorts hélicoïdaux [74].

Avec les progrès de la technologie des machines qui produisent de la puissance mécanique, les inventeurs ont été amenés à utiliser cette puissance dans les véhicules. L'histoire des véhicules commence donc par la traction au moyen de machines à vapeur. Ce type de véhicule a été utilisé plutôt pour des locomotives car ces machines étaient trop lourdes pour une automobile et avec un faible rendement. Le début de l'histoire des véhicules conventionnels et hybrides est assez similaire. Avec les progrès de la technologie des machines électriques et des moteurs thermiques (moteur à combustion interne) sont apparus les premiers véhicules.

Les essais de véhicules électrifiés ont commencé avec l'invention du moteur électrique et l'invention des véhicules électrifiés peut être attribuée à des multiples personnalités scientifiques. Par exemple un petit modèle de véhicule a été créé par Ányos Jedlik (voir [Figure 2.1a](#)) en 1828. Il a été suivi par la création d'un train miniature par Thomas Davenport (voir [Figure 2.1b](#)) en 1834. Plusieurs prototypes de véhicule électrique ont été construits avant la présentation de la première cellule de batterie rechargeable par Gaston Planté en 1859. Un électricien français, Gustave Trouvé, a présenté un tricycle avec la batterie de Faure qui a été construit après la présentation de Planté, en 1881. Par ailleurs, en 1885, Karl Benz construit la première automobile à moteur thermique, qu'il a lui-même créé. Après cette date, les essais sur les véhicules ont été inspirés par ces deux types de machine, qui ont été testés et validés pour l'utilisation de la traction des automobiles.



**FIGURE 2.1 –** (a) Modèle du véhicule de Jedlik [75], (b) une illustration à un chariot miniature électrique de Davenport [76].

Avant la dominance des véhicules à moteur thermique sur les véhicules électrifiés, ces derniers détenaient le record de vitesse et de distance parcourue. L'exemple le plus connu est celui de la « *Jamais Contente* » de Camille Jenatzy, qui a atteint la vitesse record de 105.88 km/h en 1899 alors que la vitesse maximale à l'époque pour un véhicule était de 100 km/h. Ce type de succès des véhicules électrifiés, a amené les consommateurs à s'intéresser à ce mode de traction. On peut notamment mentionner la flotte de taxis à traction électrique à New York au début des années 1900.

Le développement des machines électriques et des moteurs thermiques a également conduit les inventeurs à utiliser ces deux technologies en un même véhicule. Une première tentative a été faite par Paul Pouchain en 1894, puis un autre essai par Henri Pieper en 1899 avec un véhicule hybride (voir Figure 2.2a). Ce dernier a déposé le brevet « Entraînement mixte pour véhicules automobiles » en 1909, qui est un des premiers brevets concernant les véhicules hybrides [77]. Les travaux de Pouchain et Pieper ont été suivis par ceux de Ferdinand Porsche qui a créé le véhicule Lohner-Porsche mixte pour Ludwig Lohner en 1900. Ces véhicules, désignés par l'appellation « *Auto Mixte* » (voir Figure 2.2b) n'ont pas eu le succès attendu avec les développements et le coût faible de technologie des véhicules avec moteur thermique et ont été abandonnés après la première guerre mondiale.

Dans les années 1900-1910, les véhicules électrifiés ont eu un certain succès, en effet ils représentaient 38% du marché aux Etats Unis [78]. Le problème le plus important et qui explique sa perte de puissance sur le marché était leur prix. Les avancées de la technologie en matière de moteur thermique et les découvertes de réserves de pétrole qui ont conduit à une baisse importante du prix du gasoil et de l'essence, ont rendu les véhicules à moteur thermique plus intéressants économiquement avec une dépense opérationnelle moins importante. La dernière grande problématique des véhicules à moteur thermique était leur démarrage difficile. Curieusement, la solution a été développée au moyen de machines électriques qui sont utilisées pour le démarrage des moteurs à combustion interne.

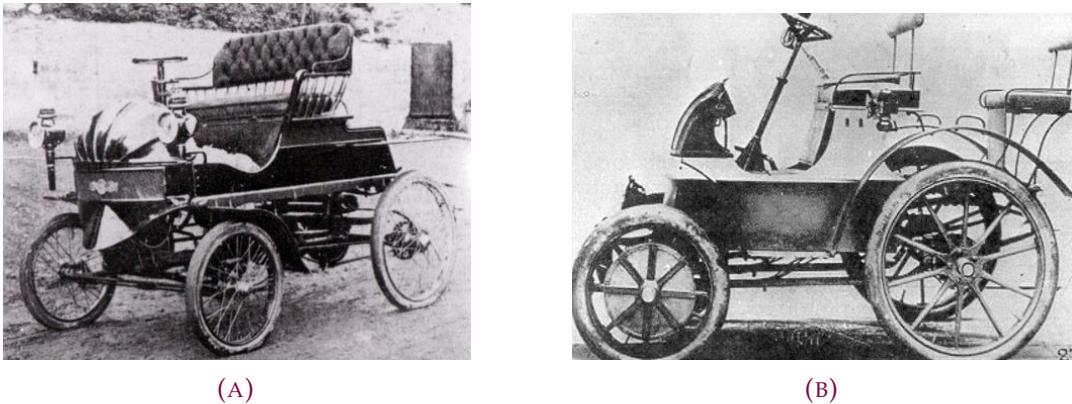


FIGURE 2.2 – (a) Véhicule hybride de Pieper [79], (b) Auto Mixte de Lohner-Porsche [80].

Dans la suite du vingtième siècle, les véhicules électrifiés ont disparu progressivement jusqu'à la fin des années 1990, mis à part des travaux de recherche et des prototypes, et cela même si Renault commercialisait des camionnettes de distribution à propulsion électrique (avec des batteries au plomb) dans les années 1920. Les travaux de Victor Wouk et Andy Frank ont aidé au développement des véhicules hybrides et électriques modernes et le concept de freinage régénératif a aussi été étudié. Les crises de l'énergie des années 1970 et 1980, la commercialisation des véhicules électrifiés a été relancée. Le premier véhicule hybride moderne à avoir été produit en masse est la Toyota Prius (voir Figure 2.3) en 1997 suivi par la Honda Insight.



FIGURE 2.3 – (a) Toyota Prius Hybride 1997 [81], (b) Toyota Prius Hybride Rechargeable 2017 [82].

Les progrès des machines électriques, de l'électronique de puissance et des technologies des batteries, ont permis la baisse progressive des prix des véhicules électrifiés. La volonté de réduire les émissions de  $CO_2$ , et d'augmenter le rendement des véhicules amène les constructeurs automobiles à produire et commercialiser les véhicules électrifiés. Certains constructeurs se dirigent vers le véhicule électrique (VE) et d'autres vers le véhicule hybride (VEH). La finalité voulue est de mettre en usage des véhicules électriques à la place des véhicules conventionnels. Les véhicules hybrides sont un très bon moyen de faciliter cette transition mais aussi pour habituer les conducteurs à une conduite plus adaptée à la conduite des véhicules électriques. De plus, les constructeurs ont pour objectif de construire et commercialiser uniquement des véhicules électrifiés, par exemple Toyota voudrait passer à une production 100% véhicules électrifiés d'ici 2050.

## 2.2 Classification des véhicules hybrides

Les VEHs utilisent au moins deux sources d'énergie pour la traction et les autres services du véhicule. Ces sources d'énergie peuvent être fondées sur le pétrole (gasoil ou essence), le gaz naturel, l'énergie électrique (batteries ou super capacités), ou l'hydrogène avec l'aide des piles à combustible. Dans ce cas les piles à combustible sont considérées comme une source auxiliaire pour générer l'énergie électrique à bord du véhicule [83]. Actuellement, les VEHs utilisent généralement deux types de tractions :

- Le moteur thermique, qui transforme l'énergie chimique du carburant en énergies thermique et mécanique afin de disposer d'une durée de fonctionnement suffisante et d'un rechargeement facile,
- La machine électrique, qui transforme l'énergie électrique en énergie thermique et mécanique pour le besoin de traction et des services auxiliaires du véhicule [84, 85].

Cette utilisation de deux sources d'énergie, permet aux VEHs d'obtenir les avantages de ces deux sources. Le but ultime de ces véhicules est d'avoir un rendement maximal pour la conduite en respectant la performance, l'autonomie, le confort et tous les autres services du véhicule [86]. Par exemple, si la machine électrique est utilisée pour les régimes transitoires de puissance, cela est fait de sorte que le moteur thermique puisse fonctionner de manière constante et avoir un rendement élevé en limitant le niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> [87].

Une première classification des VEHs peut être faite en fonction de leurs méthodes de recharge de leur niveau d'énergie [88] :

- i. *Recharge à la station d'essence* : Ce type de VEH est rechargé en station d'essence. La majorité des VEHs font partie de cette catégorie.
- ii. *Recharge au réseau électrique* : Ce type de VEH est rechargé principalement par le réseau électrique. Cette catégorie de VEHs peut aussi être appelée *Plug-in Hybrid* ou *Hybride Rechargeable* (PHEV). Selon sa conception et le type de leur batterie, les PHEVs peuvent avoir entre 30 et 60 km d'*autonomie électrique* (distance parcourue avec traction électrique seule).

Ce type de véhicule est plus efficace grâce à l'aide des sources multiples, néanmoins différentes configurations d'architecture de chaîne de la traction sont possibles, avec de multiples choix pour la stratégie d'optimisation d'énergie et de commande [84]. Cette problématique de choix d'architecture et de stratégie de commande entraîne un système complexe et coûteux.

De plus, mis à part la classification par rapport au fonctionnement et à l'architecture de la chaîne de traction, une autre classification existe par rapport aux niveaux d'hybridation, qui sera mise en évidence dans la prochaine partie de ce mémoire.

### 2.2.1 Niveaux d'hybridation

La classification générale faite par les différents travaux dans la littérature sur le ratio d'utilisation entre moteur thermique et moteur électrique pour la traction des véhicules hybrides est constituée de quatre catégories [88-90] qui sont illustrées aussi en [Figure 2.4](#) :

- I. *Micro Hybride* : Les micro hybrides remplacent le démarreur avec une machine électrique spécialisée qui est l'Alterno-Démarreur intégré avec une puissance maximum de 5 kW. Le fonctionnement de cette machine électrique est d'assurer le Start/Stop. Cela signifie que le moteur thermique peut s'arrêter quand le véhicule s'arrête. Ainsi, ce type de véhicule peut diminuer la consommation dans la conduite en ville. A ce niveau d'hybridation, le niveau de tension de la batterie peut rester à 14 V comme les véhicules conventionnels, ou selon les composants utilisés on peut aussi trouver de batterie de 42 V. L'économie de carburant peut atteindre jusqu'à 10%. Un freinage régénératif est disponible mais les limitations de la machine électrique limitent cette fonctionnalité.
- II. *Mild Hybride* : Cette catégorie de VEHs ajoute l'aide de la traction électrique à la fonctionnalité de Start/Stop. Ce type d'hybridation utilise la traction électrique pendant l'accélération du véhicule pour compléter le moteur thermique, il en résulte la réduction de la taille et de la puissance de ce composant et une performance plus élevée. La tension de batterie est plus élevée comparée à celle des véhicules conventionnels, entre 100 V et 200 V, en raison d'un besoin en puissance électrique plus important. La puissance de sortie du moteur électrique est aussi plus élevée que celle des micro hybrides, sa valeur peut atteindre jusqu'à 15 kW pour une économie de carburant entre 15% et 20%. L'effet du freinage régénératif est plus efficace que pour les micro hybrides en rechargeant la batterie, mais avec un moteur électrique et une batterie de taille et de puissance plus importantes, le mild hybride est plus couteux que le micro hybride.
- III. *Full Hybride* : Avec un système de traction électrique, les Full Hybrides ont un fonctionnement en traction électrique, en traction moteur thermique et en traction parallèle en électrique - thermique. Lorsque ce véhicule utilise la traction électrique seule, il devient *Zéro Emission*. Le niveau de tension de batterie est supérieur à 200 V, en alimentant une machine électrique d'une puissance minimale de 50 kW afin d'assurer la puissance de la traction électrique seule. Il résulte de ce partage de traction entre moteur thermique et machine électrique une économie de carburant entre 30% et 50%, mais comme pour les mild hybrides avec les composants utilisés, le coût des full hybrides augmente.

Selon certaines références [88, 89], les full hybrides sont séparés en deux catégories différentes : « *Power Hybride* » et « *Synergy Hybride* ». Le « *Power Hybride* » priorise la performance du véhicule, comme la vitesse maximale ou l'accélération du véhicule, au dépit du rendement du système. Pour ce type d'hybridation, la taille du moteur thermique reste la même que celle des véhicules conventionnels. Contrairement à la « *Synergy Hybride* » qui donne la priorité à l'économie de carburant et au rendement du système en diminuant les émissions CO<sub>2</sub>, et donc à une performance du véhicule mise au second plan. Ce choix conduit à un moteur thermique de puissance plus faible que

celle d'un véhicule conventionnel.

IV. *Plug-in Hybride (Hybride Rechargeable)* : Les Plug-in Hybrides (PHEV) sont des Full Hybrides avec la possibilité de recharger la batterie depuis un réseau électrique. Il y a deux types de PHEVs en usage. Le premier est un véhicule électrique avec un moteur thermique limité. L'autre type de PHEV est un véhicule dont l'autonomie est augmentée par la recharge de la batterie. Dans cette catégorie d'hybridation, l'économie de carburant peut atteindre jusqu'à 100% en prenant en compte que le moteur thermique n'est pas utilisé en permanence.

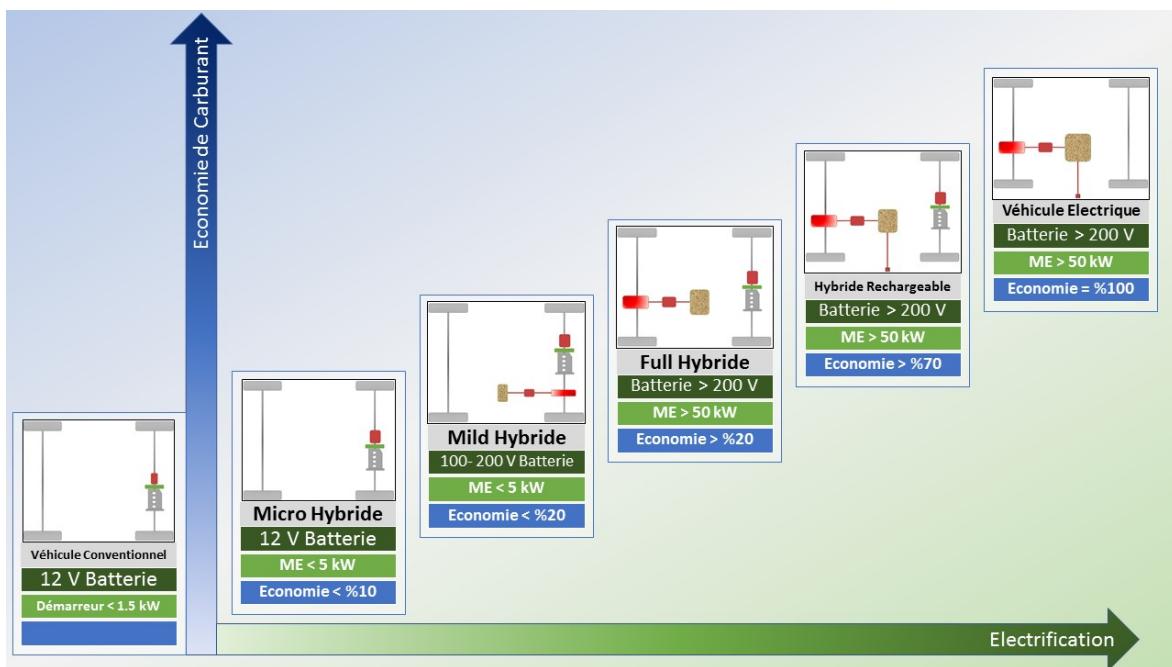


FIGURE 2.4 – Les Niveaux d'Hybridation.

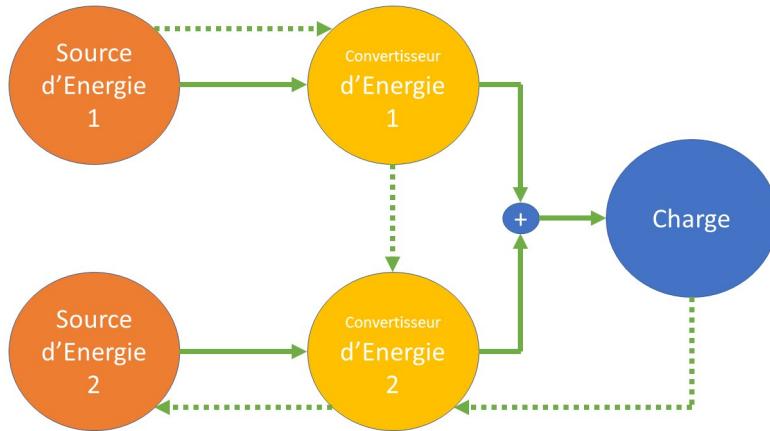
## 2.2.2 Architectures des véhicules hybrides

Comme indiqué précédemment, les avantages les plus importants des VEHs sont : l'augmentation du rendement du système, l'amélioration de l'autonomie, la diminution des émissions CO<sub>2</sub> et la diminution de la dépendance aux ressources à base de pétrole, tout en gardant les performances et le confort du véhicule. Afin de réussir à améliorer et pouvoir exploiter tous ces avantages, les VEHs utilisent plusieurs sources d'énergie. Cette topologie de système complexe multi-sources/multi-consommateurs donne aux ingénieurs/chercheurs une certaine liberté de choix de l'architecture du système.

Le déplacement est le consommateur le plus important d'un VEH. Pour répondre aux besoins d'énergie du véhicule générés par le déplacement, la chaîne de traction des véhicules hybrides peut varier. Pour une meilleure compréhension, un concept de chaîne de traction d'un VEH est donné en [85]. Ce concept montre les différentes façons possibles d'échanger des flux d'énergie et analyse également les modèles de combinaison des flux de puissance afin d'atteindre les besoins de charge. Les VEHs ont généralement deux chaînes de traction.

La mise en place d'un freinage régénératif nécessite au moins qu'une des chaînes de traction des VEHs permette aux flux d'énergie d'être bidirectionnels. Dans ce cas, l'autre chaîne de traction peut être bidirectionnelle ou unidirectionnelle.

Le concept de chaîne de traction d'un VEH est illustré en [Figure 2.5](#) avec les flèches qui indiquent la direction du flux de puissance pour atteindre le besoin de la charge, les tirets indiquent la direction de la puissance vers une des sources du système.



[FIGURE 2.5 – Le concept de la chaîne de traction d'un VEH \[84, 85\].](#)

Les modèles possibles de combinaison des flux de puissance pour atteindre les besoins de charge sont ([Figure 2.5](#), la Chaîne de Traction 1 correspond à la Source d'Energie 1 plus le Convertisseur d'Energie 1, et la Chaîne de Traction 2 correspond à la Source d'Energie 2 plus le Convertisseur d'Energie 2) :

- i. Le besoin d'énergie de charge est atteint par seulement la Chaîne de Traction 1.
- ii. Le besoin d'énergie de charge est atteint par seulement la Chaîne de Traction 2.
- iii. Le besoin d'énergie de charge est atteint par la Chaîne de Traction 1 et la Chaîne de Traction 2.
- iv. La chaîne de Traction 2 obtient seulement de l'énergie par la charge (freinage régénératif).
- v. La Chaîne de Traction 2 obtient seulement de l'énergie par la Chaîne de Traction 1.
- vi. La Chaîne de Traction 2 obtient de l'énergie de la Chaîne de Traction 1 et de la charge.
- vii. La Chaîne de Traction 1 fournit de l'énergie à la Chaîne de Traction 2 et à la charge.

Ce concept de la chaîne de traction d'un VEH peut être réalisé par différentes architectures. Les architectures les plus utilisées sont les Hybride Séries et les Hybride Parallèles. Deux autres architectures, les Séries-Parallèle et l'Hybride Complexé, peuvent aussi être ajoutées aux architectures des VEHs les plus utilisées par les constructeurs automobiles.

Pour introduire une définition plus précise de l'architecture des VEHs, le couplage de puissance sera pris en compte. Par exemple une chaîne de traction électrique (série), une

chaîne de traction mécanique (parallèle), et une chaîne de traction de couplage mécanique-électrique (série-parallèle).

1. *VEH Série* (*Figure 2.6*) : La caractéristique principale de la configuration série hybride est que les sources de puissance sont couplées par le couplage électrique. Le moteur thermique n'est pas couplé directement à la transmission mécanique. La machine électrique est le seul composant couplé et utilisé pour la traction du véhicule.

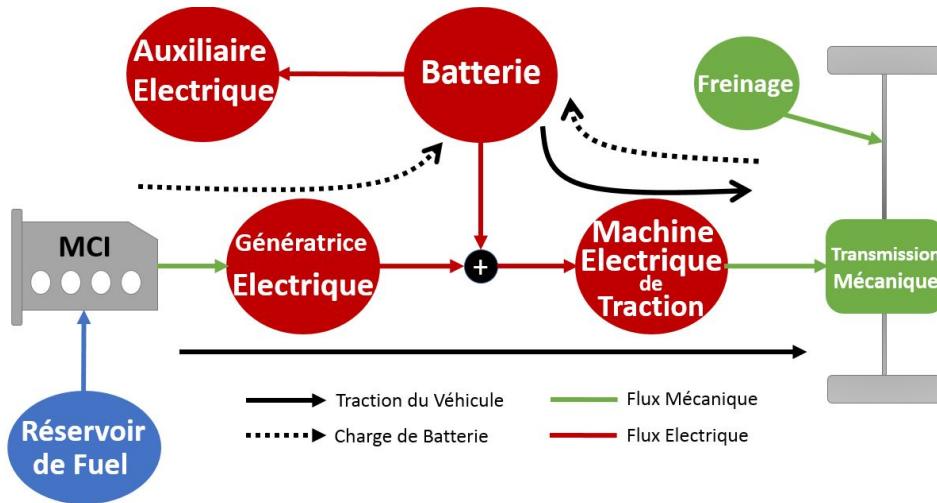


FIGURE 2.6 – Représentation d'un VEH Série.

Cette topologie permet aussi bien une commande relativement simple de la traction, simplifie la transmission et respecte la caractéristique de vitesse-couple du moteur électrique. Comme le moteur thermique n'est pas connecté directement à la transmission pour la traction du véhicule, sa taille peut être diminuée et le champ de fonctionnement haut rendement peut être assuré. En revanche, cela nécessite une batterie dont la capacité augmente lorsque la puissance du moteur thermique diminue. Cependant, comme il y a plusieurs transformations d'énergie (fuel vers mécanique – mécanique vers électrique – électrique vers mécanique), le rendement global du système est plus faible qu'avec les autres architectures de chaîne de traction. Par ailleurs, le besoin de deux machines électriques, dont une de taille et de puissance relativement importantes, et donc coûteuse, engendre un véhicule à prix élevé.

Les modes de fonctionnement de VEH Séries sont les suivants :

- Mode de traction électrique (*Figure 2.7a*) : Le moteur thermique est arrêté et la traction est assurée uniquement par le moteur électrique et la batterie.
- Mode de traction thermique (*Figure 2.7b*) : La puissance de traction du véhicule est fournie par le moteur thermique, donc par la consommation de fuel, tandis que la batterie ne contribue pas à la mobilité. La machine électrique de traction sert de transmission électrique à partir du moteur thermique aux roues.

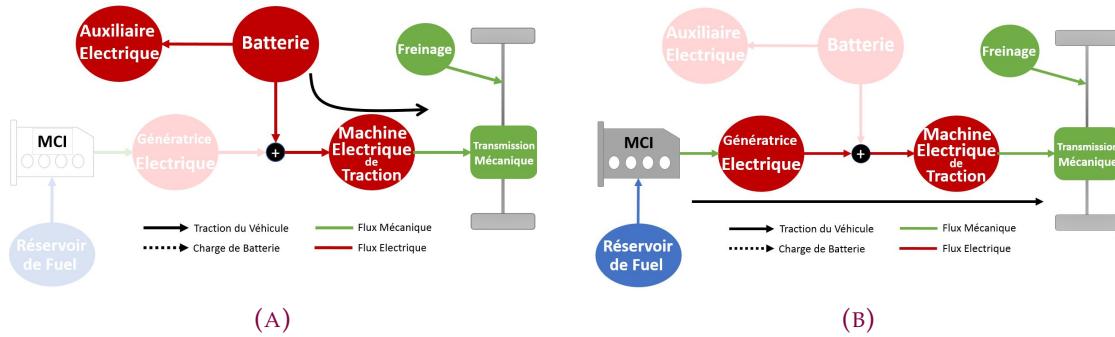


FIGURE 2.7 – Représentation des modes (a) traction électrique et (b) traction thermique de VEH Série.

- Mode de traction hybride (Figure 2.8a) : La puissance de traction est obtenue par le moteur thermique et la batterie, fusionnant avec le couplage électrique.
- Mode de puissance thermique partagé (Figure 2.8b) : La puissance fournie par le moteur thermique est utilisée simultanément pour recharger les batteries et pour la traction du véhicule.

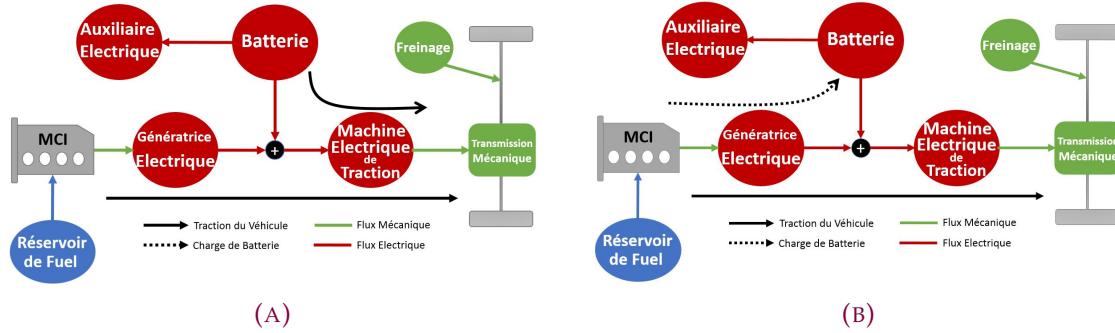
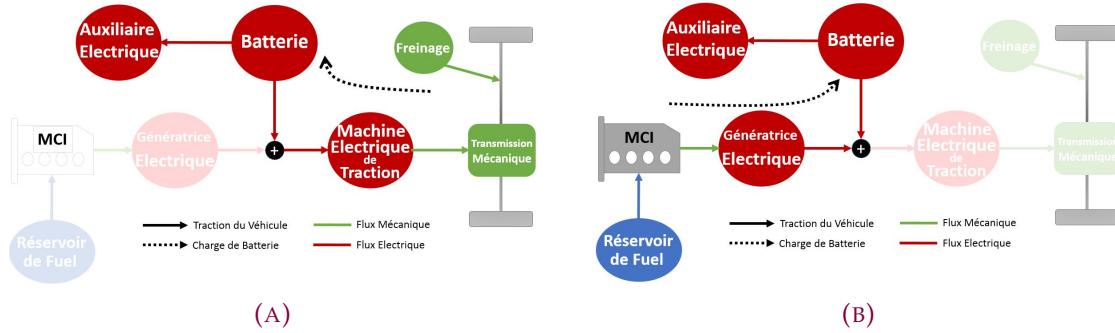
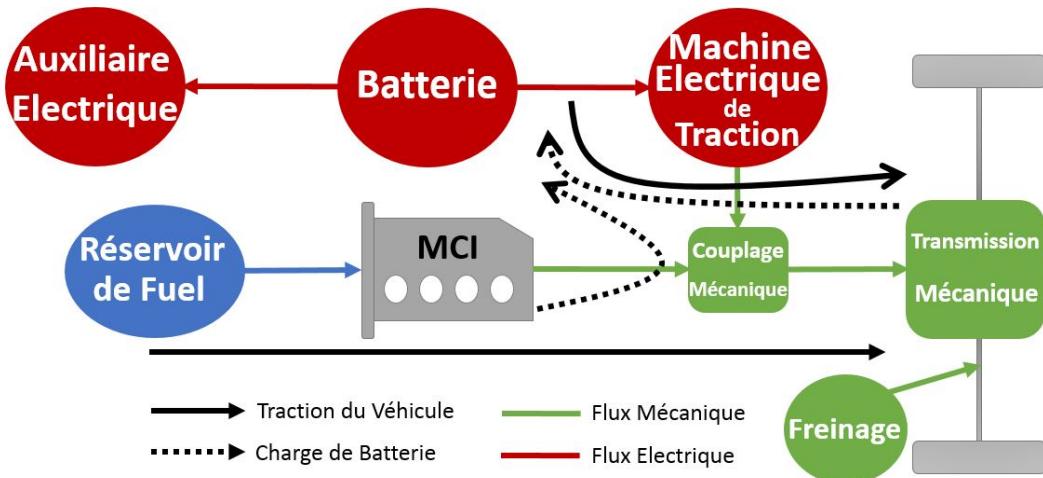


FIGURE 2.8 – Représentations des modes (a) traction hybride et (b) puissance thermique divisé de VEH Série.

- Mode de freinage régénératif (Figure 2.9a) : Le moteur thermique n'est pas actif et le moteur électrique de traction fonctionne comme un générateur actionné par la dynamique du véhicule. La puissance générée est utilisée pour charger la batterie.
- Mode de charge de la batterie véhicule immobile (Figure 2.9b) : Le moteur électrique de traction ne reçoit pas d'énergie et le moteur thermique est utilisé uniquement pour charger la batterie.



2. VEH Parallèle (*Figure 2.10*) : La caractéristique principale de la configuration parallèle hybride est que les sources de puissance sont couplées mécaniquement. Le moteur thermique et le moteur électrique de traction sont couplés à la transmission mécanique à l'aide d'un composant mécanique (selon la forme d'un train épicycloïdal). Cette topologie utilise le moteur électrique de traction pour améliorer le rendement du moteur thermique en utilisant le moteur électrique pour les mouvements du véhicule avec des dynamiques importantes comme l'accélération, les montées, etc.



Ce type d'architecture des VEHs est plus avantageux avec deux composants de traction à la place de trois (hybride séries). Le moteur électrique de traction peut fonctionner comme un générateur afin de charger la batterie avec la puissance obtenue par la transmission mécanique en récupérant l'énergie cinétique du véhicule ou directement par le moteur thermique. Comme la puissance de traction est obtenue au moyen des deux composants, un moteur thermique de puissance plus faible peut être choisi mais aussi bien la machine électrique. Cependant, le couplage mécanique, qui est assuré par une transmission mécanique, forme un système bien plus complexe que celui du VEH série.

Les modes de fonctionnement de la structure VEH Parallèle sont les suivants :

- Mode de traction thermique (Figure 2.11a) : La puissance de traction du véhicule est assurée par le moteur thermique, tandis que la batterie HT ne fournit ou n'absorbe aucune énergie.
- Mode de charge de la batterie véhicule immobile (Figure 2.11b) : Le moteur électrique de traction reçoit de l'énergie uniquement du moteur thermique qui fonctionne comme un générateur pour charger la batterie.

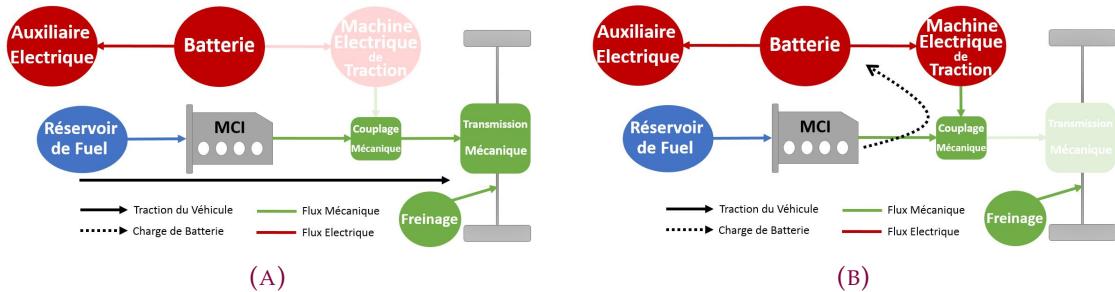


FIGURE 2.11 – Représentations des modes (a) traction thermique et (b) charge de la batterie immobile de VEH Parallèle.

- Mode de traction électrique (Figure 2.12a) : Le moteur thermique est arrêté et la traction du véhicule est assurée uniquement par le moteur électrique et la batterie.
- Mode de puissance thermique partagé (Figure 2.12b) : La puissance fournie par le moteur thermique-générateur est utilisée simultanément pour recharger les batteries et pour la traction de véhicule.

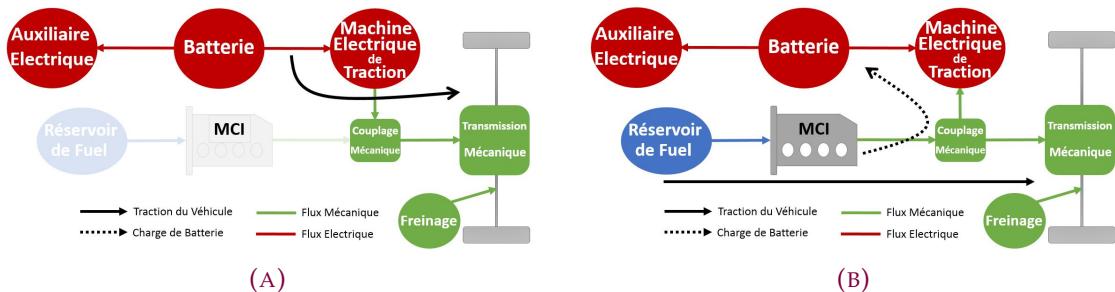
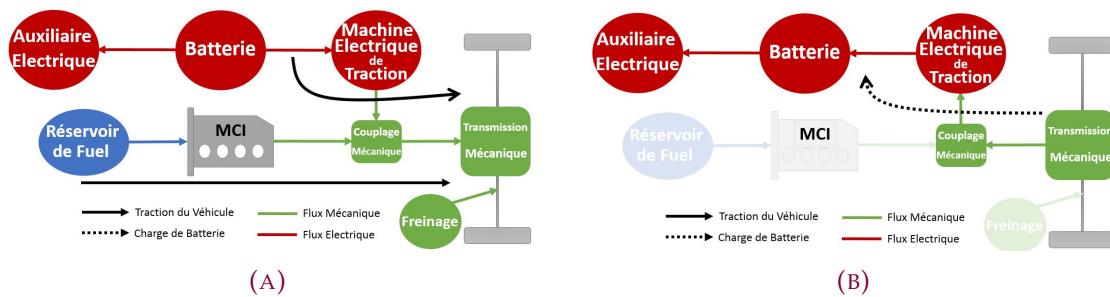


FIGURE 2.12 – Représentations des modes (a) traction électrique et (b) puissance de thermique divisé d'un VEH Parallèle.

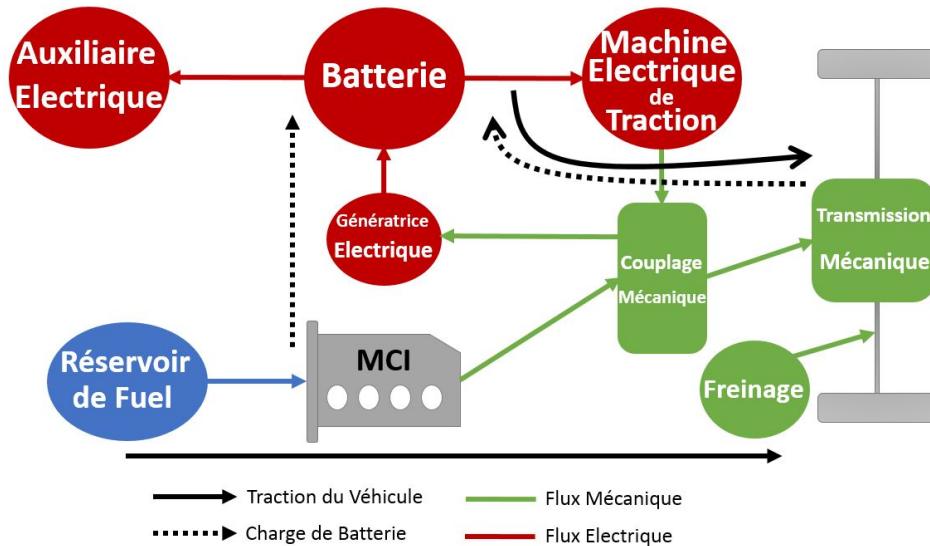
- Mode de traction combinée (Figure 2.13a) : La traction du véhicule est assurée par les deux moteurs thermique et électrique (utilisation de la batterie).
- Mode de freinage régénératif (Figure 2.13b) : La batterie se charge en récupérant l'énergie cinétique du véhicule et le moteur électrique de traction est utilisé comme générateur pour ce fonctionnement.



**FIGURE 2.13 –** Représentations des modes (a) traction combinée et (b) freinage régénérative d'un VEH Parallèle.

On trouve également ce système de motorisation pour la propulsion marine dont les moteurs thermiques (diesel) spécifiques peuvent difficilement être remplacés. Avec une architecture en hybridation parallèle, il est à la fois possible de conserver une motorisation quasi incontournable tout en lui adjoignant une assistance électrique.

3. *VEH Série – Parallèle (Figure 2.14)* : La caractéristique principale de la configuration hybride série - parallèle est que les sources de puissance sont couplées mécaniquement et électriquement. Le moteur thermique et le moteur électrique de traction sont couplés à la transmission mécanique à l'aide d'un composant mécanique (engrenage planétaire) et le moteur thermique est aussi couplé à la transmission électrique à l'aide d'un générateur.



**FIGURE 2.14 –** Représentation d'un VEH Série – Parallèle.

Cette topologie combine les avantages des VEH Séries et VEH Parallèles. Néanmoins, elle cumule aussi les difficultés de ces architectures en ajoutant une machine électrique supplémentaire à commander et à intégrer dans le système. Il en résulte un système encore plus compliqué et coûteux. Mais avec les progrès de la technologie (électronique de puissance, commande, etc.) et de production, les constructeurs préfèrent cette architecture pour les nouveaux VEHs [88].

4. VEH Complex (Figure 2.15) : Similaires aux caractéristiques principales de la configuration hybride série - parallèle, la seule différence des VEHs complexes est que leur générateur peut aussi fonctionner comme un moteur électrique et peut générer de la puissance mécanique (dans les structures VEH série – parallèle, le flux de puissance du générateur électrique est unidirectionnel et en VEH complexe il est bidirectionnel).

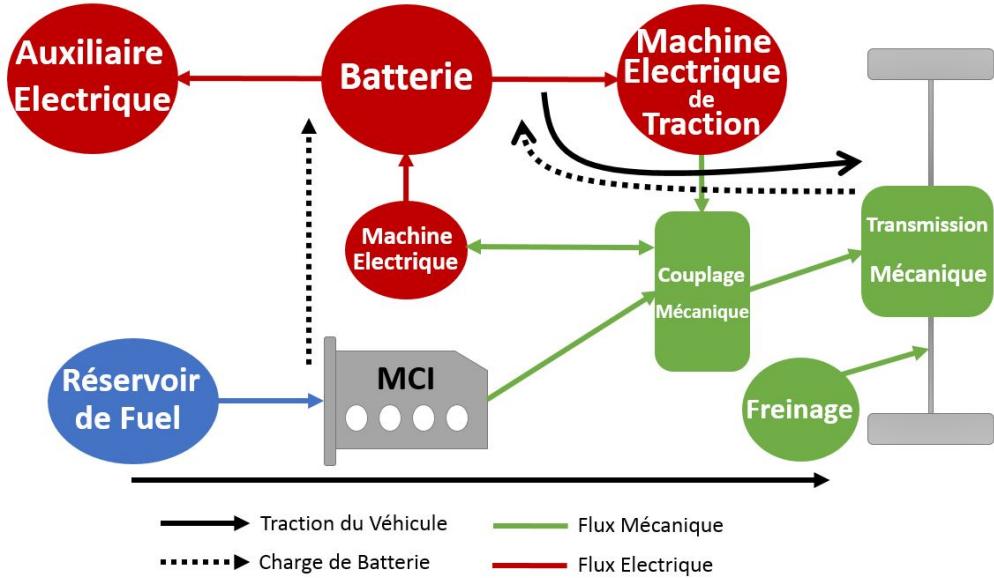


FIGURE 2.15 – Représentation d'un VEH Complex.

Les architectures présentées sont non seulement les plus utilisées mais aussi celles qui sont en développement. Certains chercheurs [88-90] introduisent un autre type de configuration de VEHs : Through the Road. De plus, selon ces références, les véhicules à pile à combustible sont comptés dans les topologies de véhicules hybrides comme les VEH séries. Par ailleurs, le VEH Plug-in (rechargeable) peut être inclus dans cette liste d'architectures, mais un hybride rechargeable peut être série, parallèle ou série – parallèle selon l'architecture de la chaîne de traction. Une comparaison entre les architectures des chaînes de traction des VEHs est présentée dans le Tableau 2.1 :

TABLEAU 2.1 – Comparaison entre les architectures des VEHs (1 : Très bien, 2 : Bien, 3 : Acceptable, 4 : Défavorable) [86].

	VEH Série	VEH Parallèle	VEH Série – Parallèle	VEH Complex
<b>Efficacité :</b>				
Economie de carburant	1	2	1	1
Coût	1	2	3	4
Facilité de commande	1	3	3	3
Rendement global	3	1	1	1
<b>Performance :</b>				
Accélération	3	2	2	1
Couple de sortie élevé en continu	3	3	2	1

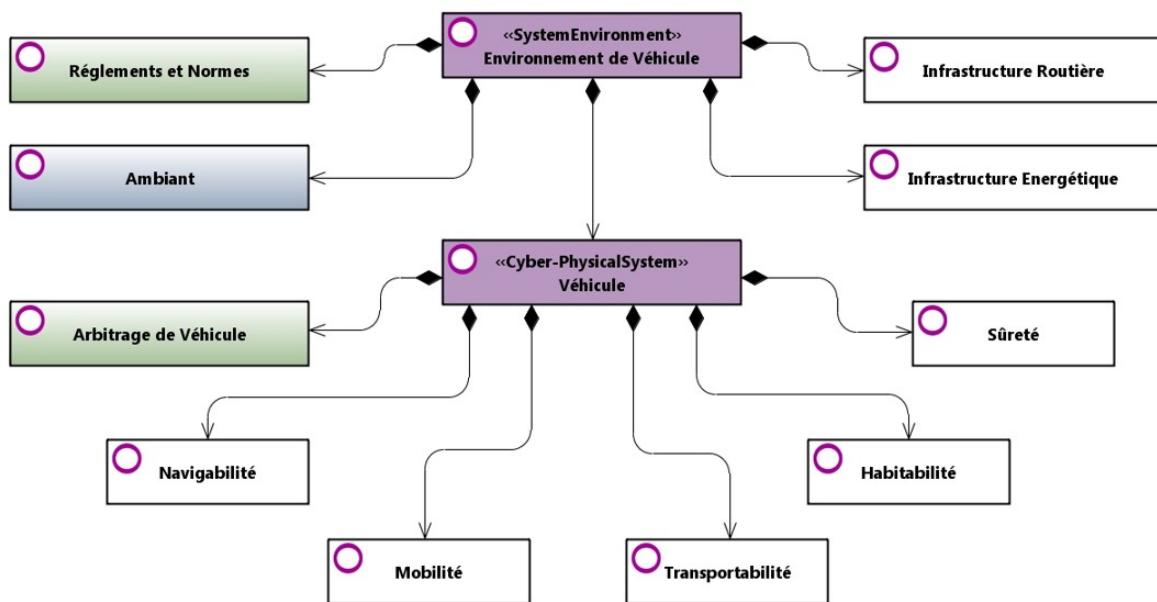
Selon le niveau d'hybridation, il n'est pas possible d'utiliser toutes les architectures pour tous les niveaux d'hybridation. Le [Tableau 2.2](#) illustre cette fonctionnalité des VEHs.

**TABLEAU 2.2** – Matrice des VEHs selon l'architecture et le niveau d'hybridation [90].

	<b>Micro VEH</b>	<b>Mild VEH</b>	<b>Full VEH</b>	<b>Plug-in VEH</b>
<b>Série</b>	/	/	+	+
<b>Parallèle</b>	+	+	+	+
<b>Série - Parallèle</b>	/	/	+	+
<b>Complexé</b>	/	/	+	+

## 2.3 Services & missions des véhicules hybrides

Un véhicule, comme tous les systèmes, a des missions à satisfaire selon certains critères. L'objectif de la définition des missions et services avec les facteurs externes d'un système est de pouvoir prévoir les interactions possibles entre le système et les facteurs environnementaux, l'identification des exigences afin de pouvoir bien mettre en évidence les critères des consommateurs, et la définition des cas d'usages afin de mettre en évidence les interactions et prédefinir les effets potentiels de ces missions. Ces définitions sont utilisées dans tous les niveaux de représentation et de calculs d'évaluation des critères retenus du système. Les missions et services du véhicule peuvent être résumés selon un modèle de missions du véhicule illustré sur la [Figure 2.16](#).



**FIGURE 2.16** – Missions d'un véhicule avec son environnement.

Dans cette représentation, les facteurs externes du système sont aussi présents. Par exemple, les règlementations et les normes contiennent en outre des critères liés au confort thermique du véhicule, à la sûreté du véhicule, aux calculs d'émission de CO<sub>2</sub> et à la

consommation de carburant. Ainsi, le modèle de l'environnement est formé à partir d'éléments comme les conditions ambiantes (température, ensoleillement) ou l'infrastructure par exemple. Les missions et services du véhicule sont classifiés selon l'organisation suivante :

- *Navigabilité* : capacité à assurer un déplacement dans les meilleures conditions. Les critères sont la localisation et la destination.
- *Sûreté* : capacité à assurer les limites physiologiques à l'intérieur du véhicule (par exemple température : entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $+40^{\circ}\text{C}$ ) pour le conducteur et les passagers lors de son déplacement. Les critères usuels sont le niveau et le spectre de vibrations et la température.
- *Habitabilité* : capacité à assurer un confort lors du déplacement du véhicule d'un point à un autre. Les critères sont le bruit, la vitesse, la température, la pression, et la qualité de l'air dans l'habitacle.
- *Transportabilité* : capacité d'un véhicule à déplacer des biens ou des passagers d'un point à un autre. Les critères sont le volume, la température, la masse, la pression, ainsi que la vitesse et l'accélération.
- *Mobilité* : capacité du véhicule à se déplacer d'un point à un autre en fonction du temps de voyage et du chemin. L'objectif absolu est le mouvement longitudinal et latéral du véhicule. Ses critères de satisfaction sont l'accélération, la vitesse, la distance, la durée, les émissions et la consommation.

Afin de satisfaire toutes ces missions le véhicule doit fournir de l'énergie. Si toutes les missions sont considérées comme des consommateurs énergétiques, le consommateur le plus important est la mobilité. Les règles de calcul des exigences de cette mission sont mises en évidence dans la section suivante.

### 2.3.1 Mobilité et cycles de conduite

Pour évaluer les critères nécessaires du service de mobilité, un modèle de déplacement du véhicule, pour un profil fixé, est nécessaire. Au cours de l'étude, différents types de cycles de conduite ont été analysés. Les cycles européens mis plus particulièrement en évidence sont :

- ECE15 : Conduite urbaine, il a été conçu pour représenter les conditions de conduite en ville ([Figure 2.17a](#)).
- EUDC : Il a été ajouté après le quatrième cycle d'ECE pour des modes de conduite qui demandent des puissances plus importantes, en atteignant des vitesses plus élevées ([Figure 2.17b](#)).

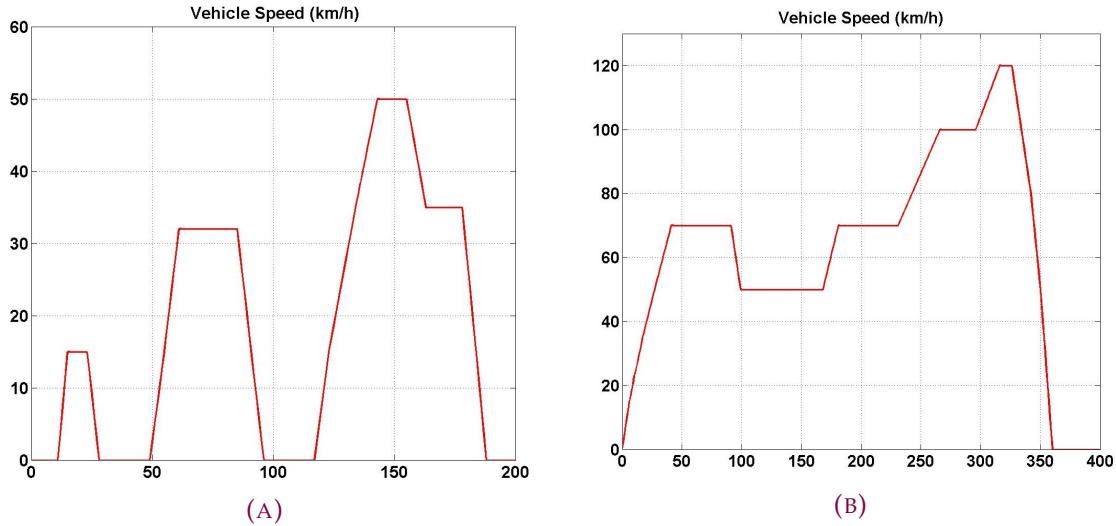


FIGURE 2.17 – Cycles de conduite (a) ECE15, (b) EUDC.

- NEDC (New European Driving Cycle) : c'est un cycle combiné de quatre cycles ECE15 suivi par un cycle EUDC. C'est le cycle le plus utilisé par les fabricants de véhicule pour les calculs d'émissions de CO<sub>2</sub> et de consommation de carburant. Ce cycle n'exige pas des puissances élevées, aussi il n'est pas accepté dans certains états des Etats-Unis et sera remplacé par le WLTC dans l'avenir (Figure 2.18a).
- WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures) : c'est le nouveau cycle standard de l'UE. Le WLTC est plus proche de la conduite réelle que le cycle NEDC. En conséquence, ce cycle permet d'obtenir des résultats plus proches de ceux d'une conduite réelle (Figure 2.18b).

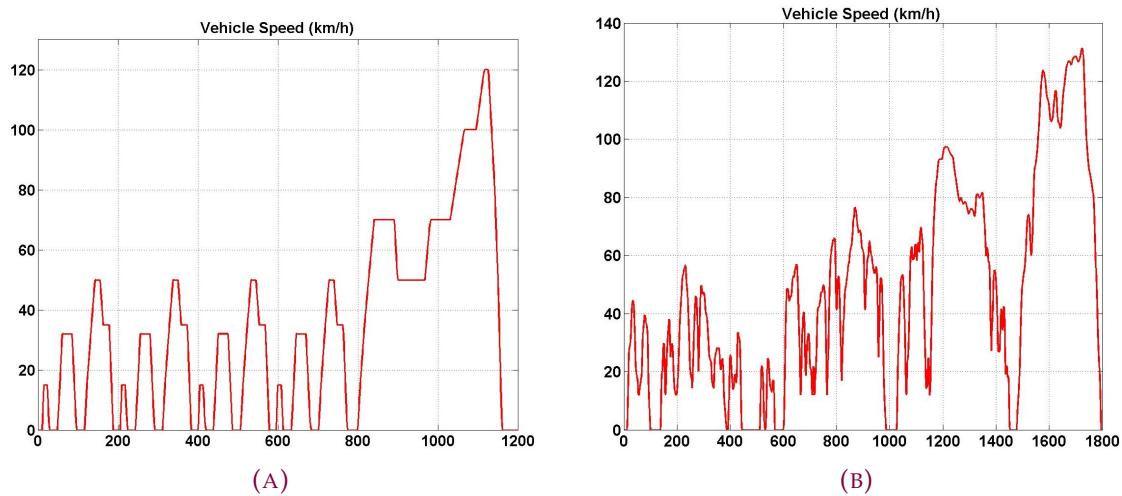


FIGURE 2.18 – Cycles de conduite, (a) NEDC, (b) WLTC.

Afin de pouvoir comparer les résultats des simulations et les données récupérées des constructeurs automobiles (généralement les constructeurs automobiles donnent des critères de performance, comme l'autonomie électrique ou la consommation de carburant par

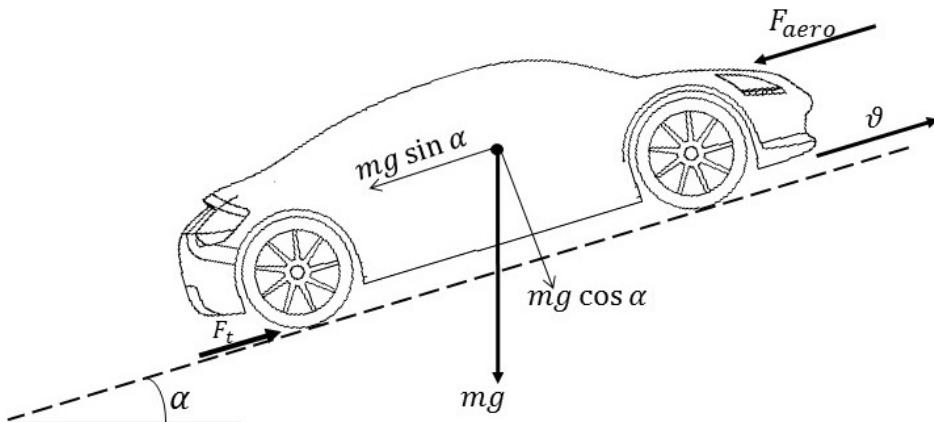
exemple) deux cycles sont utilisés dans le cadre de ce projet : NEDC et WLTC (ces deux cycles sont souvent cités par les constructeurs).

## 2.4 Modèle du véhicule et éléments constitutifs

Le comportement du véhicule est décrit à partir du principe fondamental de la dynamique. L'évaluation de ce comportement est importante pour la vérification de la satisfaction du service mobilité. Cette évaluation est possible par la description de la chaîne de traction, le dimensionnement des composants de cette chaîne et l'analyse du comportement dynamique du véhicule.

### 2.4.1 Modèle dynamique du véhicule

Dans le comportement du véhicule, son mouvement est déterminé par les forces mises en jeu [Figure 2.19](#). Ces forces seront utilisées pour prévoir la puissance nécessaire pour satisfaire la mission de mobilité du véhicule.



**FIGURE 2.19** – Les forces affectant le véhicule sur une voie inclinée.

Dans la [Figure 2.19](#),  $\alpha$  est l'angle d'inclinaison de la route,  $m$  est la masse du véhicule,  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $F_{aero}$  est la force de résistance aérodynamique du véhicule,  $F_t$  est la force de traction et  $\vartheta$  est la vitesse du véhicule. D'une façon bien connue et en utilisant la deuxième loi de Newton, l'accélération du véhicule est :

$$\dot{\vartheta}(t) = \frac{F_t(t) - F_r(t)}{\gamma m} \quad (2.1)$$

où  $\dot{\vartheta}$  est l'accélération du véhicule,  $F_r$  est la somme des forces résistantes et  $\gamma \geq 1$  un facteur correctif de la masse qui permet de prendre en compte les moments d'inertie des composants tournants de la chaîne de traction.

Les forces résistantes sont à analyser plus précisément. Ces forces sont la force aérodynamique ( $F_{aero}$ ), la force de frottement de roulement ( $F_{roll}$ ) et la force d'inclinaison ( $F_{inc}$ ) ([Figure](#)

2.19). La résistance aérodynamique est liée à la résistance de l'air sur la zone frontale et le châssis du véhicule. L'expression de cette force est :

$$F_{aero}(t) = \frac{1}{2} \rho A_f C_a \left( \vartheta(t) - \vartheta_w(t) \right)^2 \quad (2.2)$$

où  $\rho$  est la densité d'air,  $A_f$  est la surface frontale du véhicule,  $C_a$  est le coefficient de traînée aérodynamique et  $\vartheta_w$  est la vitesse du vent. En général, les constructeurs utilisent un paramètre  $SCx$  correspondant au terme  $A_f C_a$  afin de simplifier les notations.

La force due à la pente est exprimée de la façon suivante (Figure 2.19) :

$$F_{inc}(t) = mg \sin \alpha(t) \quad (2.3)$$

Enfin la dernière résistance prise en compte est la force de frottement due au roulement. Bien que l'expression de cette force puisse être très complexe selon le modèle de roue, il est préférable de faire appel à une relation plus simple. Par exemple dans [85], l'expression suivante est proposée pour un véhicule sur une route bitumée :

$$F_{roll}(t) = mg \cos \alpha(t) \left( 0,01 \left( 1 + \frac{\vartheta(t)}{160} \right) \right) \quad (2.4)$$

De ces équations il en résulte la force de résistance d'un véhicule :

$$F_r(t) = F_{aero}(t) + F_{inc}(t) + F_{roll}(t) \quad (2.5)$$

Et l'équation de la dynamique de mouvement associée :

$$m\dot{\vartheta}(t) = F_t(t) - F_r(t) = F_t(t) - F_{aero}(t) - F_{inc}(t) - F_{roll}(t) \quad (2.6)$$

Afin d'assurer la satisfaction du service de mobilité, la force de traction fournie par les composants de la chaîne de traction doit être au niveau demandé. Dans la section suivante, l'analyse des composants de la chaîne de traction des VEHs est approfondie.

#### 2.4.2 Composants des véhicules hybrides

Les principaux composants d'une chaîne de traction des VEHs sont listés dans le Tableau 2.3 selon leurs fonctionnalités :

TABLEAU 2.3 – Liste des composants de chaîne de traction d'un VEH.

Stockage	Transformateur	Distributeur	Effecteur
Batterie	Moteur électrique	Transmission	Dynamique de véhicule
Super condensateur	Alternateur		
Piles à combustible	Moteur thermique		
Réservoir de carburant	Réducteur	Convertisseur	

Dans cette liste, le système de freinage n'apparaît pas car sa fonctionnalité correspond à un **comportement de source** de puissance mécanique et ne doit pas apparaître dans ce tableau.

#### 2.4.2.1 Batterie

La batterie est un stockage électrique constitué d'accumulateurs électriques élémentaires connectés d'une certaine façon pour obtenir la tension et le courant désirés. Pour les véhicules conventionnels, une batterie est utilisée afin d'alimenter le démarreur et les auxiliaires électriques (climatisation, feux, radio, GPS etc.). La tension correspondante est en général de 14 V pour une capacité de 70 Wh.

En revanche pour les véhicules hybrides, le besoin d'énergie électrique est plus important. En plus des auxiliaires électriques, la chaîne de traction électrique est aussi fournie par l'énergie de cette batterie. Ainsi, ces véhicules ont en général deux batteries : une batterie haute tension et une batterie basse tension.

La batterie basse tension est similaire aux batteries utilisées pour les véhicules conventionnels. Les batteries haute tension dépendent du niveau d'hybridation, le niveau de tension peut dépasser les 200 V avec une capacité de 4 kWh.

Il est important de faire un choix pertinent de batterie par rapport aux exigences du système. Les considérations majeures guidant le choix des batteries sont les suivantes [91] :

- *Electrochimie* : les plus communs sont les batteries au plomb, au nickel et au lithium. Le choix peut être fait selon les avantages et inconvénients de chaque type de batterie. Cependant pour les modèles utilisés dans cette étude, seul le paramétrage peut changer. Le fonctionnement reste le même car la batterie est un stockage d'énergie pour la modélisation fonctionnelle et la modélisation multi-physiques.
- *Tension* : les batteries sont référencées par la tension nominale, qui est la différence de potentiel électrique entre les bornes positive et négative. La valeur de la tension est utilisée pour calculer l'énergie maximale de l'ensemble des cellules élémentaires constituant la batterie, pour des modèles plus précis, un profil de tension en décharge peut être pris en considération.
- *Capacité* : la capacité de batterie représente l'énergie spécifique (Ah). Cela se traduit par la valeur du courant de décharge possible durant un temps donné. Si la capacité augmente, le temps d'utilisation de la batterie augmente également. Ainsi, une batterie qui a une grande capacité peut nécessiter une longue durée de recharge.
- *Profil de décharge* : ce profil définit le courant tiré de la batterie. La résistance interne de la batterie et un état de charge faible de la batterie peuvent conduire à une chute de tension pouvant conduire en conséquence à l'impossibilité d'alimenter le système. Dans ce contexte, le profil de courant devient très important pour l'estimation de l'état de charge et d'énergie restant. Une autre propriété ajoutée par le profil de décharge est le cyclage de batterie (rapport déterminé à partir des temps et du nombre de cycles de

charge et de décharge), propriété importante pour l'estimation de l'état de la batterie. Pour des applications complexes comme les véhicules électrifiés, le profil de charge est très variable et dépend du type de conduite.

- *Exigences de température* : la température de fonctionnement de la batterie est très importante selon l'application et le type de batterie. Des températures très basses ou hautes peuvent affecter la performance, la capacité et la durée de vie de la batterie.
- *Exigences physiques* : taille, forme, masse, bornes.
- *Durée de conservation de la charge (Shelf life)* : état de charge pendant le stockage (fonction de la température, de l'humidité et d'autres conditions d'environnement).
- *Etat de santé* : les indicateurs d'état de santé d'une batterie sont la capacité, la résistance interne qui caractérisent l'aptitude à fournir le courant dans les phases de décharge et d'autodécharge. L'état de santé d'une batterie caractérise la capacité de stockage disponible.
- *Conditions environnementales* : vibrations, chocs, etc., conditions atmosphériques (pression, humidité).
- *Coût* : il est lié au coût initial, l'exploitation ou au coût du cycle de vie, chimie.

TABLEAU 2.4 – Comparaison entre différents types des batteries (1 : bien, 5 : mauvais) [91].

	<b>Plomb-Acide</b>	<b>Lithium Ion</b>	<b>Nickel Métal Hydride</b>	<b>Nickel Zinc</b>
<b>Densité volumique d'énergie</b>	4	1	3	2
<b>Densité massique de puissance</b>	4	2	2	3
<b>Profil de décharge</b>	3	3	2	2
<b>Fonctionnement à basse température</b>	3	2	2	3
<b>Rétention de charge</b>	4	2	4	4
<b>Acceptation de charge</b>	3	1	2	3
<b>Rendement</b>	2	1	3	3
<b>Vie</b>	3	1	3	4
<b>Propriétés mécaniques</b>	5	3	2	3
<b>Coût</b>	1	3	3	3

Dans le Tableau 2.4, une comparaison entre différents types de batteries utilisées dans les VEHs est effectuée. De ce tableau, selon les caractéristiques et les propriétés des batteries, la technologie Lithium-ion semble être la solution optimale pour les applications des véhicules électrifiés. Pour des raisons de coût, dans certaines applications de véhicules hybrides qui demandent des puissances électriques relativement faibles (par exemple les hybrides micro) le choix de type de batterie est la technologie Plomb-Acide. Mais pour les véhicules électrifiés avec une demande d'énergie électrique importante, pour des raisons comme le rendement, le volume ou le poids (résultat de la densité d'énergie), des batteries utilisant des technologies

Nickel existent [92], néanmoins, les batteries Lithium-ion sont actuellement les candidates le plus utilisées par les constructeurs automobiles.

#### 2.4.2.1.1 Caractéristiques des batteries

Les performances d'une cellule peuvent changer considérablement selon la température. Dans les batteries avec des électrolytes liquides, l'électrolyte lui-même peut introduire des contraintes sur les limites de la température de fonctionnement. A basse température les piles au lithium souffrent d'un phénomène de placage [91] d'anode provoquant une réduction permanente de la capacité. À haute température, des produits chimiques actifs peuvent détruire la batterie. Entre ces limites, la performance de la cellule s'améliore généralement avec la température comme montré sur la Figure 2.20.

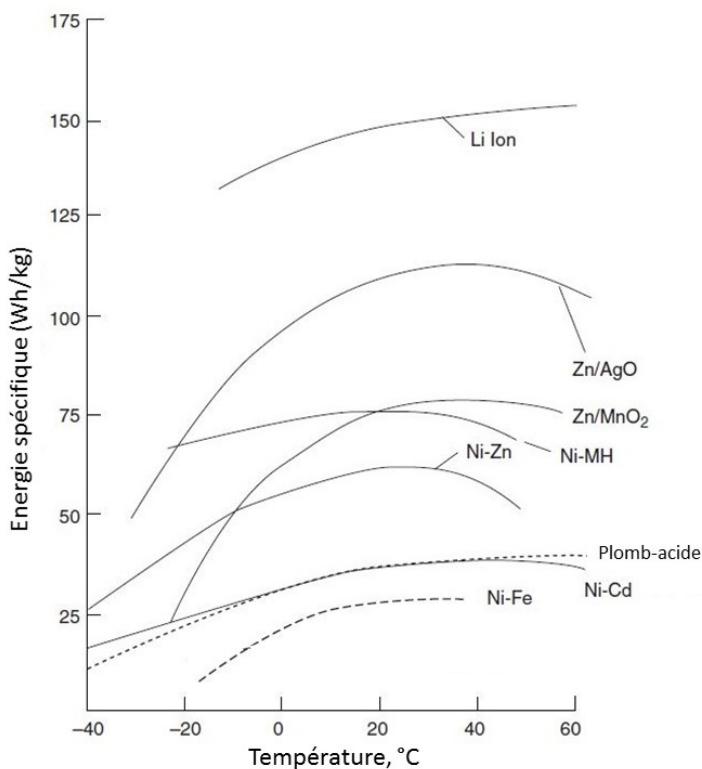


FIGURE 2.20 – L'effet de température sur l'énergie spécifique de batteries selon leur type [91].

La vitesse des réactions chimiques indésirables qui provoquent une fuite de courant entre les électrodes internes de la cellule, augmente avec la température et ainsi le taux de décharge spontanée de la batterie. La résistance interne d'une cellule est dépendante de la température, elle diminue lorsque la température augmente. Avec ces propriétés, il est à noter que la performance de batterie est plus élevée à haute température mais un fonctionnement dans ces zones réduit sa durée de vie.

La génération de chaleur dépend du type de chimie, de la structure, de la température interne / externe, de l'état de charge et du profil de charge / décharge. Pour une même consommation de courant, une batterie NiMH génère un niveau de chaleur plus important qu'une batterie VRLA (Plomb-Acidé) ou qu'une batterie au lithium-ion à des températures

élevées ( $> 40^{\circ}\text{C}$ ). La production de chaleur dans les batteries VRLA et Li-Ion est à peu près la même pour des courants similaires. En règle générale, lorsque la température diminue, le niveau de chaleur générée est plus important en raison d'une augmentation de la résistance interne des cellules.

Bien qu'une batterie doive offrir une capacité de 100% au cours de la première année de service, il est fréquent de constater des capacités inférieures. En outre, les fabricants ont tendance à surestimer les performances de leurs batteries.

Charger avec un niveau de tension plus important pour stimuler la capacité, réduit la durée de vie de la batterie et compromet la sécurité. Le choix des valeurs de tension lors des phases de charge est très important car chaque diminution de 0,1 V par cellule pour une batterie Li-ion double le nombre de cycles de charge/décharge mais diminue la capacité de la batterie (par exemple pour une cellule de batterie type Li-ion, si la tension de charge est de 4,2 V, le nombre de cycles possibles est d'environ 300 à 500 avec une capacité de stockage d'énergie à 100%, mais pour une tension de charge de 3,9 V, le nombre de cycles peut être évalué entre 2400 et 4000 avec une capacité à 65% [93]).

Lorsqu'une batterie est complètement chargée, supprimer le lien entre le chargeur et la batterie permet à la tension de revenir à son niveau nominal (par exemple le niveau nominal de tension d'une cellule de la batterie Li-ion est 3,7 V). Un mode de charge, d'une batterie Li-ion, fonctionne correctement si la charge se termine lorsque la batterie est pleine.

#### 2.4.2.1.2 Vieillissement de la batterie

##### Baisse de capacité

Le stockage d'énergie d'une batterie peut être divisé en trois parties «virtuelles» : l'énergie disponible, une partie vide avec la possibilité de recharger et une partie inutilisable [94].

La plupart des batteries dans le domaine des véhicules automobiles sont utilisées avec un niveau de charge inférieur à leurs capacités maximales, et cela même si le constructeur précise que la batterie doit être utilisée à sa capacité maximale. Au cours du temps, la performance et la capacité de la batterie diminuent. Un pack de batteries doit être remplacé lorsque la capacité descend en dessous d'une valeur typique de 80% de sa capacité nominale.

En plus des pertes liées au vieillissement, la sulfatation (phénomène d'accumulation de sulfate de plomb sur les électrodes) et la corrosion des plaques sont les causes principales de défaut des batteries au Plomb-Acide. Si la batterie est utilisée à un état de charge faible, une mince couche de cristaux de sulfate de plomb se forme sur la plaque cellulaire négative. Si un niveau trop important de cette couche, dénommée sulfatation, est diagnostiquée suffisamment tôt, une charge d'égalisation peut inverser ce phénomène. Avec des batteries à base de nickel, cette couche se traduit par la formation de cristaux (mémoire) et une décharge complète peut restaurer la batterie. Pour les batteries lithium ion, le processus de vieillissement est l'oxydation des cellules, un résultat qui se produit naturellement et ne peut pas être inversé.

##### Augmentation de résistance interne

La résistance interne de la batterie doit être faible afin d'assurer le niveau de puissance

demandé. Ceci est particulièrement important avec des charges importantes et avec des impulsions de courant de niveau élevé. Une résistance trop importante provoque l'effondrement de la tension et déclenche un arrêt rapide par un circuit électronique de protection ou par le système de management de la batterie (BMS) [94].

Les batteries de technologie Plomb Acide ont une très faible résistance interne et répondent bien aux courants impulsifs de niveau élevé. En raison de leur lenteur (temps de récupération) inhérente, elle n'est pas adaptée à une décharge soutenue à courant élevé et ont besoin d'un temps de repos pour récupérer leur niveau de performance. L'augmentation de la résistance interne peut induire des phénomènes de sulfatation et de corrosion des plaques, la température affecte aussi la résistance interne qui s'accroît aux faibles températures. Augmenter la température des batteries mène momentanément à la réduction de la résistance interne et permet ainsi d'augmenter leur temps d'utilisation. Mais cette démarche permet de réduire les phénomènes cités précédemment et ramène ainsi la batterie à son niveau de performances nominal.

La résistance interne des batteries à base de nickel peut varier selon leurs propriétés chimiques. La technologie NiCd offre une résistance interne faible donc permet une fourniture de courant élevée. En revanche, la batterie NiMH offre une résistance interne relativement plus haute et leur résistance interne augmente après l'utilisation de la batterie (entre 300 et 400 fois) [95].

De plus, les batteries Li-ion ont une résistance interne relativement plus élevée que les batteries qui sont basées sur de nickel. La résistance interne des batteries Li-ion augmente avec l'utilisation et le vieillissement. Leur haute résistance interne est une des raisons principales de perte de capacité de ces batteries. L'avancement de la technologie des matériaux permet de mettre sous contrôle cette augmentation [96].

### Autodécharge

Toutes les batteries sont affectées par l'autodécharge. Ce phénomène n'est pas un défaut de fabrication, même si de mauvaises pratiques de fabrication et une mauvaise manipulation peuvent accroître les conséquences de ce problème. Le niveau de fuites électriques (autodécharge) (Tableau 2.5) varie avec la chimie et les cellules primaires, le lithium est par exemple parmi les meilleurs conservateurs d'énergie. Les systèmes rechargeables à base de nickel ont le niveau de fuites parmi les plus importants et ont besoin d'être rechargés si la batterie n'a pas été utilisée pendant quelques jours. L'autodécharge est plus élevée juste après la charge et diminue ensuite [97].

TABLEAU 2.5 – L'estimation d'autodécharge dans le temps selon les types de batterie.

Type de Batterie	L'Autodécharge estimé
Plomb-Acide	5% par mois
Base de Nickel	10 à 15% en 24 heures, après 10 à 15% par mois
Lithium-ion	5% en 24 heures, après 1 à 2% par mois

Une des meilleures batteries en termes d'autodécharge est celle avec la technologie Plomb Acide, elle perd seulement 5% par mois. Mais cette chimie a aussi l'énergie spécifique la plus basse et elle est mal adaptée pour une utilisation portable. Le Li-ion s'autodécharge d'environ 5% au cours des 24 premières heures après la charge et de 1 à 2% par la suite par mois. Le circuit de protection a besoin d'énergie ce qui augmente la décharge de 3% supplémentaires par mois. L'autodécharge sur tous les types de batteries augmente pour des températures plus élevées et le taux double généralement tous les 10°C. Par exemple, une perte d'énergie notable se produit si une batterie est laissée dans un véhicule chaud. Les cycles charge/décharge et le vieillissement augmentent également le phénomène d'autodécharge.

L'autodécharge des batteries Li-ion est relativement stable tout au long de sa durée de vie et ne subit pas d'augmentation notable avec l'âge. Un séparateur défectueux augmente cependant l'autodécharge pour cette technologie de batteries. Dans les cas extrêmes, la chaleur générée par la fuite électrique affaiblit encore le séparateur endommagé, ce qui peut conduire à une dégradation thermique et en conséquence un accroissement de l'autodécharge. L'amélioration des méthodes de fabrication a minimisé ce problème sur les nouvelles batteries.

### Coupure de tension

La totalité de l'énergie stockée dans la batterie n'est pas disponible pour l'utilisation et une certaine réserve doit être conservée. Typiquement une batterie pour une application automobile ne peut être déchargée complètement et il est préférable de restreindre l'état de charge dans un intervalle de 20 à 80%. Ceci afin d'assurer la meilleure efficacité possible et d'améliorer la durée de vie [91]. Une décharge profonde avec une recharge complète provoque un stress trop important y compris pour les batteries Li-ion [94].

#### 2.4.2.2 Super Condensateurs

Les super-condensateurs peuvent être utilisés pour fournir/absorber de courtes impulsions d'énergie par les VEHs pendant les phases d'accélération/décélération. Ils ne nécessitent pas de remplacement aussi régulier que les batteries car leurs propriétés sont moins affectées par les cycles de charge et décharge profondes subis de façon répétitive [98].

Les super-condensateurs peuvent aussi être complètement rechargés à partir d'une décharge totale en quelques secondes. En particulier, ces propriétés les rendent idéales pour une utilisation dans les systèmes comportant une fonction de freinage par récupération.

Fondée sur les technologies actuelles, la conception de la batterie doit faire un compromis entre l'énergie, la puissance spécifique et la durée de vie. La difficulté d'obtenir simultanément des valeurs élevées pour l'énergie spécifique et la durée de vie, a conduit les ingénieurs/chercheurs à mener des réflexions sur le fait que le système de stockage d'énergie des VEs et des VEHs devrait être une hybridation entre une source d'énergie et une source d'alimentation.

Les sources d'énergie, sont principalement constituées de batteries et de piles à com-

bustible à énergie spécifique élevée, tandis que la source d'alimentation a une puissance spécifique élevée. Les sources d'alimentation peuvent aussi être rechargées à partir de la source d'énergie lors d'une conduite moins exigeante ou de freinages régénératifs. Les supercapacités sont caractérisées par une puissance spécifique beaucoup plus élevée mais une énergie spécifique beaucoup plus faible par rapport aux batteries ou aux piles à combustible.

L'énergie spécifique des super-condensateurs est de l'ordre de quelques wattheures par kilogramme. Toutefois, la puissance spécifique peut atteindre 3 kW/kg, cette valeur est beaucoup plus élevée que celle des batteries quel que soit leur type. En raison d'une densité d'énergie spécifique faible et de la dépendance de la tension aux bornes, il est difficile d'utiliser uniquement des super-capacités comme stockage d'énergie pour les VEs ou les VEHs. Néanmoins, il existe un certain nombre d'avantages qui peuvent résulter de l'utilisation de la super-capacité comme source d'énergie auxiliaire [99].

Dans le **Tableau 2.6**, une comparaison entre batterie et super-capacité est effectuée.

TABLEAU 2.6 – Comparaison des stockages électriques pour VEHs [98].

Performance Disponible	Batterie Plomb-Acide	Super Condensateur
Temps de Charge	1 à 5 heures	0,3 à 30 s
Temps de Décharge	0,3 à 3 heures	0,3 à 30 s
Energie (Wh/kg)	10 à 100	1 à 10
Cycle de Vie (nombre charge/décharge)	1000	> 500 000
Puissance Spécifique (W/kg)	< 1000	< 10 000
Rendement en énergie lors des cycles Charge/Décharge	0,7 à 0,85	0,85 à 0,98

#### 2.4.2.3 Pile à combustible

Au cours des dernières années, l'utilisation des piles à combustible dans les véhicules a fait l'objet d'une attention accrue. Contrairement à une batterie, la pile à combustible génère de l'énergie électrique aussi longtemps que l'alimentation en carburant est maintenue. En comparaison avec les véhicules électriques à batterie, le véhicule à propulsion à pile à combustible a l'avantage de pouvoir parcourir une plus grande distance avec des temps de charge rapides. En comparaison avec les véhicules thermiques, il a l'avantage d'un meilleur rendement énergétique et des émissions beaucoup plus faibles en raison de la conversion directe de l'énergie libre dans le carburant en énergie électrique, sans subir de combustion.

#### 2.4.2.4 Réservoir de carburant

Le réservoir de carburant est destiné à recevoir et à stocker le carburant d'un véhicule automobile sous forme liquide ou gazeuse. Les calculs d'autonomie, d'émission et de consommation de carburant sont faits par la différence au regard de son volume. Les paramètres importants du réservoir de fuel à prendre en compte sont la fiabilité liée à la sûreté du véhicule, son volume maximal et initial, le type de carburant pour déterminer la valeur calorifique de carburant et son poids qui peut affecter les performances du véhicule.

#### 2.4.2.5 Moteur thermique

Les moteurs thermiques (moteur à combustion interne) sont les transformateurs qui convertissent l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique. Deux types de moteur thermique sont utilisés dans les chaînes de traction automobile [89]. Ils sont caractérisés par leur cycle de fonctionnement :

- *Le cycle Otto* : allumage par étincelle et combustion à volume constant. Il est alimenté par de l'essence ou du gaz naturel.
- *Le cycle Diesel* : allumage par compression enflammée et combustion à pression constante. Il est alimenté par du gasoil (diesel).

Les deux types d'allumage sont utilisés mais le cycle diesel a un meilleur rendement. Leur différence est due au cycle thermodynamique. Dans le cycle Otto, la combustion se produit à volume constant, alors que dans le cycle Diesel, la combustion se produit à pression constante.

Le rendement des moteurs thermiques dépend de la perte d'énergie en raison du frottement, du refroidissement, les pertes pour amener le carburant vers le moteur, de l'isolation thermique et des pertes thermiques. Le rendement moyen (rapport entre la puissance mécanique fournie par le moteur et la puissance du carburant consommé calculé à partir de la valeur calorifique) des moteurs thermiques en cycle Otto est de 25% et en cycle Diesel de 30% pour le point de fonctionnement optimal. Cependant, comme le point de fonctionnement courant du véhicule se situe rarement au point de fonctionnement optimal, il s'ensuit que le rendement des moteurs thermiques est inférieur aux valeurs données ci-dessus. En plus, dans les véhicules automobiles, le groupe de traction thermique contient le moteur thermique avec une boîte de vitesse (qui diminue le rendement) pour s'approcher d'un fonctionnement au plus proche de la zone optimale du moteur thermique pour une vitesse donnée.

Pour les véhicules hybrides, les constructeurs d'automobiles utilisent le moteur thermique au cycle Otto afin de profiter de leur zone de fonctionnement optimal qui est plus adapté pour les VEHs (utiliser le moteur électrique pour les besoins élevés de couple et utiliser le moteur thermique avec sa boîte de vitesse pour les besoins de vitesses élevées). Des précisions seront données dans la [Chapitre 4](#) concernant le fonctionnement optimal, sa modélisation fonctionnelle (avec le paramétrage du groupe traction thermique) avec la boîte de vitesse qui

nécessite plus de spécification.

#### 2.4.2.6 Machine électrique

Les machines électriques sont des transformateurs d'énergie bidirectionnels. Elles transforment l'énergie électrique en énergie mécanique rotationnelle et, réciproquement, l'énergie mécanique en énergie électrique. Le choix des machines électriques de traction pour les systèmes de propulsion hybride est une étape très importante qui nécessite une attention particulière. L'industrie automobile est toujours à la recherche du système électrique de propulsion le plus approprié pour les VEH et même pour les VE. Dans ce cas, les principales caractéristiques sont le rendement, la fiabilité et le coût auxquels il faut ajouter le niveau de vibration ou de bruit. Le processus de choix des systèmes de propulsion électrique appropriés est ainsi difficile et doit être réalisé au niveau du système. Les critères guidant le choix des systèmes de propulsion électrique pour les VEH dépend principalement de trois facteurs [100] :

- Le cycle de conduite,
- Les contraintes du véhicule,
- La source d'énergie.

D'un point de vue industriel, les principaux types de machines électriques adoptées ou en cours d'évaluation pour les VEH comprennent la machine à courant continu (CC) qui a été abandonnée, la machine asynchrone (IM), les machines synchrones à aimants ou rotor bobiné (AP) et le moteur à réluctance variable (VRM).

##### 2.4.2.6.1 Machines à courant continu

Les machines à courant continu sont appropriées pour l'utilisation dans les véhicules électrifiés par leurs caractéristiques de couple et de vitesse. De plus, leur chaîne de commande est plus simple que les autres types de moteurs. Néanmoins, ils ont besoin d'entretien à cause de la présence des balais, leur rendement est également plus bas que celui des autres technologies de machine électriques, leur vitesse maximale est limitée et le rapport poids/puissance défavorable [100]. De plus, les progrès dans les semi-conducteurs et l'électronique de puissance facilitant la commande des autres types de machines font que les moteurs asynchrones (à induction) et les moteurs synchrones sont devenus plus intéressants.

Le coût des machines à courant continu (CC) est moins intéressant en comparaison avec les autres types de machines, mais pour des besoins de puissance plus modestes ce type de machine peut être un bon choix.

##### 2.4.2.6.2 Machines asynchrones

Ces machines sont aussi appelées machines à induction (IM). Elles sont de bonnes candidates à une utilisation dans la chaîne de traction des VEHs grâce à leur fiabilité, leur robustesse, leur faible besoin d'entretien et leur faible coût [100].

Il existe deux types d'approche pour la commande des machines asynchrones : la commande scalaire et la commande vectorielle. La commande scalaire est utilisée pour des applications avec des variations lentes de vitesse alors que la commande vectorielle est plus performante et mieux adaptée à la commande en couple. Ainsi, pour les applications des VEHs, la commande vectorielle est retenue. Ce type de commande est utilisé pour une commande précise du couple et de la vitesse, avec des grandes performances dynamiques et la possibilité aussi de réguler à basse vitesse. La commande vectorielle est plus complexe, la difficulté majeure pour déployer cette approche est d'obtenir une bonne estimation de la pulsation des courants rotoriques et du champ magnétique rotorique. Un autre inconvénient des machines IMs est leur rendement plus faible comparé à celui des machines synchrones à cause de leurs bobinages au rotor, qui entraînent donc des pertes cuivre et le problème du couple de décrochage.

Ces propriétés des IMs peuvent montrer que ce type de machine présente beaucoup de désavantages, mais avec leur capacité de créer du couple, leur robustesse, leur faible coût et les progrès du pilotage, ce type de machine est très intéressant pour l'utilisation en chaîne de traction des VEHs (ils sont aussi utilisés dans le cas des VE comme par exemple sur la Tesla).

#### 2.4.2.6.3 Machines synchrones

##### 1. Avec des aimants permanents – AP

La machine synchrone à aimants permanents (AP) est une autre candidate importante pour une utilisation dans les chaînes de traction des VEHs. Elle cumule de nombreux avantages comme son volume faible pour une puissance de sortie importante, leur rendement important et une meilleure dissipation des pertes. Les APs sont aussi la seule technologie de machine qui puissent être utilisées dans les solutions de type moteur-roue. Mais la caractéristique puissance-vitesse de ce type de machines peut être limitée et les possibilités de défluxage (méthode de commande de la machine afin de diminuer le flux magnétique créé et permettant d'accéder à des vitesses importantes à puissance constante) sont plus limitées que celles des machines à rotor bobiné. Le risque d'utiliser un défluxage mal maîtrisé est la démagnétisation des aimants d'où il peut résulter une diminution du rendement.

Les caractéristiques des machines à APs dépendent de l'intégration et du nombre des aimants. Ainsi, les aimants peuvent être en surface ou enterré à l'intérieur du rotor.

Malgré tous les avantages des machines à APs, le coût et la dépendance, surtout aux pays producteurs de matériaux utilisés dans les aimants comme Nd, Sm etc., ainsi que leur commande similaire aux machines asynchrones, font des machines à APs, des moteurs plus difficiles à intégrer dans les processus de production.

##### 2. Avec le rotor bobiné – MS

La machine synchrone à rotor bobiné (MS) est une autre candidate pour les applications des VEHs. La différence avec les machines à APs est leur bobinage au rotor à la place des aimants permanents. Leur avantage est un défluxage plus facile permettant ainsi d'atteindre des vitesses plus élevées. De plus, comme leur fonctionnement est similaire

à celui des machines à APs, elles en cumulent les avantages et les désavantages. Le désavantage à ajouter est d'avoir un rendement plus faible que celui des machines à APs, (mais aussi densité de puissance et une inertie plus important), en raison des pertes au rotor dues à l'existence des bobinages. Les avantages des machines synchrones à rotor bobiné par rapport aux machines à APs sont le prix et leur indépendance vis-à-vis du marché des aimants permanents.

#### **2.4.2.6.4 Machines à réluctance variable (VRM)**

Les machines à réluctance variable (VRMs) suscitent l'intérêt des fabricants de véhicules automobile en raison de leurs potentiels. Comme ces machines ont l'avantage d'être simples à construire, comparativement aux autres types de machine, elles ont une tolérance aux pannes plus importantes, une architecture de commande relativement simple et disposent d'une caractéristique couple-vitesse très adaptée aux VEHs [100].

Leurs inconvénients sont le bruit acoustique, l'ondulation de couple, le besoin d'avoir un convertisseur adapté et la possibilité de génération de bruit résultant d'une interférence électromagnétique. Par conséquent, les VRMs ne sont pas standardisés pour les applications des VEHs, même si des exemples existent.

#### **2.4.2.6.5 Autres types de machine électrique**

Un dernier type à ajouter aux machines synchrones est la technologie des moteurs hybrides (ou le moteur hybride à assistance des APs). Par construction, ces moteurs ont un double rotor et un stator. Le rotor intérieur est un rotor de VRM et le rotor extérieur est un rotor de machine à APs. Ces machines offrent des avantages comme un faible coût des aimants (car elles utilisent des ferrites comme aimants permanents), une meilleure capacité de défluxage et une haute densité de couple pour une large plage de vitesse [101]. Néanmoins, les machines hybrides ont une construction plus complexe donc coûteuse et sont encore en cours de développement pour leur utilisation dans l'industrie automobile.

Dans [100], une comparaison entre ces types de moteurs électriques a été étudiée et un résumé de cette comparaison est illustré ci-dessous.

**TABLEAU 2.7** – Comparaison des types de machine électrique utilisables pour la traction des VEHs [100] (1 : Mauvais, 5 : Très Bien).

Le Système de Traction	Asynchrone	Synchrone	VRM
Caractéristiques			
Densité de Puissance	3,5	5	3,5
Rendement	3,5	5	3,5
Facilité de commande	5	4	3
Fiabilité	5	4	5
Maturité de Technologie	5	4	4
Coût	5	3	4

Dans le Tableau 2.7, la machine asynchrone semble être la candidate le plus adaptée à la propulsion électrique des VEHs en zone urbaine. Mais, la solution est dépendante du système et des priorités du constructeur. Pour un véhicule automobile le choix de la technologie de motorisation dépend fortement du coût et du rendement, en revanche pour un véhicule lourd ou militaire, les critères importants sont plutôt la fiabilité et la densité de puissance. Néanmoins, parmi les architectures et classifications des automobiles citées précédemment (Section 2.1), ayant des caractéristiques déterminées par la propulsion électrique, la capacité d'une gamme de vitesse étendue et le rendement énergétique sont les deux caractéristiques de base influencées par la dynamique du véhicule et l'architecture du système. Cela oriente le choix de la technologie de propulsion électrique qui conduit aux calculs de performance (par exemple accélération) liés au besoin de dynamique du véhicule pour satisfaire le niveau de besoin de l'utilisateur. En même temps, les cycles de conduite qui ont été introduits (Section 2.3.1) montrent que le véhicule n'a pas toujours besoin d'avoir un niveau de performance très élevé. Mais les critères comme le rendement du système véhicule dans sa globalité ou l'architecture de la chaîne de traction du véhicule ont également un rôle très important pour le choix de la technologie de propulsion électrique [100].

Récemment, une nouvelle utilisation des machines électriques a été développée pour des applications de traction nécessitant des moteurs plats ou style HUB (moteurs-roue ou pancake). Les caractéristiques de ce type de motorisation sont portées par le besoin de simplification de la chaîne de traction (pas besoin de réducteur), une accélération sans vibrations ou des variations brusques, faibles ondulations de couple, coûts de fabrication réduits et fonctionnement à des températures et des vitesses élevées. Certaines de ces propriétés ont une conséquence directe sur le bruit acoustique et le coût.

A noter que le rendement de la machine à vitesse constante varie avec la charge. Typiquement le rendement peut varier de 50% à 95% pour un niveau de charges compris dans l'intervalle de 50% à 100% de la charge nominale.

### 2.4.2.7 Réducteur

Le choix d'un couplage adapté entre la chaîne de traction et de transmission a été traité par certains auteurs mais souvent en négligeant la perte d'énergie dans la transmission (transmission idéale). Comme la propulsion thermique contient une boîte de vitesse, l'élément réducteur est déjà compris dans ce sous-système. En revanche, en raison des caractéristiques des machines électriques, une boîte de vitesse n'est pas nécessaire mais un réducteur est utilisé pour un couplage plus efficace entre la chaîne de traction électrique et la transmission du véhicule. Le réducteur peut être caractérisé non seulement par le rapport de transmission, mais aussi par ses rendements, directe et inverse, et les moments d'inertie ramenés par la charge. Son rapport de transmission  $\tau$  est le rapport entre la vitesse en sortie du réducteur  $\omega_L$  et la vitesse du moteur  $\omega_m$  :

$$\tau = \frac{\omega_L}{\omega_m} \quad (2.7)$$

Dans les applications récentes, le réducteur est pris en compte comme transmission d'un véhicule et modélisé comme un transformateur. Cet élément utilisé pour satisfaire plusieurs services du véhicule, peut également être pris en compte comme un élément de service du confort physique et être modélisé d'une façon plus complexe.

Cela dépend de la nécessité du calcul qui est choisi par le concepteur. Suivant l'étude, la transmission du véhicule va être modélisée simplement comme un réducteur qui satisfait le besoin de transformation de vitesse pour le service mobilité du véhicule.

### 2.4.2.8 Convertisseurs

Les convertisseurs utilisés dans un VEH sont les hacheurs, les onduleurs et convertisseurs DC/DC [88]. Ces composants ont pour fonction de changer le niveau de tension, commander les machines électriques, gérer le freinage régénératif et faire le lien entre les batteries et les auxiliaires électriques.

Pour les onduleurs qui ont pour rôle principal d'assurer la commande des machines électriques de traction et de l'alternateur, le but final est d'assurer le fonctionnement des machines et préférentiellement dans les zones à fort rendement. Généralement les hacheurs sont utilisés pour la commande des machines électriques auxiliaires comme les lèvres vitres ou les machines pour la climatisation. Les convertisseurs DC/DC font le lien entre les différents niveaux de tension nécessaires pour les auxiliaires et aussi pour les calculateurs ayant besoin de niveaux de tension spécifiques.

Du point de vue énergétique, les convertisseurs peuvent être pris en compte comme un rendement en raison de leur fonctionnement. Les convertisseurs électriques ne changent pas la nature physique des grandeurs mises en jeu et, par conséquence, peuvent être considérés comme un rendement pour la modélisation et les simulations du système. Ces convertisseurs ont en général peu de pertes en raison, en particulier, des progrès dans la technologie des

semi-conducteurs. Les pertes des convertisseurs peuvent être décomposés selon la forme suivante :

$$P_{conv-p} = P_{cond} + P_{fix} + P_{sw} \quad (2.8)$$

où  $P_{conv-p}$  représente les pertes totales de convertisseur,  $P_{cond}$  sont les pertes par conduction,  $P_{fix}$  sont les pertes fixes (indépendantes de la charge et de la fréquence de commutation) et  $P_{sw}$  sont les pertes par commutation. Un ordre de grandeur du rendement d'un convertisseur est dans l'intervalle 95% à 98% [102, 103] (même s'il dépend du point de fonctionnement).

### 2.4.3 Gammes de véhicules hybrides

Les gammes des VEHs commercialisées en France sont illustrées en annexe ([Annexe A](#)). Les valeurs peuvent être approximatives pour des raisons de confidentialité. Ce tableau montre que les constructeurs automobiles privilégient la tendance à des véhicules Plug-in, car la puissance du moteur électrique est plus importante et l'autonomie électrique est relativement plus grande en comparaison avec celle des VEHs non rechargeables. La vitesse maximale en mode électrique est approximativement la même pour tous les véhicules PHEVs ainsi que la capacité de batterie en kWh. Sauf quelques exceptions, les constructeurs automobiles ont fait le choix de batteries Li-ion. De plus, la technologie du moteur électrique est généralement le moteur synchrone.

Les gammes et les caractéristiques du véhicule seront utilisées pour la validation des modèles par simulations. Deux véhicules PHEVs sont choisis pour leurs caractéristiques dans la moyenne des VEHs pour différents types de châssis : Toyota's Prius et Volvo's XC60.

## 2.5 Conclusions partielles

Ce chapitre a été structuré selon des sections incluant un historique, les niveaux d'hybridation et les architectures (et les modes de fonctionnement) des VEHs, les services et les missions des VEHs, en particulier le service *mobilité* et les cycles de conduite, et des éléments du modèle dynamique du véhicule avec ses éléments constitutifs pour finir avec les gammes des VEHs.

Dans la première section, l'histoire des VEHs a été brièvement présentée ainsi que les architectures de la chaîne de traction des VEHs utilisées usuellement. Ces architectures et les modes de fonctionnement des VEHs selon leurs architectures seront prises en compte dans l'application à un VEH de la méthodologie proposée afin de montrer les capacités de celle-ci ([Chapitre 4](#)).

La deuxième section a présenté les services et les missions des VEHs, indispensables pour une optimisation de l'énergie, en particulier les consommateurs qui ont une demande en énergie supérieure à celle des autres services du véhicule. Un des services le plus important

à satisfaire, la *mobilité*, a été analysé et les cycles de conduite nécessaires pour l'évaluation de l'autonomie et de la consommation du carburant ont été présentés. Certains cycles de conduite dont les cycles ECE15, EUDC, NEDC et WLTC ont également été détaillés. Ces cycles représentent la mission de *mobilité* à accomplir et peuvent être utilisés comme moyen de valider la méthodologie et le modèle du système avec ses paramètres. Pour le cycle NEDC, les constructeurs d'automobiles donnent les valeurs caractéristiques d'autonomie électrique et de consommation.

Finalement, la troisième section reprend le modèle dynamique du véhicule et les éléments constitutifs d'une chaîne de traction des VEHs afin de comprendre les composants à modéliser, dans le but de construire et optimiser le système global. Les éléments introduits sont les composants clés pour le système, car leur fonctionnement et leurs caractéristiques seront pris en compte pour la construction des composants du modèle de la chaîne de traction d'un VEH pour son optimisation énergétique. Leurs comportements physiques lors de leur utilisation, par exemple le vieillissement ou les limites d'état de charge de la batterie, pour les applications automobiles, ont été mis en évidence afin de considérer leur paramétrage dans la construction des modèles associés dans la suite de ce document.

Enfin, en [Annexe A](#), un tableau est présenté avec des paramètres importants des VEHs commercialisés en France. Cette base de données sera utilisée en simulation pour une première validation du modèle et aussi pour l'évaluation de la consommation et de l'autonomie électrique. Ces performances seront comparées à celles données par les constructeurs dont les valeurs seront des cibles à atteindre avec la stratégie de la gestion d'énergie développée.

## Chapitre 3

# Modélisations fonctionnelles énergétiques

Dans les chapitres précédents, l'objectif de la thèse, la revue méthodologique et les éléments de modélisation pour l'optimisation des véhicules hybrides ont été définis. Dans ce chapitre, le premier objectif de la thèse, qui consiste dans la définition d'un formalisme de modélisation fonctionnelle modulaire, est traité. Les travaux abordés sur ce sujet au cours des trois années de thèse ont donné lieu à cinq publications [25, 104-107].

Les contextes économique et écologique ont amené l'industrie et les chercheurs à s'intéresser au développement optimal d'un système au regard de critères comme les rendements local et global [40, 108-110]. Les progrès réalisés dans la technologie des composants, des systèmes de communication et d'information rendent les systèmes « *plus intelligents* » mais aussi plus complexes. Grâce à ces avancées, l'élaboration des stratégies de gestion d'énergie et la simulation des solutions envisagées sont devenues essentielles dans le processus de conception d'un système [22]. Pour cette raison, la modélisation et la simulation représentent des étapes importantes dans la phase de conception des systèmes.

Les approches existantes (modélisations multi-physiques ou par Bond Graph [24] par exemple) sont fondées sur les interactions d'effort et de flux selon les natures physiques des systèmes. Par la suite, le modèle obtenu peut être utilisé pour l'analyse du système, ainsi que pour la synthèse des lois de commande optimale [29, 111]. La méthodologie Bond Graph a conduit au développement de nombreux outils de modélisation multi-physiques (AmeSim, Dymola, PhiSim, etc. [53, 71, 112]).

Ces outils permettent de modéliser le système uniquement au niveau de représentation multi-physiques. Cependant, un système peut être défini à plusieurs niveaux, appelées dans la suite *niveaux de représentation d'un système*, où les interactions mises en jeu sont différentes selon le niveau de représentation choisi. La modélisation multi-physiques est utilisée pour la représentation de l'architecture du système à partir des composants technologiques. Elle s'ap-

puie sur des modèles analytiques qui fournissent une description précise du comportement du système. Comme il sera plus particulièrement abordé dans la suite, les autres niveaux de représentation sont élaborés selon une autre description liée aux fonctions, à la mission, etc. du système. Ainsi, des outils de modélisation spécifiques pour différents niveaux de représentation sont nécessaires. De plus, même s'il existe des outils pour la modélisation système comme Papyrus ou PhiSystem (Sherpa Engineering) fondés sur l'approche SysML, il n'existe aucun outil pour simuler les modèles créés.

Les niveaux de représentation d'un système sont définis en absolu et traduisent la nature de l'objet considéré. Par exemple, pour les véhicules automobiles, il est important de séparer la modélisation du véhicule en incluant sa description (modélisation système, exigences, etc.) et la modélisation des différents composants. Par ailleurs, il est essentiel de formaliser un langage spécifique pour chaque niveau de représentation du système.

Un véhicule automobile peut être défini par un ensemble de missions ou de services (mobilité, navigabilité, sécurité et confort des passagers, ...). C'est un *système de missions* qui est finalisé par rapport à son *sur-système* (contient le système par rapport à son environnement et l'infrastructure ; par exemple le sur-système d'un véhicule est composé des stations-services, le réseau routier etc.) et est régit par les normes et règlementations du *méta-système* (qui représente un ensemble de règles, par exemple les physiques du système et son environnement) [32]. De même, le véhicule automobile peut être défini par une architecture d'*ensembles fonctionnels* qui réalisent les missions : production et distribution d'énergie, mouvement du véhicule, réalisation du confort thermique, etc. Enfin, ces ensembles fonctionnels sont réalisés par des *équipements* tels un moteur, un compresseur, un ventilateur, etc. Ainsi, le même véhicule peut être entièrement représenté par trois architectures de nature différente : les missions, les ensembles fonctionnels et les équipements. Les niveaux d'un système sont illustrés dans la Figure 3.1.



FIGURE 3.1 – Niveaux d'un système.

Les modèles systémiques (ou de définition), décrits généralement pour un langage système type SysML, permettent de définir à différents niveaux d'abstraction le véhicule, ses principales fonctions ainsi que son organisation en composantes physiques ou technologiques. La méthode de modélisation systémique qui est présentée dans cette étude est très fortement inspirée de [69].

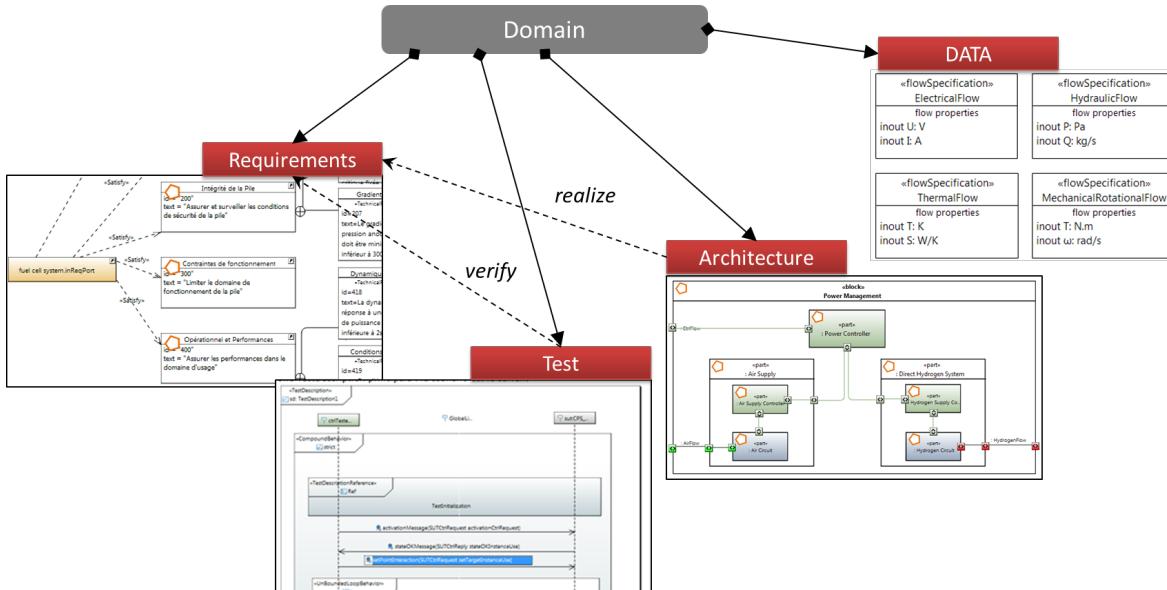


FIGURE 3.2 – Représentation modulaire et multi-facettes.

Par construction, le MBSE (Model Based System Engineering) permet de spécifier et concevoir les systèmes en définissant, à tous les niveaux, ses éléments (Figure 3.2) et les liens entre eux : *i*) les objets et données manipulés, *ii*) les exigences, *iii*) l'architecture (fonctionnelle, organique ou autre), *iv*) les scénarios et tests de vérification. L'objectif technique et méthodologique du MBSE est d'établir une passerelle de l'ingénierie des exigences à une ingénierie des modèles dont le pivot est l'architecture. Ceci est à rapprocher de la définition précise [70] : utiliser des éléments de modélisation juste nécessaires et suffisants pour la description d'un système.

Dans la méthodologie de modélisation proposée, la modélisation est spécialisée en ajoutant les points suivants : *i*) une structuration du système par niveau, *ii*) une description modulaire intégrant toutes les facettes (données, exigences, architecture, tests, etc.), *iii*) une forme canonique (*Decision, Control and Operation*) [69], *iv*) une sémantique précise liée aux niveaux du système permettant une description précise et une exécution pour évaluation et vérification.

La règle de modélisation sous-jacente est de se focaliser sur la décomposition directe de l'objet en éléments en faisant abstraction de la décomposition de ces éléments. Ainsi, lors de la modélisation du confort thermique, le pilotage, la dérivation (spécification des exigences entre les différents niveaux) et l'allocation des exigences ainsi que les tests ne doivent pas considérer directement les problématiques du compresseur ou du ventilateur, généralement utilisés pour réaliser la mission de confort. Cette règle de modélisation modulaire assure les trois « C »

des exigences (*Consistency, Completeness et Correctness*). Ces propriétés garantissent la capacité d'identifier les exigences s'il y a un changement ou des erreurs dans les spécifications afin d'atteindre une vérification et validation des exigences plus précise [113]. Par conséquent, l'architecture d'un objet limitée à un niveau sert de base de réflexion aux exigences et aussi de support pour assurer la complétude.

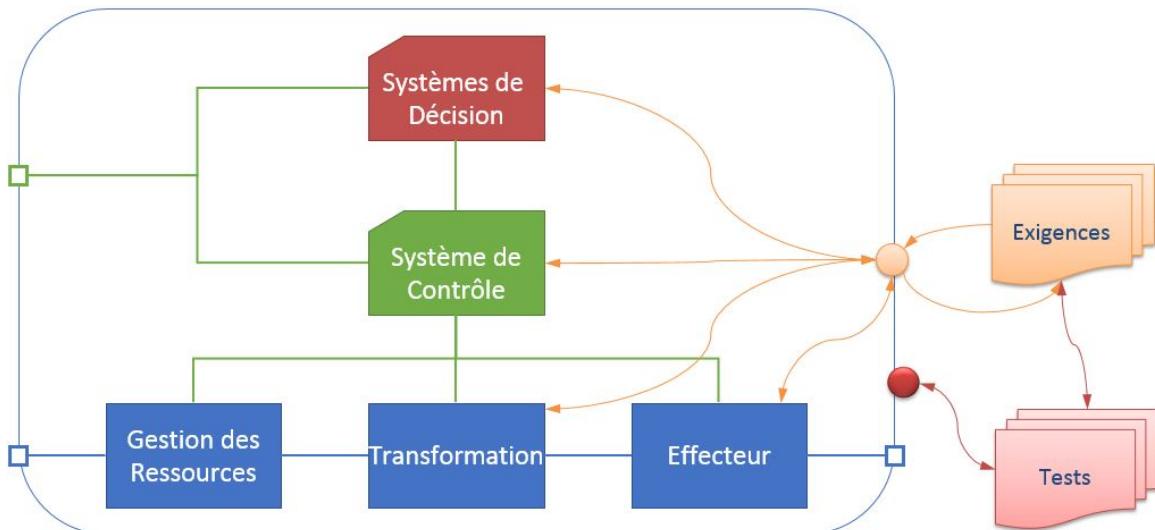


FIGURE 3.3 – Forme canonique d'un système complexe [104].

[69] a introduit une forme canonique Opération-Information-Décision, utile et réputée, suffisante pour la conception des systèmes complexes. La Figure 3.3 est une évolution de cette forme canonique avec la décomposition du système opérant en : i) gestion des ressources, ii) transformation et iii) effecteur. L'effecteur réalise la mission en utilisant les ressources utiles (énergie mécanique pour tondre le gazon par exemple). Les ressources utiles sont obtenues après transformation des ressources mises à disposition dans le système.

Dans ce chapitre, les niveaux de représentation d'un système sont présentés et le niveau fonctionnel est détaillé. Ensuite, un rappel de la modélisation multi-physiques sera fait. Puis, la méthodologie de modélisation fonctionnelle à base d'un concept modulaire est définie. Le concept modulaire a été introduit par [32] à partir de deux éléments fonctionnels, *source* et *consommateur*, qui échangent des informations de besoin et de disponibilité. Cela a conduit à un cadre entièrement fonctionnel qui a été initialement appliqué pour formuler un problème de gestion d'énergie [114]. Dans ces travaux, ce concept de ports *Source* et *Consommateur* est complété afin de développer un langage de simulation dédié aux systèmes énergétiques en utilisant les éléments de base de la modélisation fonctionnelle. Ces éléments, leur rôle, la manière dont l'énergie est répartie au niveau fonctionnel et l'intérêt d'utiliser la modélisation fonctionnelle sont présentés. Finalement, l'intégration de cette méthodologie à un outil de simulation est illustrée.

### 3.1 Niveaux de représentation d'un système

Le recours de plus en plus fréquent aux systèmes d'information et de communication rend les systèmes plus intelligents mais aussi plus complexes du fait des boucles de rétroaction. La nécessité d'appréhender le système complexe dans sa globalité et dans son environnement, nécessite de faire appel, dans un premier temps, à une représentation abstraite qui sera raffinée à mesure que les choix de conception et de réalisation sont faits [105].

Ce raffinement progressif de la modélisation favorise l'innovation dans la mesure où l'on n'aborde plus préocemment les solutions technologiques permettant ainsi l'exploration de nouvelles voies. Ceci devient particulièrement important pour les véhicules électriques et hybrides où la gestion énergétique doit être nécessairement globale et optimale, et pour les véhicules autonomes connectés où les couplages avec l'environnement sont essentiels.

Si l'on considère l'exemple d'un véhicule, le formalisme pour la description du système complexe (ici, le véhicule) peut être défini par trois types de représentation différents :

- i. un ensemble de services (mobilité) : un système de missions sont finalisées en relation avec l'environnement et régis par des réglementations et des normes,
- ii. un ensemble de fonctions clés (stockage électrique, transformation électromécanique) où le système de missions peut être défini par les principales fonctions du véhicule et l'architecture associée qui réalise les missions,
- iii. un ensemble de composants (batterie, moteur électrique, moteur thermique) où les fonctions clés sont réalisées par un ensemble de composants et d'équipements.

Chaque représentation définit le système global par des propriétés spécifiques. Entre ces définitions du même système à partir de point de vue différents, une complémentarité et une interrelation existent.

Le schéma de la [Figure 3.4](#) reprend les représentations fonctionnelle et multi-physiques, devenues familières aux praticiens de la modélisation, enrichies par la représentation des services ou missions permettant de définir au niveau le plus élevé ce que nous avons nommé les systèmes de missions. Ce niveau, dit téléologique, a pour objectif d'expliciter les finalités du système dans son environnement. La difficulté qui en découle vient de la juxtaposition de plusieurs représentations du même objet et de la nécessité de les relier pour assurer la traçabilité et la validation de la conception et de la réalisation. D'autant plus, qu'il est nécessaire de vérifier les choix d'architecture et des technologies et cela dès les phases amont du développement, c'est-à-dire, dès la représentation en fonctions voire en missions.

Les trois niveaux de représentations sont introduits ci-dessous :

- **Modélisation téléologique** : elle définit en particulier les systèmes de missions. Par exemple, les normes et les standards du système peuvent être définis au niveau de modélisation téléologique.
- **Modélisation fonctionnelle** : elle permet en particulier de définir l'ensemble de fonctions spécifiques d'un système de missions et l'architecture associée qui réalise les

missions. Par exemple, le transformateur qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique.

- **Modélisation multi-physiques** : elle conduit à l'obtention des modèles des composants et de l'équipement qui réalisent les fonctions clés du système. Par exemple, le modèle dynamique d'un moteur électrique.

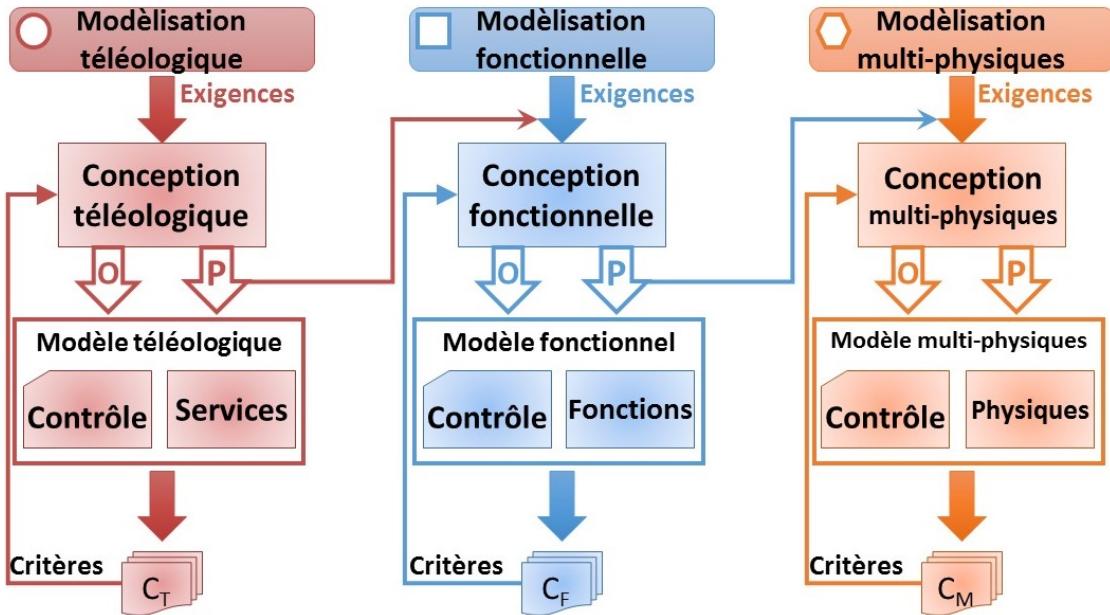


FIGURE 3.4 – Niveaux de représentations [106].

Dans la Figure 3.4, les étapes de modélisation pour chaque niveau de représentation du système sont illustrées. Le développement prend comme point de départ la formulation des exigences. Une fois que les exigences sont fixées, les paramètres ( $P$ ) et les objectifs ( $O$ ) sont définis afin d'obtenir un modèle de simulation et le système de commande associé nécessaire à la réalisation des objectifs. L'évaluation du système de commande est faite en simulation en utilisant des critères de validation. Si les critères sont satisfaits, les paramètres utilisés à un niveau supérieur de modélisation définissent les exigences d'un niveau inférieur de modélisation. Autrement, les modifications nécessaires sont faites dans le processus de conception du système. Ce mécanisme facilite la transmission des objectifs et paramètres entre les différentes représentations du système. Par ailleurs, on note que les niveaux plus élevés de modélisation peuvent devenir les systèmes de commande pour les niveaux plus bas de modélisation. Cela sera détaillé dans le Chapitre 4.

Les difficultés rencontrées selon les trois niveaux d'abstraction sont : comment définir le modèle et ses paramètres quand l'équipement n'existe pas à ce stade de l'étude et comment éviter de remettre en cause le système de supervision d'énergie à chaque modification de l'architecture. Ces difficultés augmentent le temps nécessaire à la modélisation et à l'analyse des résultats de simulation ou issus des essais. Ainsi, une nouvelle méthodologie de modélisation, n'utilisant que le niveau d'abstraction nécessaire, est proposée par intégration de modèles fonctionnels modulaires et d'algorithmes d'optimisation.

Dans les travaux de [115], il a été montré que les systèmes complexes contiennent des interactions avec eux-mêmes et leur environnement qui doivent être représentées à un niveau unique d'abstraction [69, 116]. En plus de la modélisation multi-physiques d'un système, l'approche fonctionnelle a déjà été abordée par de nombreux spécialistes [69, 71, 72]. Cette approche définit un niveau d'abstraction plus élevé que la modélisation multi-physiques et ne nécessite pas d'utiliser d'éléments multi-physiques. Le système est modélisé par ses fonctionnalités, qui interagissent entre elles afin d'assurer une mission du système. De ce fait, la modélisation fonctionnelle peut être utilisée dans la première phase de développement du système pour simuler son architecture. Néanmoins, le formalisme et les sémantiques à utiliser (équations ou types de flux) sont à définir, surtout pour les systèmes énergétiques.

Un premier pas vers la formulation d'un langage fonctionnel pour les systèmes énergétiques est fait avec le langage PhiGraph [17]. Néanmoins, les interactions contiennent les échanges d'effort et de flux, comme dans l'approche Bond Graph, et ils appartiennent au niveau multi-physiques du système. Par conséquent, PhiGraph ne peut pas être rapporté à un langage fonctionnel complet. Pour cette raison un nouveau concept de modélisation fonctionnelle et ses sémantiques associées sont proposés.

Le besoin d'un niveau de représentation fonctionnel et ses sémantiques sont des axes de travail importants dans le contexte de ces travaux de thèse. Cependant, les approches de modélisation existantes, par exemple la modélisation multi-physiques, sont parmi les méthodes les plus utilisées afin d'évaluer et de valider les choix technologiques, le dimensionnement des composants et les algorithmes d'optimisation. Plus complexe que le niveau fonctionnel, le niveau de représentation multi-physiques joue encore un rôle essentiel dans les étapes de conception, même avec la modélisation fonctionnelle. En ce sens, une modélisation du système plus raffinée et à un niveau d'estimation plus détaillé seront peut-être nécessaires pour certains systèmes énergétiques. De plus, dans le cadre des travaux effectués, la modélisation multi-physiques sera aussi utilisée pour une évaluation plus détaillée et une validation plus précise. Ainsi, un rappel de la modélisation multi-physiques est fait dans la suite.

## 3.2 Rappel sur les bases de la modélisation multi-physiques

La modélisation multi-physiques est généralement utilisée pour représenter une architecture d'équipement technique ou technologique. Pour représenter un système complexe dans sa globalité, une modélisation 0D-1D multi-domaines est nécessaire et suffisante pour simuler, analyser et prédire ses performances multidisciplinaires. Ce type de modélisation est couramment utilisé dans l'industrie et notamment dans le secteur automobile pour l'optimisation du dimensionnement et la conception des lois de commande [17].

Le modèle multi-physiques est composé des modèles analytiques qui fournissent une description précise du comportement physique du système complexe. Le modèle multi-physiques peut être développé dans l'environnement Matlab/Simulink afin de simuler le comportement du système, ou en utilisant des logiciels de langage de modélisation systé-

mique (*SysML*, *Papyrus*, etc.). Les modèles développés pour la simulation peuvent utiliser une approche fondée sur les composants telle que la méthodologie Bond Graph. Ce langage crée le lien entre les modèles physiques et mathématiques en utilisant un ensemble de diagrammes [17]. Autrement, l'outil de simulation est fondé sur l'approche « multiport » : un lien unique pour représenter et simuler toutes les interactions entre les composants. Dans la méthodologie multi-physiques, ce lien est représenté par l'échange d'énergie. De plus, tous les liens entre les composants de modèle physique contiennent une variable de flux et d'effort. Quelques exemples de flux et d'efforts sont illustrés en Figure 3.5.

Malgré les avantages de modélisation multi-physiques (précision et disponibilité des signaux intermédiaires), la conception, la simulation et la validation du modèle prennent du temps et exigent de l'expertise.

Domaine Physique	Effort	Flux
Rotation mécanique	Vitesse rot. (rad/s)	Couple (Nm)
Translation mécanique	Vitesse (m/s)	Force (N)
Hydraulique	Débit vol. ( $m^3/s$ )	Pression (Pa)
Thermique	Flux Th. (J/s)	Température (K)
Thermo-fluide	Débit mas. (kg/s) Enthalpie de flux (J/s)	Pression (Pa) Température (K)
Electrique	Courant (A)	Tension (V)
Contrôle	Etat Mesure Défaut Variable Interne	Activation Mode Référence

FIGURE 3.5 – Flux et effort multi-physiques.

Un exemple de modèle multi-physiques pour un groupe motoréducteur est donné dans la Figure 3.6. La transformation de flux électrique en flux mécanique est faite en utilisant un convertisseur, une machine électrique et un réducteur avec leur régulateur local. Pour cet exemple, le comportement physique simplifié de chaque composant est le suivant :

$$u_R = u_E \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (3.1)$$

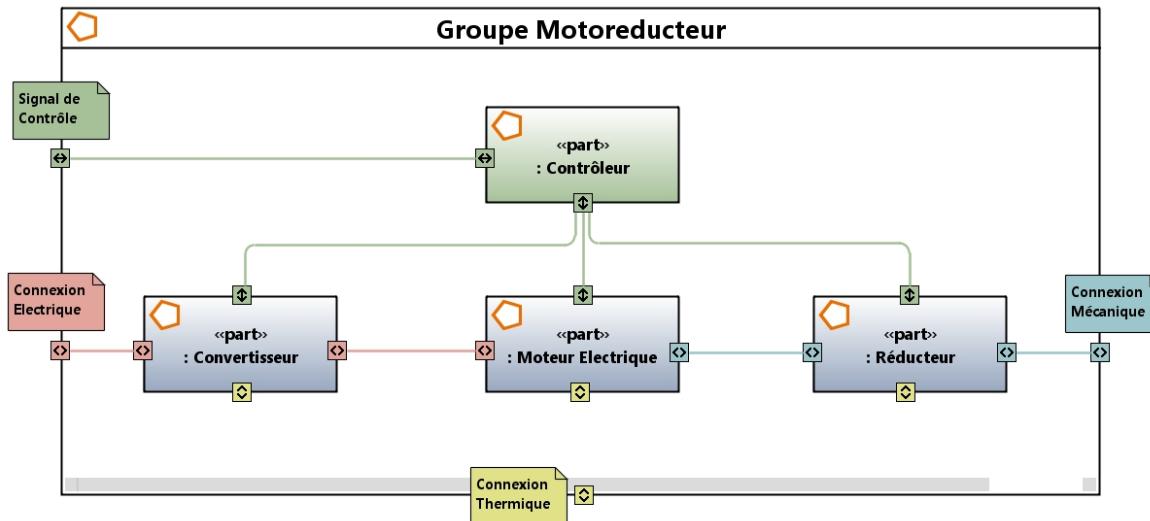
$$u_R = R_R i_R + L_R \frac{di_R}{dt} + E \quad (3.2)$$

$$J_{CR} \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \tau_{em} - \tau_p - \tau_{ext} \quad (3.3)$$

$$\tau_{ext} = \alpha \tau_{out} \quad (3.4)$$

où  $u_R$  est la tension d'induit de la machine électrique ;  $u_E$  est la tension d'alimentation de convertisseur ;  $t_{on}/t_{off}$  sont les temps d'allumage/extinction ;  $R_R$ ,  $i_R$ ,  $L_R$  sont respectivement

la résistance, le courant et l'inductance d'induit;  $E$  est la force électromotrice;  $J_{CR}$  est l'inertie;  $\theta_m$  est la position angulaire de la machine;  $\tau_{em}$  est le couple électromagnétique;  $\tau_p$  est le couple résistant;  $\tau_{ext}$  est le couple de sortie du moteur;  $\alpha$  est le facteur de réduction et  $\tau_{out}$  est le couple de sortie du groupe motoréducteur.

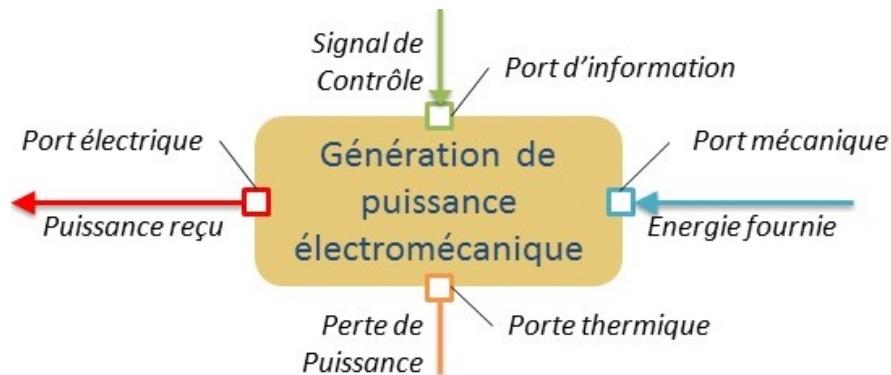


**FIGURE 3.6 –** Représentation multi-physiques d'un groupe motoréducteur.

La représentation fonctionnelle du groupe motoréducteur est donnée dans la Figure 3.7. Le composant est noté *génération de puissance électromécanique* selon sa fonction clé et le comportement fonctionnel de cet élément est modélisé par la relation suivante :

$$P_{mech} = \eta P_{el} \quad (3.5)$$

où  $P_{mech}$  est la puissance mécanique de sortie ;  $P_{el}$  est la puissance électrique d'entrée et  $\eta$  est le rendement de l'élément.



**FIGURE 3.7 –** Représentation fonctionnelle du composant génération de puissance électromécanique.

Le modèle fonctionnel permet la simulation rapide afin d'évaluer le système (dimensionnement, architecture, gestion des exigences) en préalable du choix technologique. Un autre avantage important de la modélisation fonctionnelle est de pouvoir obtenir un modèle

fonctionnel qui pourra se comporter comme un superviseur de gestion des ressources pour le modèle multi-physics. Ce sujet et aussi l'interconnexion entre le modèle fonctionnel et le modèle multi-physics seront détaillés dans le chapitre suivant. L'utilisation de la modélisation fonctionnelle et des distributeurs pour un véhicule hybride et l'implantation d'un algorithme d'optimisation dans les distributeurs seront détaillées dans le [Chapitre 5](#).

### 3.3 Méthodologie de modélisation fonctionnelle

Cette section introduit un formalisme précis de modélisation permettant de faire le lien avec les modèles de mission (niveau téléologique) et les modèles de simulation (niveau multi-physics) du système. L'objectif étant de vérifier la conception à chaque étape de conception du système (définition des exigences, modélisation systémique, modélisation de l'architecture, modélisation fonctionnelle, modélisation multi-physics etc.) et cela dès les premières étapes. Deux niveaux seront abordés : *i*) le niveau fonctionnel (ou comportemental) fondé sur les échanges d'énergie, de matière et d'information et *ii*) le niveau dit organique qui repose sur la représentation multi-physics plus habituelle.

La modélisation dite *fonctionnelle*, qu'est présentée dans ce chapitre, est destinée à décrire les *ensembles fonctionnels*, introduits ci-dessus, comme un niveau du système intermédiaire entre les missions et les équipements. Ces ensembles, aussi appelés *organico – fonctionnels*, peuvent avoir une réalisation organique directe. Par exemple, un générateur de puissance peut être réalisé par un ensemble motoréducteur piloté par un onduleur. Les objectifs de cette méthode de modélisation sont multiples :

- Permettre la connexion des différents éléments de l'architecture par la définition et la standardisation des ports,
- Permettre la représentation du système dans sa globalité (physique et contrôle) avec un niveau d'abstraction élevé, compatible avec le manque de connaissances technologiques dans les phases amont du cycle de développement; le paramétrage doit donc être simplifié,
- Permettre une évaluation rapide en simulation des différentes architectures candidates et cela avant les choix technologiques,
- Assurer le lien avec le point de vue multi-physics et notamment avec le superviseur du système.

Le concept de base de la modélisation fonctionnelle proposée est de fournir un lien fonctionnel entre deux systèmes, qui peut être décrit comme un échange en termes d'énergie (mécanique, électrique, hydraulique, thermique, etc.), matière (fluide, solide, etc.) et information (point de consigne, mesure, etc.). Dans les premières étapes de la conception du système, cet échange et sa nature doivent être définis pour les deux sous-systèmes ou pour un système avec son environnement. Afin d'exprimer les échanges d'énergie ou de matière, deux types de port sont introduits ([Figure 3.8](#)) :

- Le port *Consommateur* qui émet un besoin d'énergie (matière) et reçoit en réponse un flux d'énergie (matière),
- Le port *Source* qui émet un flux d'énergie (matière) en réponse à un besoin reçu en flux d'énergie (matière).

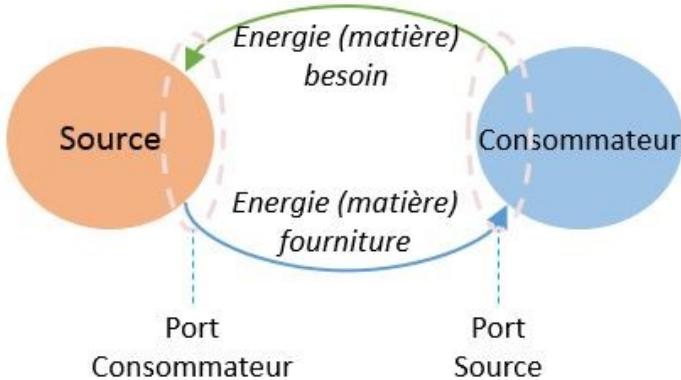


FIGURE 3.8 – Flux et ports fonctionnels.

Ainsi un lien *fonctionnel* relie un port *Source* à un port *Consommateur* et contient la dualité entre *Besoin* et *Fourniture* en énergie (ou matière). A noter, qu'à ce niveau d'abstraction, il n'est pas nécessaire de préciser le domaine physique.

Au niveau multi-physiques de la modélisation comme les approches Bond Graph ou PhiGraph, les entrées et les sorties des composants dépendent du flux ou de l'effort du domaine physique. Contrairement au niveau multi-physiques, le niveau fonctionnel utilise trois types de flux : énergie, matière et information, chacun d'eux étant décomposé de manière triadique. Dans le Tableau 3.1, les natures de transformation du niveau fonctionnel sont présentées.

TABLEAU 3.1 – Nature des objets et des liens du niveau fonctionnel.

T	Temps	Stockage (Stockeur) Accumulation (Accumulateur)
E	Espace	Transport, Transmission Distribution (Distributeur) Injecteur, Extracteur
F	Forme	Transformation Conversion Producteur Consommateur Filtreur, Catalyseur

La finalité principale de la modélisation fonctionnelle proposée est de pouvoir évaluer des architectures potentielles du système le plus en avance possible dans le cycle de conception

pour :

- Sélectionner les solutions d'architectures fonctionnelles,
- Préciser la spécification fonctionnelle haut-niveau des ensembles organiques,
- Proposer des stratégies haut-niveau de répartition d'énergie.

### 3.3.1 Concept modulaire

L'échange entre fonctions est contrôlé par le besoin. Par exemple, pour déplacer un véhicule à une vitesse donnée, la fonctionnalité de mouvement du véhicule nécessite une puissance (flux d'énergie). Si le besoin n'est pas exprimé, il n'y a pas de raison de recevoir une puissance pour satisfaire la mission donnée. Dans la méthodologie proposée, ce lien entre besoin exprimé et fourniture d'énergie est indispensable et le besoin a la causalité dominante. Sur cette base, la modélisation fonctionnelle est construite autour de la question « *Qui émet un besoin, et à qui ?* ».

Comme précisé dans la section précédente, tout lien fonctionnel entre deux systèmes ou deux éléments peut être exprimé en termes d'échanges d'énergie, de matière et d'information. Le type d'échange est associé à la nature de l'énergie (mécanique, électrique, etc.) mais ne nécessite pas d'être explicité. Ce type d'échange conduit à l'introduction de deux classes de ports : le port Source (qui fournit un flux d'énergie/matière en réponse à un besoin transmis) et le port Consommateur (qui reçoit le flux d'énergie/matière en réponse à un besoin émis). La direction de la flèche (Figure 3.8) fait remarquer où le besoin est transmis, indépendamment de la valeur (positive ou négative) ou de la direction de la fourniture.

Dans la Figure 3.9, une représentation d'un modèle fonctionnel pour un système avec une source et trois consommateurs et leurs ports *Source* et *Consommateur* associés est illustrée. Chaque élément «  $\Sigma$  » représente un élément fonctionnel ou les éléments «  $D$  » sont utilisées pour la distribution d'énergie ou matière.

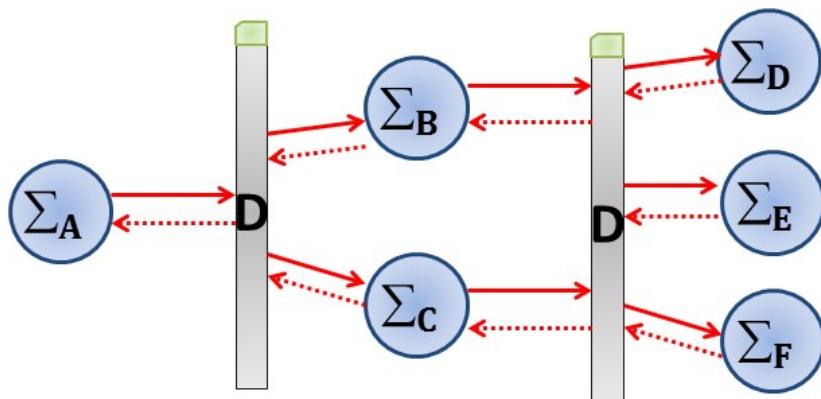


FIGURE 3.9 – Représentation de modélisation fonctionnelle.

Dans le cadre du concept proposé, les éléments utilisent des équations simples des natures choisies. Par exemple :

$$E(t) = \int P(\tau)d\tau \quad (3.6)$$

$$Y(p) = H(p)U(p) \quad (3.7)$$

$$\rho = \rho(\mu, \dots) \quad (3.8)$$

$$\sum P_t = 0 \quad (3.9)$$

Ici, les équations représentent les comportements des éléments fonctionnels : l'équation d'énergie (3.6) et la dynamique (3.7) du système ont la nature de transformation de temps, le rendement (3.8) a la nature de transformation de forme et l'équilibre de puissance (3.9) a la nature de transformation d'espace. Les équations sont utilisées pour définir les propriétés internes des différents éléments : l'intégrale de la puissance est utilisée pour les éléments de stockage ; les fonctions de transfert sont utilisées pour les éléments effecteurs ; le rendement est utilisé pour les éléments de transformation et l'équilibre de puissance est utilisé pour les éléments de distribution.

Au niveau fonctionnel d'abstraction, le comportement du système est représenté d'un point de vue énergétique en utilisant des équations simples qui permettent de réduire le temps de simulation. Les sémantiques des éléments de la modélisation fonctionnelle seront données dans la section suivante.

### 3.3.2 Sémantiques des éléments de la modélisation fonctionnelle

Les sémantiques proposées dans le contexte de la thèse sont semblables à celles de « *Energy Systems Language (Energese)* » [117-119]. La description des éléments de base pour la modélisation fonctionnelle est donnée dans cette section. Les éléments constitutifs du modèle sont : source, stockage, transformateur, distributeur et effecteur. La classification de ces éléments est donnée dans la Figure 3.10.

La Figure 3.10 présente les blocs élémentaires nécessaires pour la modélisation fonctionnelle de tout système énergétique. Ce choix est inspiré de *La théorie du système général* [69] où toute transformation est décrite par une transformation dans le temps, dans l'espace ou dans les formes.

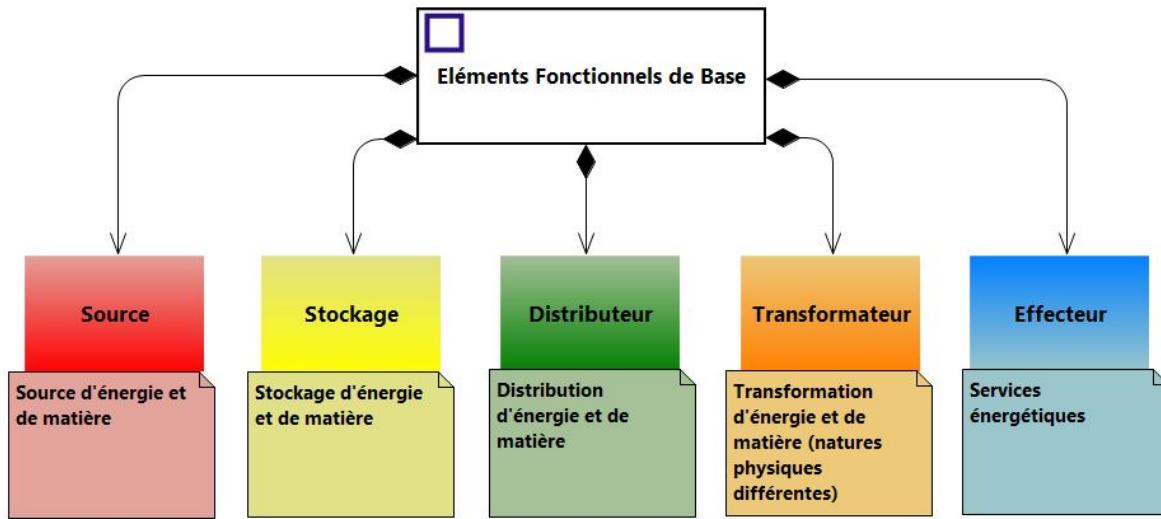


FIGURE 3.10 – Eléments de base de la modélisation fonctionnelle.

Tous les éléments fonctionnels sont structurés selon deux blocs : le sous-système de pilotage (ce sous-système gère le pilotage de la fonction, des mesures, des contraintes, etc.) et le sous-système opérant (qui décrit le comportement physique de la fonction). Tous les éléments ont des ports d'information pour recevoir la commande nécessaire et pour transmettre l'information. Ces ports peuvent être complétés par un port de perte de puissance qui dépend de l'élément considéré.

Un élément générique (Figure 3.11a) est une boîte noire qui a ses systèmes de fonctionnement et contrôle. Le système de contrôle gère les demandes, actions et contraintes. D'autre part, le système opérant représente le comportement physique de la fonction.

### 3.3.2.1 Élément Source

La source (Figure 3.11b) représente le fournisseur d'énergie ou/et de matière pour satisfaire le besoin des consommateurs. En tenant compte des limites physiques de la source, le système de pilotage fait le calcul de la puissance fournie ( $P_{cons}$ ) en réponse à un besoin reçu ( $N_{cons}$ ). Dans les fonctionnalités de cet élément, un port des pertes ( $P_{loss}$ ) est aussi ajouté en cas de besoin.

Le comportement du système opérant n'est pas générique en raison de la diversité des sources. Par exemple :

- Pour un réseau électrique la puissance fournie ou consommée est infinie,
- Pour un système de freinage, représenté par source de puissance négative, la puissance maximale dépend des caractéristiques physiques de l'élément.

Exemples d'éléments Source : station de fuel, réseau électrique etc.

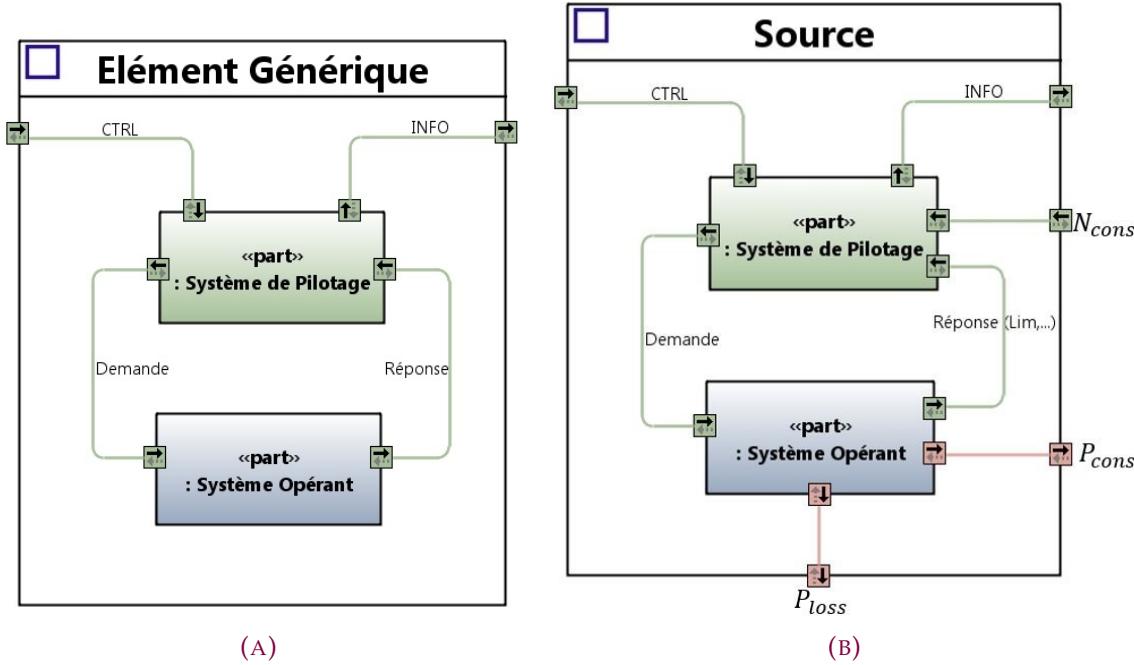


FIGURE 3.11 – Représentations des éléments (a) générique et (b) source.

### 3.3.2.2 Élément Stockage

Le stockage (Figure 3.12) représente le fournisseur ou le consommateur d'énergie ou/et de matière. Il participe à la disponibilité pour la réponse ( $P_{cons}$ ) à un besoin de consommation ( $N_{cons}$ ) et a son propre besoin ( $N_{charge}$ ) pour un certain niveau de charge ( $P_{charge}$ ) afin de conserver l'état de charge (SOC) à un niveau adéquat. Si besoin, la spécialisation est possible pour un meilleur réglage (par exemple, l'énergie maximale d'un réservoir de fuel est liée au volume du réservoir, mais pour un stockage électrique, c'est le niveau de tension et la capacité du stockage qui sont prises en compte).

Le niveau d'énergie ou de matière stockées est déterminé au moyen d'un bilan des puissances d'entrée et de sortie et en considérant également les limites de capacité de stockage. Le dépassement des limites de capacité est traduit sous la forme de puissance perdue ( $P_{loss}$ ). Par exemple : batterie, réservoir de fuel.

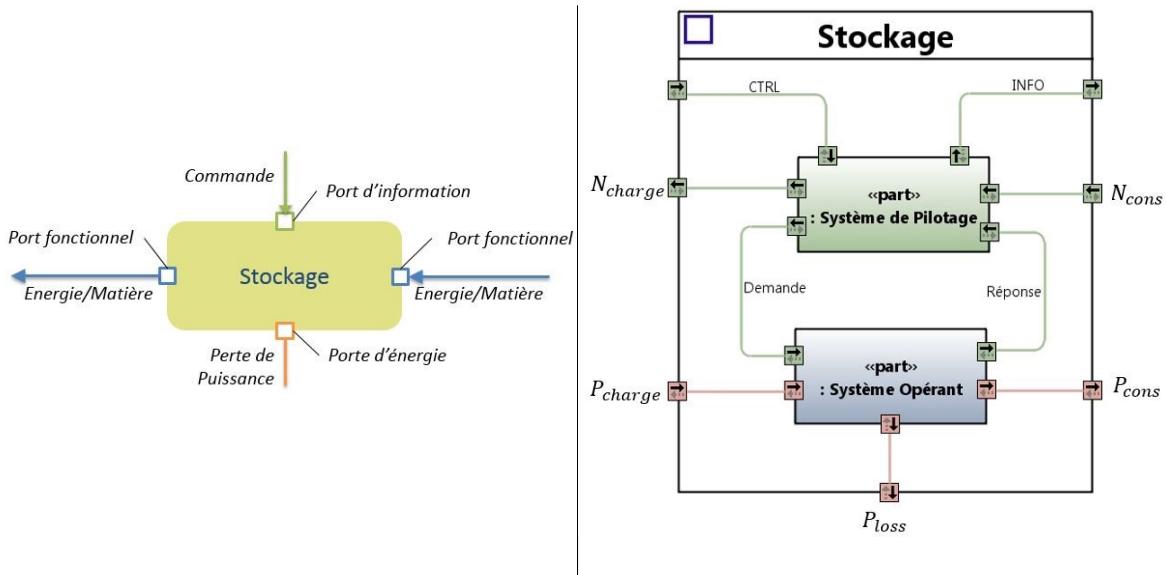


FIGURE 3.12 – Représentation de l’élément stockage.

Les équations génériques de l’élément stockage sont :

$$\text{énergie : } E = \int P dt \quad (3.10)$$

$$\text{matière : } m = \int F dt \quad (3.11)$$

$$\text{dynamique : } \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (3.12)$$

### 3.3.2.3 Élément Transformateur

Le transformateur (Figure 3.13) assure la transmission du besoin créé par l’effecteur et de puissance fournie par la source ou le stockage. Le changement de domaine (c’est-à-dire de la nature physique) est fait au moyen de cet élément. Par exemple, le groupe transformation électromécanique (onduleur, machine électrique et réducteur avec leurs commandes) peut être modélisé à ce stade par un seul élément transformateur ayant comme entrée la puissance électrique et comme sortie la puissance mécanique.

Le rendement est pris en considération si nécessaire lors de la transformation. Le système de pilotage convertit le besoin reçu ( $N_2$ ) en un besoin transmis ( $N_1$ ) compte tenu du rendement. La puissance transmise ( $P_2$ ) est déduite de la puissance reçue ( $P_1$ ) compte tenu des limitations associées à cet élément. Les pertes de puissance sont définies par la différence entre  $P_1$  et  $P_2$  ( $P_2 = \mu P_1$  où  $\mu$  est le rendement). Exemples : machine électrique, convertisseur.

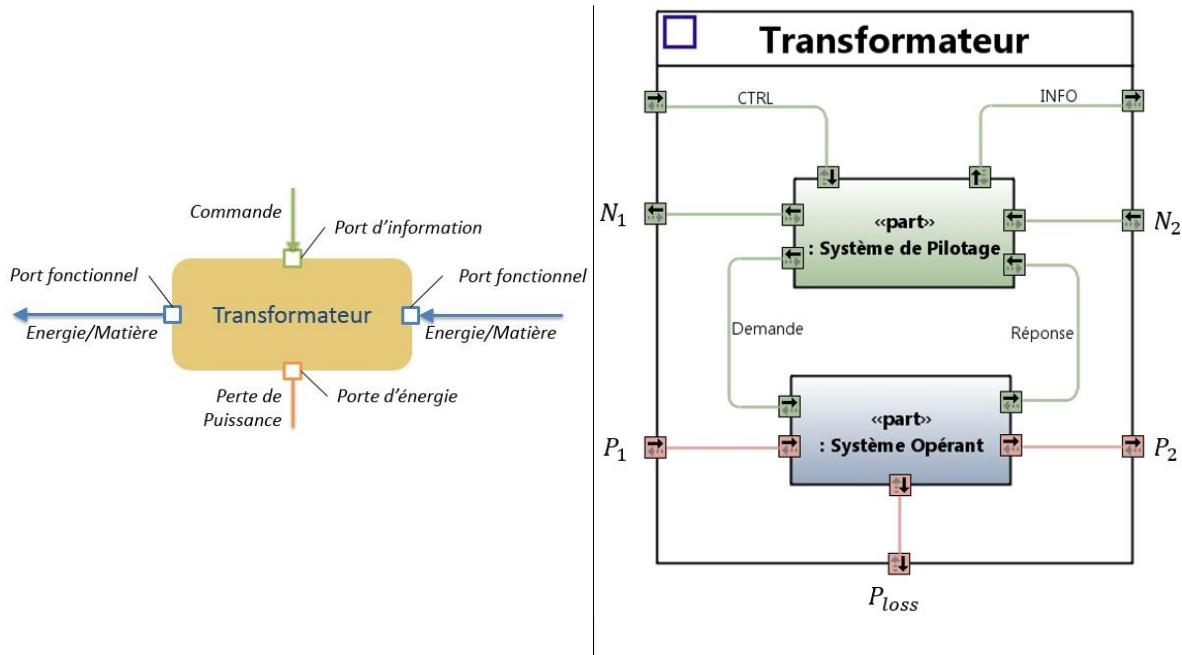


FIGURE 3.13 – Représentation de l’élément transformateur.

Les équations génériques de l’élément transformateur sont :

$$\text{ressource : } R_2 = \eta R_1 \quad (3.13)$$

$$\text{dynamique : } \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (3.14)$$

$$\text{rendement : } \rho = \rho(U, N, \dots) \quad (3.15)$$

### 3.3.2.4 Elément Distributeur

L’élément distributeur (Figure 3.14) est un connecteur de plusieurs sources et consommateurs. Son rôle est de faire le lien énergétique (ou de matière) entre un ensemble de consommateurs et un ensemble de sources. Il a donc une double fonction :

- Répartir les besoins en énergie exprimés par les consommateurs ( $N_k$ ,  $N_l$  et  $N_m$ ) sur les différentes sources ( $N_i$ ,  $N_j$ ) et cela en fonction des disponibilités de ces dernières et de la priorisation choisie,
- Répartir l’énergie délivrée par l’ensemble des sources ( $P_i$ ,  $P_j$ ) aux consommateurs ( $P_k$ ,  $P_l$  et  $P_m$ ) et cela selon la priorisation choisie tout en informant ces derniers de l’énergie encore disponible.

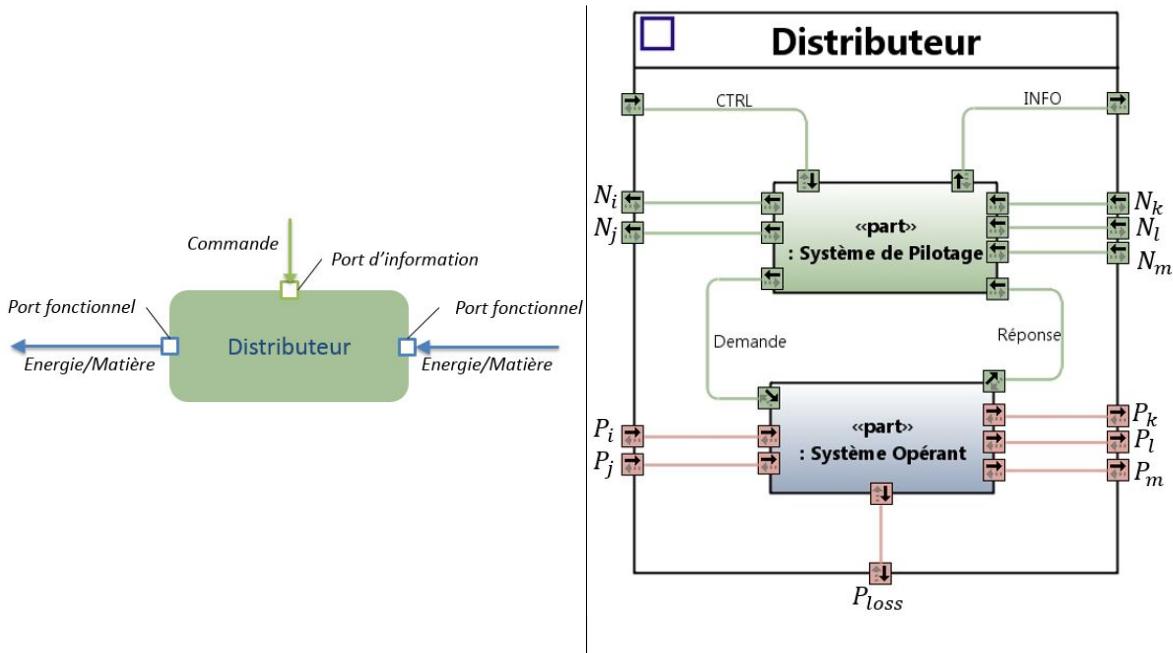


FIGURE 3.14 – Représentation de l’élément distributeur.

La distribution est faite compte tenu des contraintes de toutes les sources et tous les consommateurs. Le distributeur respecte l’équilibre de puissance. Le principe est que la perte ou le stockage n’existe pas dans cet élément dans les modes d’opération classiques. Un autre point est que le distributeur relie les ports du même domaine (nature physique).

Le système de pilotage des distributeurs est plus complexe pour la gestion des multi-sources/multi-consommateurs. Le concepteur doit choisir l’algorithme le plus approprié afin d’assurer une distribution de puissance optimale par rapport aux exigences et limitations physiques. Les contraintes du distributeur sont relatives à la disponibilité des sources, les priorités des consommateurs, etc.

### 3.3.2.5 Elément Effecteur

L’effecteur (Figure 3.15) est associé à la réussite d’un objectif. L’effecteur transmet un besoin de puissance ( $N_{cons}$ ) et il reçoit une puissance fournie ( $P_{cons}$ ) afin de réaliser la fonction. L’effecteur est un élément essentiel pour la modélisation fonctionnelle car il produit le besoin. Sans effecteur, il n’y a pas de besoin transmis, donc la représentation d’architecture fonctionnelle devient impossible à modéliser.

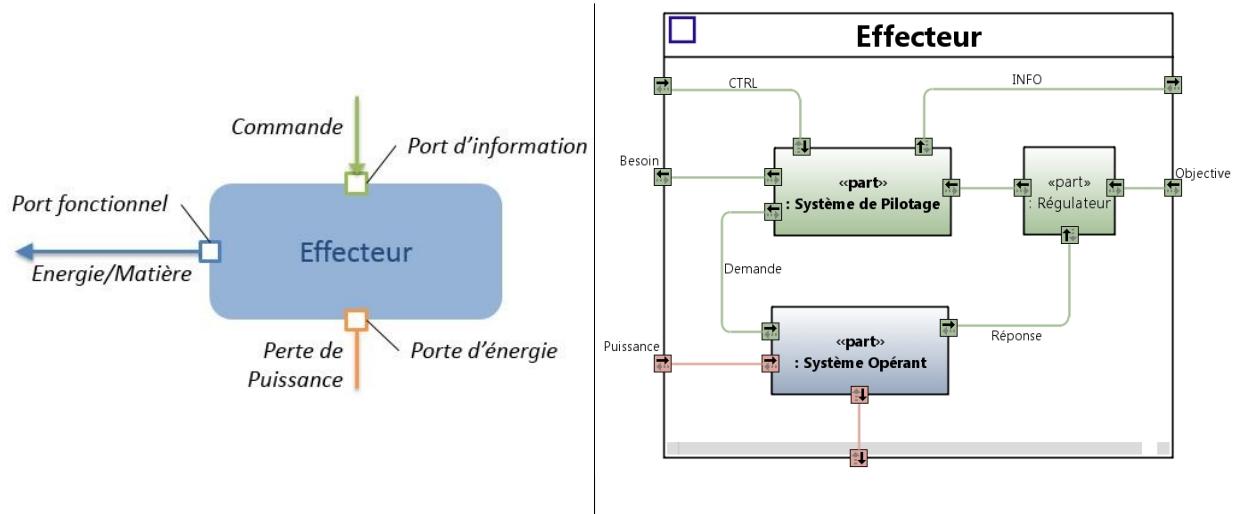


FIGURE 3.15 – Représentation de l’élément effecteur.

Le système de pilotage est destiné à calculer le besoin de puissance pour atteindre l’objectif défini par le système opérant. Les effecteurs des systèmes sont différents selon l’application (mobilité : cinématiques de véhicule, confort thermique : climatisation du véhicule, etc.).

La Figure 3.16 représente l’architecture de l’effecteur de mobilité d’un véhicule : un régulateur calcule le besoin d’énergie nécessaire pour suivre une consigne de vitesse et l’énergie reçue permet de déplacer le véhicule. Ce bloc possède un port consommateur à relier à une source d’énergie et un port d’information (consigne de vitesse) à relier à un superviseur. Le besoin d’énergie est calculé par les équations données dans le Section 2.3.1.

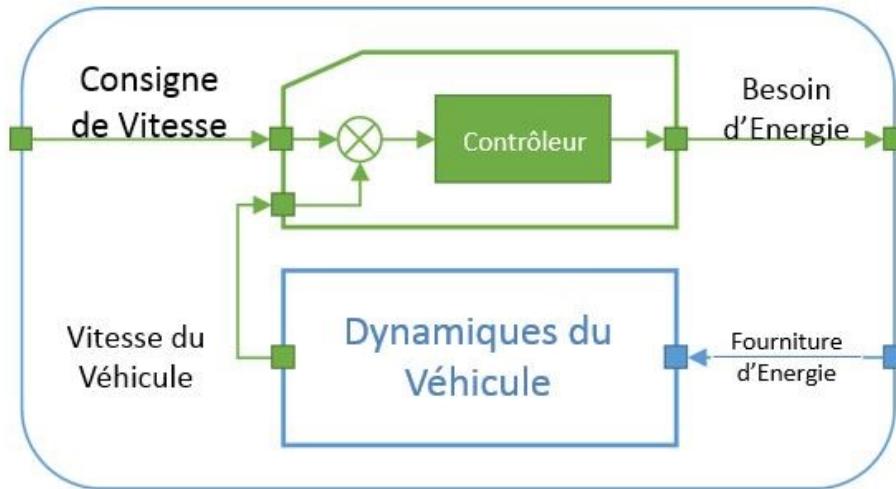


FIGURE 3.16 – Effecteur de mobilité d’un véhicule.

### 3.3.2.6 Ensemble Organico-Fonctionnel (EOF)

EOF est introduit par [32] avec la définition d’identifier une fonctionnalité pour laquelle une solution organique existe. Dans ces travaux de thèse, l’EOF est pris en compte comme un élément générique utilisé pour représenter les cinq éléments fonctionnels de base. Par

exemple, un véhicule peut être formé de deux EOF interconnectés : un pour représenter la source de carburant et le 2<sup>me</sup> pour représenter l'effecteur de mobilité.

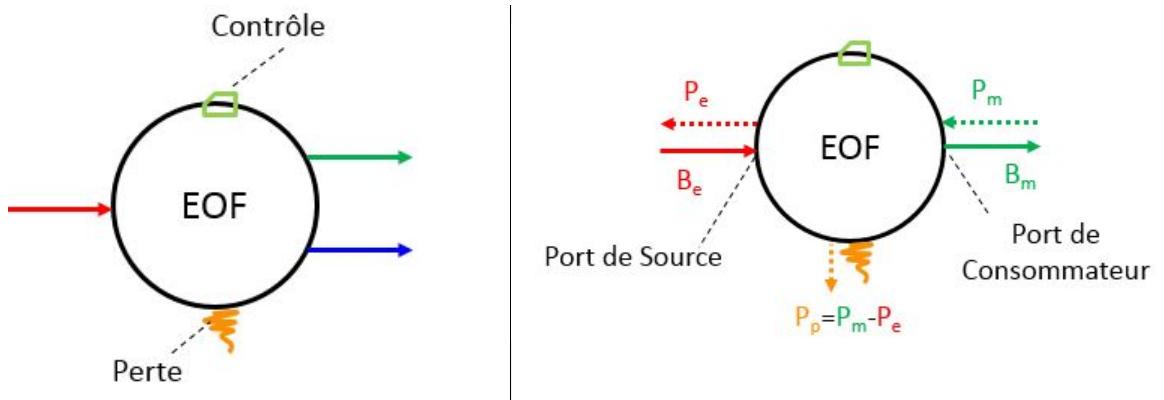


FIGURE 3.17 – Représentation d'un EOF.

Généralement, le flèche d'entrée est connecté à un port *Source* d'EOF et le flèche de sortie est connecté à un port *Consommateur* d'EOF. Si besoin, la couleur de la flèche peut être utilisée pour différencier le domaine physique. Par exemple : rouge pour électrique, vert pour mécanique et bleu pour hydraulique (Figure 3.17).

Le haut de l'élément (représenté dans ce schéma par la boîte verte) permet une connexion pour échanger de l'information entre l'EOF et le superviseur qui est le contrôleur global de système. Finalement, le symbole terre, mis en place en bas de la représentation, introduit si besoin les pertes.

En plus, un EOF peut représenter une composition des éléments de base. Un exemple est donné dans la Figure 3.18. Les ports verts (en haut des blocs) sont les ports de contrôle et information, les ports rouges (sur les côtés des blocs) sont les ports d'énergie et les ports jaunes (en bas des blocs) sont les ports de pertes.

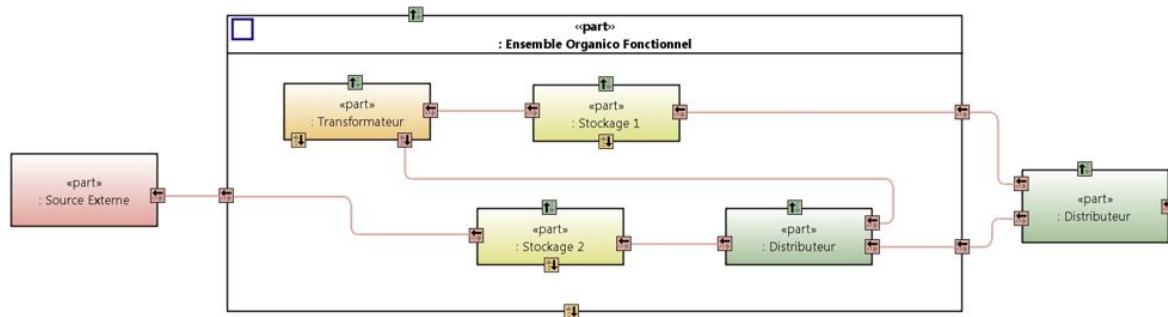


FIGURE 3.18 – EOF : une composition des éléments fonctionnels.

### 3.3.2.7 Rôle de Distributeurs

Les distributeurs sont les éléments fonctionnels responsables de la distribution des besoins de consommateurs aux sources et de la distribution de puissance fournie des sources aux

consommateurs. Cette distribution est très importante car dans un système mobile, les sources ne sont pas infinies. Pour une optimisation énergétique, la répartition optimale d'énergie de ces sources pour satisfaire la demande des consommateurs est essentielle.

Dans la méthodologie proposée, les distributeurs sont pris en compte comme des nœuds énergétiques qui n'ont pas des pertes énergétiques. Donc le bilan énergétique des distributeurs est toujours nul. En revanche, « *l'intelligence* » du système existe dans cet élément en intégrant un algorithme d'optimisation par exemple.

Cet algorithme peut être un algorithme générique qui fait la répartition par priorité des consommateurs ou sources selon leurs contraintes. Ces contraintes peuvent être identifiées par des « *disponibilités* » afin de partager l'information selon l'énergie disponible de chaque source et d'allouer une énergie limitée aux consommateurs. En outre, l'algorithme peut aussi être complexe en utilisant des méthodes d'optimisation spécifiques. La complexité de l'algorithme reste au choix de l'utilisateur.

Pour affiner la fonctionnalité du distributeur, un algorithme générique qui fait la répartition par priorités, en prenant en compte les disponibilités des sources, est détaillé ensuite.

Un exemple d'un système mono-source/multi-consommateurs est illustré dans la Figure 3.19 où deux consommateurs demandent des besoins  $B_1$  et  $B_2$  à une source et le Consommateur 2 a la priorité de consommation de ce système. Cette information est donnée par le superviseur qui peut être appelé Gestionnaire de Décisions.

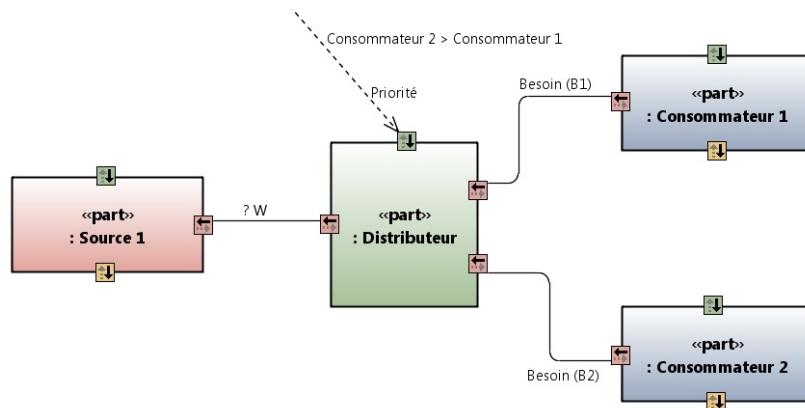


FIGURE 3.19 – Exemple de système mono-source/multi-consommateurs.

Si la disponibilité de la source est suffisante pour alimenter les deux consommateurs avec une puissance supérieure à  $B_1+B_2$ , le distributeur peut allouer la puissance fournie égale aux besoins des deux consommateurs (Figure 3.20).

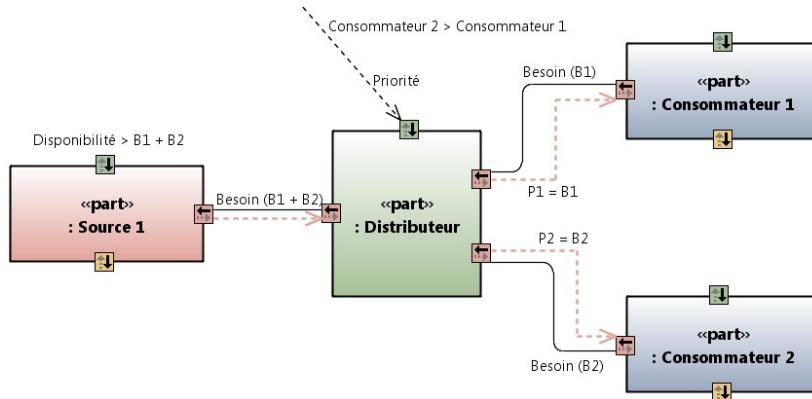


FIGURE 3.20 – Exemple de système mono-source/multi-consommateurs (Cas 1).

En revanche, pour les mêmes consommateurs et priorités, si la source ne dispose pas de la puissance demandée, le consommateur ayant la priorité (Consommateur 2) sera alimenté et le reste d'énergie disponible de la source sera transmis au Consommateur 1, même si celui-ci n'a pas été satisfait selon la totalité du besoin Figure 3.21.

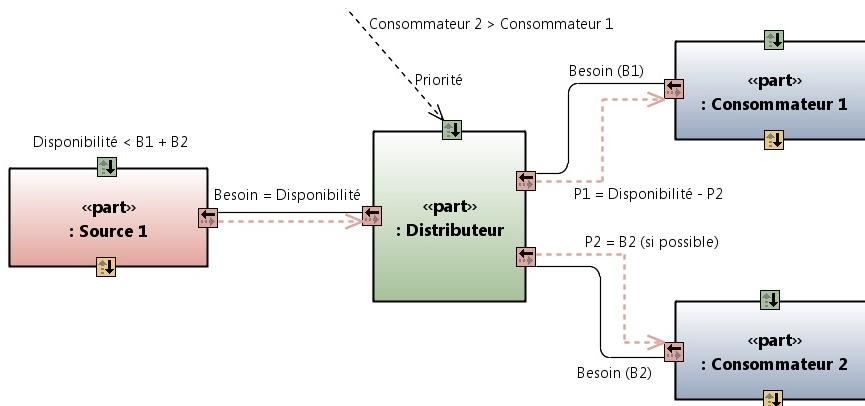


FIGURE 3.21 – Exemple de système mono-source/multi-consommateurs (Cas 2).

Un autre exemple de fonctionnalité du distributeur pour un système multi-sources/mono-consommateur est illustré dans la Figure 3.22.

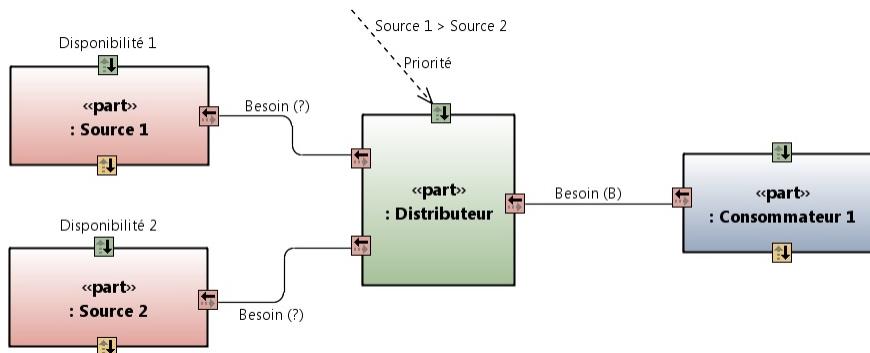


FIGURE 3.22 – Exemple de système multi-sources/mono-consommateur.

Dans ce système, un consommateur demande un besoin  $B$  à deux sources pour accomplir

sa mission. La Source 1 a la priorité de consommation de ce système. Si la disponibilité de la Source 1 est suffisante pour fournir le consommateur avec une puissance supérieure à  $B$ , le distributeur peut allouer le besoin juste à la Source 1 (Figure 3.23).

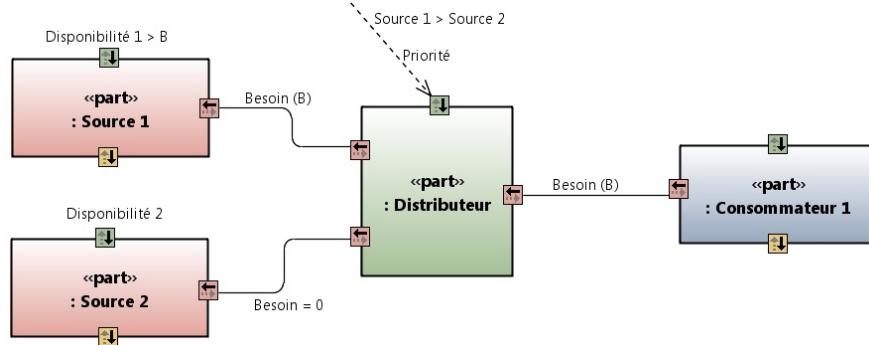


FIGURE 3.23 – Exemple de système multi-sources/mono-consommateur (Cas 1).

Si la disponibilité de la Source 1 est inférieure à  $B$ , le distributeur alloue le maximum de besoin possible à la Source 1 et le reste de besoin est envoyé à la Source 2 qui fournira la puissance complémentaire selon sa disponibilité (Figure 3.24).

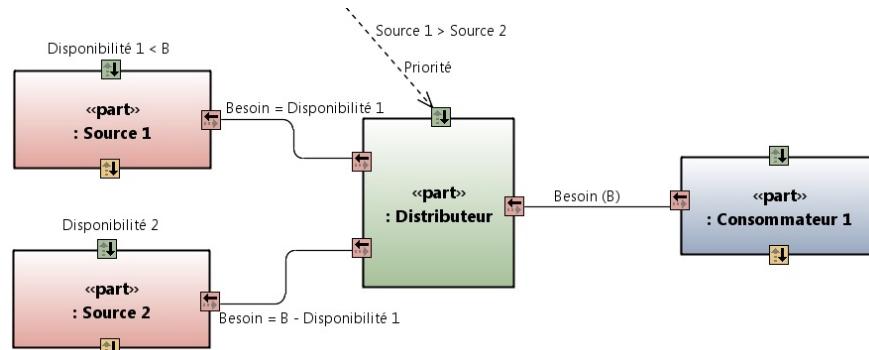


FIGURE 3.24 – Exemple de système multi-sources/mono-consommateur (Cas 2).

### 3.3.3 Intégration dans un outil de simulation

Dans cette section, l'intégration des éléments de modélisation fonctionnelle énergétique à l'aide de PhiSim est présentée. PhiSim est un environnement développé par Sherpa Engineering afin de paramétrier et simuler le comportement des éléments fonctionnels définis précédemment. Dans ce contexte PhiSim est intégré dans un environnement de modélisation et simulation pour les systèmes physiques en utilisant Matlab/Simulink, ce qui permet de générer les modèles et leur commande dans un environnement « multiport » [110].

Au préalable, deux définitions essentielles doivent être clarifiées : la disponibilité et l'acceptance. Ces définitions sont des informations des éléments et sont transmises au distributeur afin de pouvoir faire la répartition optimale entre les ressources. Ces informations aident le distributeur à transmettre (ou non) le niveau de puissance (positif ou négatif) requis aux consommateurs.

La disponibilité est créée par l'élément source (ou stockage) et est transmise à l'élément distributeur. Si d'autres éléments sont présents entre l'élément source et l'élément distributeur, l'information donnée peut évoluer selon les propriétés de ces éléments intermédiaires. La définition simple de la disponibilité d'un élément est la capacité à fournir de l'énergie aux sources ou aux éléments de stockage. Par exemple, la disponibilité peut être calculée par l'élément de stockage à partir des paramètres caractéristiques de l'élément ou encore par son système de pilotage à partir de l'état de charge. La disponibilité peut aussi avoir une valeur négative (un exemple pour cette propriété peut être le freinage régénératif). Si l'élément source (ou stockage) n'a pas une disponibilité négative, la récupération de puissance ne sera pas possible et la puissance négative nécessaire doit être fournie par un autre élément, par exemple un freinage mécanique.

L'autre définition est l'acceptance. La définition simple de l'acceptance, qui est une propriété des éléments fonctionnels, est la puissance maximale d'entrée et de sortie. Cette puissance peut être positive ou négative. Pour un élément de transformation, les acceptances du port *Consommateur* au port *Source* ( $Acc_1$ ) et du port *Source* au port *Consommateur* ( $Acc_2$ ) peuvent être différentes. Par exemple, pour un groupe de traction électrique d'un véhicule électrifié, la variable  $Acc_1$  est la puissance maximale de sortie qui représente la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement moteur). En revanche, la variable  $Acc_2$  du même élément peut être différente que  $Acc_1$  car elle représente la capacité de réaliser la transformation de l'énergie mécanique en l'énergie électrique (fonctionnement générateur). Alors l'écart entre  $Acc_1$  et  $Acc_2$  dépend de la capacité de réalisation de la transformation des éléments considérés et du rendement des transformations énergétiques.

Pour l'intégration, deux types de ports standardisés sont considérés : le port *Consommateur* et le port *Source*. Le port *Source* reçoit le besoin de puissance du consommateur, l'acceptance et la puissance/matière fournie par le consommateur connecté (par exemple le freinage régénératif). En même temps, le port *Source* transmet la puissance fournie, la disponibilité, l'acceptance et puissance/matière au consommateur connecté.

La connexion des éléments de base s'appuie sur les principes suivants :

- La communication entre éléments et superviseur est réalisée par un lien de contrôle/ information bidirectionnel (*CTRL / INFO*),
- L'interconnexion des éléments est assurée par un lien de besoin/fourniture bidirectionnel ( $N^*$ ,  $P^*$ ),
- Le port des pertes d'un élément est défini comme un port de sortie qui n'exige pas une entrée,
- La direction des flèches indique la transmission du besoin indépendamment de son signe.

Les informations sur la disponibilité et l'acceptance sont utiles pour le contrôle local ou global. Par exemple, afin de distribuer le besoin d'un consommateur vers plusieurs sources, le distributeur devrait vérifier les disponibilités des celles-ci. En plus, un consommateur peut

recevoir une puissance négative fournie par une source qui a l'acceptance voulue (une source qui peut récupérer de l'énergie).

Il est utile de souligner l'importance de l'élément distributeur pour l'intelligence du système et la stratégie de gestion d'énergie. L'algorithme générique traite le besoin de puissance de chaque consommateur par priorités. Le besoin total de puissance est propagé vers des sources différentes et priorisées par leurs disponibilités et acceptances. Si le besoin total de puissance ne peut pas être alloué complètement, le besoin de puissance qui est inférieure ou égale à la disponibilité totale des sources est alloué à la source qui a la priorité première.

La méthodologie fonctionnelle proposée peut s'appliquer aux systèmes de différents domaines, ce qui montre le caractère général du formalisme de modélisation et sa capacité de s'adapter facilement à des systèmes complexes divers. Les applications considérées dans ces travaux sont : un véhicule hybride électrique (VEH) et un système de traitement des eaux usées d'un bâtiment. La première application sera détaillée dans les chapitres suivants. La 2<sup>me</sup> application est abordée par la suite.

### 3.3.3.1 Système de traitement des eaux d'un bâtiment

L'objectif de ce système est de déterminer les consommations d'eau chaude et d'eau froide pour un scénario de test réel et également de fournir la consommation de puissance équivalente et l'estimation du coût. La différence entre les deux cas d'étude est le type de flux utilisé : flux d'énergie pour le VEH et flux de matière et énergie pour le système de traitement des eaux usées.

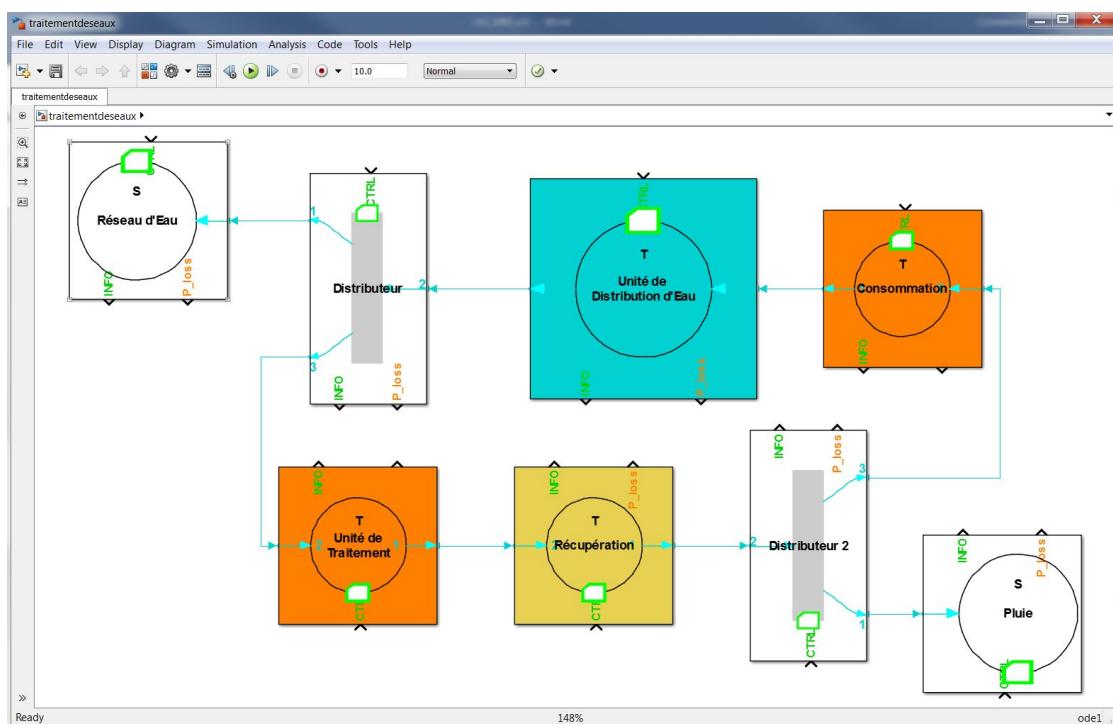
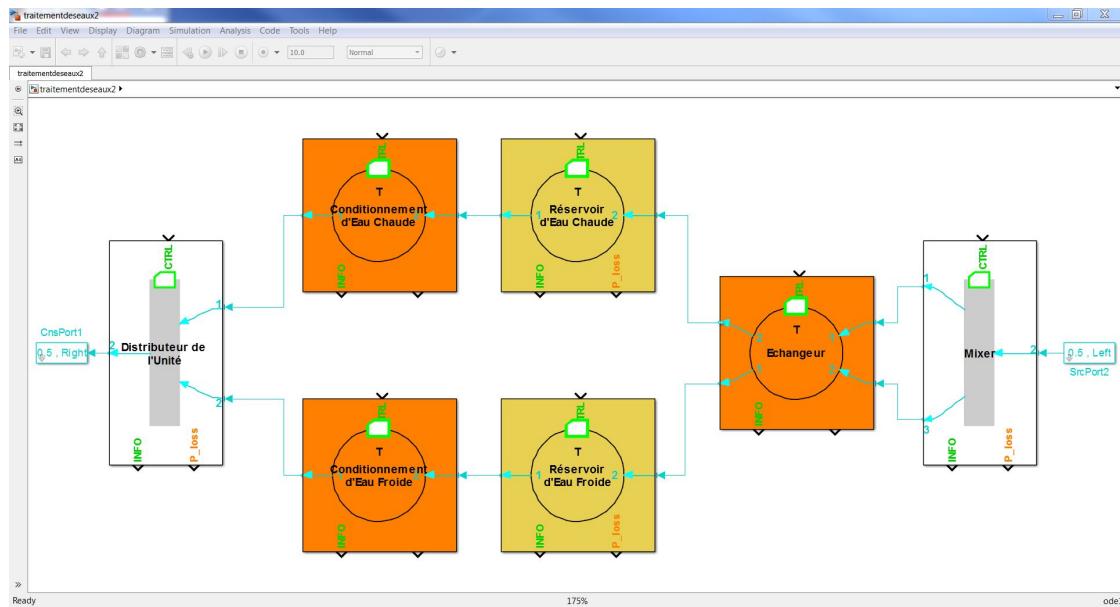


FIGURE 3.25 – Représentation fonctionnelle d'un système de traitement des eaux.

Dans ce cas, le modèle fonctionnel est obtenu à partir d'un modèle multi-physiques réduit avec un scénario réel pour une unité de traitement des eaux usées d'un hôtel. Le modèle est illustré dans la [Figure 3.25](#). Le modèle est composé par les éléments suivants :

- Deux éléments de transformation (Orange - Consommation et Unité de Traitement),
- Un élément de stockage (Jaune – Récupération),
- Deux éléments de distribution,
- Deux éléments source (Réseau d'Eau et Pluie),
- Un système de distribution des eaux du bâtiment qui est un groupe des éléments ([Figure 3.26](#)).



**FIGURE 3.26 – Représentation fonctionnelle de distribution des eaux du bâtiment.**

La distribution des eaux du bâtiment contient :

- Trois éléments de transformation (Orange – Conditionnement d'Eau Chaude et Froide et l'Echangeur),
- Deux éléments de stockage (Jaune – Réservoirs d'Eau Chaude et Froide),
- Deux éléments de distributeur (Mixer et le Distributeur d'Unité).

Dans cette application, les flux utilisés sont l'énergie et la matière. Dans les chapitres suivants, dans le cas d'étude d'un VEH, la nature du flux utilisé est l'énergie. Ces exemples montrent que la méthodologie proposée est applicable aux différents domaines et natures des systèmes. Néanmoins, le flux d'information est toujours utilisé afin d'avoir un superviseur qui fait la gestion des flux d'énergie (ou de matière) du système conçu. Par conséquent, le modèle fonctionnel d'un système peut constituer le superviseur du modèle multi-physiques. Cette particularité de la méthodologie proposée sera aussi détaillée dans le chapitre suivant.

## 3.4 Conclusions partielles

Ce chapitre contient deux sections qui portent sur les niveaux de représentation d'un système et la méthodologie de modélisation fonctionnelle énergétique, en détaillant son concept modulaire, les sémantiques des éléments de la modélisation fonctionnelle et l'intégration de la méthodologie dans un outil de simulation.

Dans la première partie, les niveaux de représentation d'un système (téléologique, fonctionnel et multi-physiques) sont introduits. Leurs définitions et utilisations sont expliquées et les approches existantes (la méthodologie Sagace [71], le conception axiomatique [72]) sont brièvement commentées.

La deuxième partie est abordée par un rappel élémentaire de la modélisation multi-physiques des systèmes. Les interactions de flux et information ainsi que les éléments nécessaires pour construire un modèle multi-physiques du système sont illustrées. Puis, la méthodologie de modélisation fonctionnelle avec son concept modulaire, le changement de la nature des flux, les ports fonctionnels et un langage dédié à la méthodologie sont proposés. Ce langage s'appuie sur cinq éléments de base : source, stockage, transformateur, distributeur et effecteur. Après avoir introduit ces éléments de base, l'EOF est présenté. L'EOF est utilisé pour une représentation unique pour tous les cinq éléments de base. Ensuite, le rôle de l'élément distributeur est détaillé en utilisant deux exemples simples.

Finalement, un exemple de traitement des eaux usées dans un bâtiment est illustré afin de comprendre la construction d'un système en utilisant les éléments de base de modélisation fonctionnelle.



## Chapitre 4

# Utilisation de la modélisation fonctionnelle énergétique pour l'optimisation énergétique

Comme il l'a été introduit dans le [Chapitre 1, Figure 1.6](#), la définition de « *l'optimisation* » permet de distinguer deux concepts : l'optimisation de la commande du système et l'optimisation du dimensionnement des composants du système. Ces concepts sont applicables pratiquement à tous les niveaux de représentation du système complexe. Au niveau fonctionnel, l'optimisation de la commande concerne la gestion optimale des ressources, pendant que l'optimisation du dimensionnement implique le dimensionnement optimal des limites physiques des groupes des composants (puissance max, puissance min, etc.). Dans le cadre de ces travaux on s'intéresse en particulier à l'optimisation de la commande au niveau fonctionnel.

Le rôle de la modélisation fonctionnelle dans l'architecture de commande d'un système complexe a déjà été introduit dans le chapitre précédent. Ce niveau de représentation permet au concepteur de procéder à l'évaluation et à la validation préliminaire des architectures du système, des propriétés et des limitations des groupes de composants, ainsi que de la gestion des ressources. Dans ce chapitre, le modèle fonctionnel sera adapté et utilisé, au moyen d'une interface pour la transformation des flux échangés, comme le superviseur du modèle multi-physiques (utilisation des techniques de simulation et de validation « *Model in the Loop* »). A cette fin, le système de commande du modèle fonctionnel sera extrait et il constituera, avec l'interface associée, le système de « *Gestion Globale des Ressources* » dans l'architecture de commande du modèle multi-physiques. Suite à cette extraction, le système de commande au niveau fonctionnel deviendra le système de supervision énergétique au niveau multi-physiques. L'intérêt de cette procédure est de pouvoir valider un système de gestion d'énergie et utiliser au niveau multi-physiques, qui pourraient éventuellement être

déployé sur un système réel.

Néanmoins, cette approche facilite la tâche d'obtention d'un superviseur énergétique en s'appuyant sur le modèle fonctionnel, de complexité réduite par rapport à la représentation multi-physiques. Ce modèle énergétique n'exige pas une puissance de calcul importante car il contient des relations relativement simples, comme montré dans le ([Chapitre 3](#)). La simplicité du modèle facilite la formulation des stratégies d'optimisation, l'intégration des algorithmes dans les éléments de distribution du modèle fonctionnel et la validation au moyen de simulations rapides. Par conséquent, le modèle fonctionnel permet de proposer des stratégies de gestion des ressources de faible complexité afin de déterminer des consignes de puissance transmises ensuite aux contrôleurs locaux du modèle multi-physiques. Pour un fonctionnement correct, la connexion entre les niveaux de représentation est assurée par une interface réalisant l'échange des flux entre deux niveaux (la conversion de l'énergie ou de la puissance au niveau fonctionnel en couple courant au niveau multi-physiques).

Cette architecture permet d'alléger significativement l'évaluation des performances de différents algorithmes utilisés pour la prise de décision dans le cadre d'un système complexe.

Dans le cadre des travaux de thèse, on s'intéresse à la gestion énergétique d'un véhicule électrique hybride (VEH), c'est-à-dire, à la répartition optimale d'énergie entre les différentes sources et consommateurs constitutifs du véhicule. Dans le premier chapitre, des nombreuses approches [40-52, 67, 110] ont été présentées pour réaliser le partage de puissance, souvent dans le but de maximiser le rendement global du véhicule et de minimiser la consommation de carburant. Généralement, un système de supervision est développé qui complète le niveau de commande du système. Même si des perspectives différentes existent pour l'optimisation énergétique des VEHs (par exemple, l'optimisation de la trajectoire du déplacement du véhicule [120] où l'optimisation du dimensionnement de la chaîne de traction en modélisant les missions du véhicule avec de chaines de Markov [121]), l'objectif de cette thèse consiste à assurer l'allocation optimale de ressources tout en satisfaisant les services du véhicule (la mobilité, les auxiliaires électriques et le confort thermique).

Les stratégies proposées pour la répartition d'énergie (et de ressources) sont les suivantes :

- i. Stratégie heuristique fondée sur des règles et des priorités,
- ii. Stratégie fondée sur la commande prédictive fonctionnelle avec répartition de puissance fournie et des besoins, avec deux modes de fonctionnement associés à l'allocation des besoins :
  - i fonctionnement « partage de besoin par priorisation »,
  - ii fonctionnement « boost ».

Ces stratégies sont présentées dans ce chapitre, et ensuite elles seront validées en simulation sur un VEH en [Chapitre 5](#). Parmi ces stratégies, la première reposant sur des méthodes heuristiques représente une approche classique de répartition d'énergie. La deuxième stratégie fondée sur des principes de la commande prédictive fonctionnelle, propose deux fonctionnements pour l'allocation des besoins, alors que le partage de puissance est réalisé de

la même façon dans les deux cas. Cette deuxième approche est utilisée dans le but d'améliorer l'intelligence des éléments de distribution. De ce fait, elle sera évaluée en comparaison avec la première méthode dans le [Chapitre 5](#). L'objectif est de proposer des algorithmes performants en terme d'allocation de ressources, ayant accès qu'aux informations disponibles dans les éléments de distribution, afin de faciliter leur intégration dans le modèle de simulation.

Un système complexe est souvent représenté comme un système multi-sources/multi-consommateurs, ce qui peut complexifier la gestion d'énergie. Dans la littérature, la plupart des solutions proposées [40-52, 67, 110] concernent la gestion énergétique des systèmes multi-sources/mono-consommateur. Au niveau fonctionnel, les éléments de distribution gèrent la répartition de ressources. Selon le nombre des sources et des consommateurs connectés à un élément de distribution, celui-ci peut constituer un système mono-source/multi-consommateurs, un système multi-sources/mono-consommateur ou un système multi-sources/multi-consommateurs. Grace à la modularité du modèle fonctionnel, un système multi-sources/multi-consommateurs peut être décomposé en deux autres sous-systèmes : multi-sources/mono-consommateur et mono-source/multi-consommateurs, respectivement. De ce fait, deux cas seront traités : la répartition de puissance fournie pour un système mono-source/multi-consommateurs et l'allocation des besoins pour un système multi-sources/mono-consommateur.

Dans ce chapitre, les architectures de commande utilisées aux différents niveaux de représentation d'un système sont présentées, en particulier celles définies au niveau fonctionnel et multi-physiques. De plus, le rôle de la modélisation fonctionnelle dans la définition de l'architecture de commande du modèle multi-physiques est présenté. Ensuite, le paramétrage du modèle fonctionnel est décrit, à partir de paramètres des composants du véhicule au niveau multi-physiques. Un exemple de modélisation d'un groupe de composants multi-physiques par des éléments fonctionnels est détaillé, ainsi que la réalisation du paramétrage au niveau fonctionnel. Puis, l'interconnexion entre les niveaux fonctionnel et multi-physiques est illustrée en prenant l'exemple d'un véhicule électrifié. Cette interconnexion est réalisée dans le but de pouvoir utiliser le modèle fonctionnel et le système de commande associée comme un système de gestion de ressources au niveau multi-physiques. La suite du chapitre est consacrée à la formulation du problème d'optimisation énergétique à partir des principes de la commande prédictive fonctionnelle (en anglais, Predictive Functional Control – PFC). La stratégie de gestion proposée est présentée pour les deux cas distingués : l'optimisation énergétique des systèmes multi-sources/mono-consommateur (pour répartition des besoins des consommateurs) et des systèmes mono-source/multi-consommateurs (en ce qui concerne la répartition des puissances fournies par les sources). Ces cas seront illustrés par des exemples simples. Cette méthodologie, dite du « traitement fonctionnel », abordée par [32, 73, 114], sera appliquée sur un VEH dans le [Chapitre 5](#).

## 4.1 Définition d'une architecture de commande au niveau multi-physiques fondée sur un modèle fonctionnel énergétique

Au niveau fonctionnel, le comportement du système est représenté d'un point de vue énergétique, en utilisant des équations simples, afin de réduire la complexité du système ce qui conduit également à la réduction du temps de simulation. Néanmoins, au niveau de représentation multi-physiques, le système peut être défini par un ensemble des sous-systèmes avec leur boucles de régulation locales [25]. Le schéma bloc de la représentation multi-physiques d'un système est illustré dans la Figure 4.1.

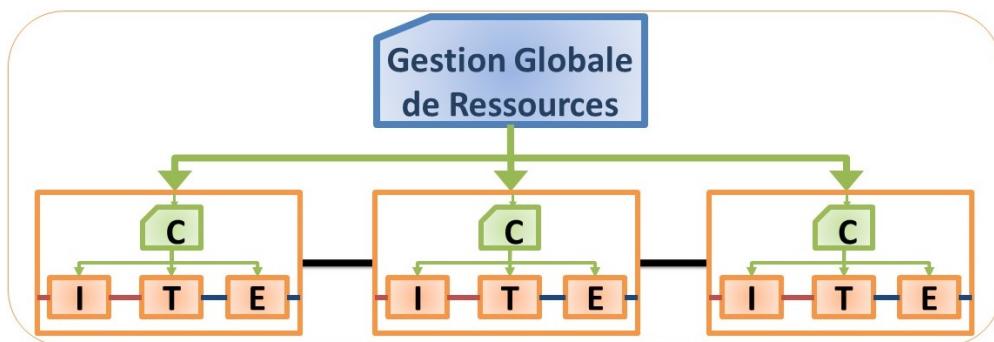


FIGURE 4.1 – Représentation d'un système complexe au niveau multi-physiques [106].

Les blocs C, I, T et E dénotent respectivement le correcteur local, le conditionnement des signaux d'entrée, le transformateur et l'effecteur de chaque sous-système du modèle multi-physiques. Le bloc « Gestion Globale de Ressources (GGR) » (en anglais, Global Resource Manager (GRM)) représente le superviseur du système à ce niveau d'abstraction et son rôle est de réaliser la gestion des flux d'énergie menant à l'accomplissement des missions spécifiées.

Pendant les premières étapes du processus de conception d'un système complexe, l'utilisation d'une représentation du système au niveau fonctionnel s'avère plus pratique. Cela permet, d'une part, de valider l'architecture du système et le dimensionnement de ses composants, et d'autre part, d'évaluer les performances des correcteurs locaux et les stratégies de gestion d'énergie selon divers missions et critères de performance.

Une fois que la validation est accomplie au niveau fonctionnel, les étapes suivantes de la conception portent naturellement sur la validation d'algorithmes de commande et de gestion d'énergie, développés à partir du modèle fonctionnel, sur le modèle multi-physiques du système. Les architectures de commandes utilisées aux niveaux d'abstraction fonctionnel et multi-physiques sont illustrées dans la Figure 4.2.

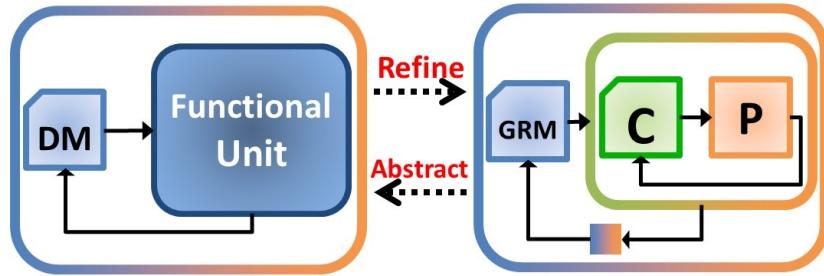


FIGURE 4.2 – Représentation de l'architecture de commande au niveau fonctionnel et au niveau multi-physiques [106].

Au niveau fonctionnel (Figure 4.2(a)), le flux d'énergie est géré par les informations obtenues du bloc de supervision GD (Gestion Décisionnelle) en utilisant des stratégies heuristiques ou d'optimisation. Au niveau multi-physiques (Figure 4.2(b)), P dénote l'ensemble des sous-systèmes de composantes physiques et C illustre l'ensemble des correcteurs locaux des sous-systèmes. Par conséquent, l'objectif consiste à obtenir le système de gestion globale de ressources (GGR) du modèle multi-physiques en utilisant les informations fournies par les boucles de régulation locales et le système de gestion décisionnelle (GD) du modèle fonctionnel.

A cet fin, la problématique à traiter peut se formuler par les questions suivantes :

- Quelle entrée/sortie duquel sous-système physique doit être mesurée/estimée ?
- Comment utiliser ces signaux afin de fournir des informations sur le transfert d'énergie au modèle fonctionnel ?
- Enfin, comment transformer la consigne de puissance calculée au niveau fonctionnel en un signal de consigne physique et assurer le passage vers les correcteurs des sous-systèmes physiques ?

Afin de faciliter la compréhension de ces enjeux dans le contexte d'un système énergétique, le paramétrage du modèle fonctionnel est dérivé du paramétrage d'un groupe des composants d'un véhicule électrique hybride. Ensuite, la solution proposée pour l'interconnexion des modèles fonctionnel et multi-physiques est expliquée et démontrée en considérant l'exemple d'un véhicule électrifié. Au moyen de cette interconnexion, le modèle fonctionnel avec les systèmes de commande et supervision associés devient le système de supervision (GGR) du modèle multi-physiques.

#### 4.1.1 Développement et paramétrage du modèle fonctionnel à partir des caractéristiques d'un groupe de composants multi-physiques

Comme précisé dans le Chapitre 3, une unité fonctionnelle (EOF) peut représenter un seul composant ou plusieurs composants du modèle multi-physiques. De ce fait, la conception du modèle fonctionnel à partir d'un modèle multi-physiques existant permet d'obtenir un modèle macroscopique, simplifié. Cette démarche est importante, car elle permet d'accélérer

le processus de conception et de validation d'un système. Le modèle fonctionnel ainsi obtenu est utilisé pour vérifier le dimensionnement des paramètres des unités fonctionnelles (éléments fonctionnels représentant des fonctions de groupes de composants avec leurs correcteurs locaux au niveau multi-physiques). De plus, des stratégies de gestion d'énergie (algorithmes heuristiques utilisant des priorités ou algorithmes d'optimisation) sont validées au niveau fonctionnel.

Néanmoins, le choix des paramètres d'éléments fonctionnels à partir des caractéristiques d'un groupe de composants multi-physiques est une étape essentielle, tenant compte du fait que le modèle fonctionnel piloté peut constituer en soit un système de gestion d'énergie dans le cadre de l'architecture de commande au niveau multi-physiques. Dans ce cas, les paramètres du modèle fonctionnel doivent être adaptés pour que la transmission d'information soit assurée d'un niveau d'abstraction à l'autre.

Si les stratégies de gestion d'énergie sont élaborées à partir d'un paramétrage erroné des éléments fonctionnels, la distribution et l'allocation des ressources n'est pas représentative et le modèle fonctionnel ne peut pas servir au développement de l'architecture de commande du modèle multi-physiques. Le paramétrage non conforme peut mener à des difficultés dans les deux niveaux de représentation, telles que le dépassement de limites de puissance, la mauvaise allocation des ressources ou la transmission des mesures erronées qui peuvent rendre les boucles de régulation locales instables. Par conséquent, les caractéristiques des composants multi-physiques devront être prises en compte dans le paramétrage des éléments du modèle fonctionnel.

Le premier pas dans le développement d'un modèle fonctionnel consiste à définir les fonctions-clés du système à modéliser. Celles-ci seront choisies en tenant compte du fait qu'un modèle fonctionnel contient au moins un élément source et un élément effecteur afin de pouvoir créer les flux et les informations nécessaires au système. Dans le cas d'un VEH, la source est représentée par la station-service. Néanmoins, si le véhicule est rechargeable, une deuxième source peut être ajoutée, telle que le réseau électrique. En revanche, les effecteurs d'un VEH sont la *mobilité* (besoin d'énergie calculé par la dynamique du véhicule) et l'*auxiliaire électrique* (besoin d'énergie calculé par les services du véhicule : GPS, autoradio ou climatisation). Un autre effecteur, le *confort thermique* (besoin d'énergie calculé par les équations d'équilibre thermique) peut éventuellement être ajouté dans cette liste si le concepteur souhaite analyser les effets et les échanges thermiques du système.

En ce qui concerne le stockage d'énergie du véhicule, les batteries, les convertisseurs associés et la commande locale de ce groupe forment le stockage électrique au niveau fonctionnel. Par ailleurs, le réservoir de carburant avec le système de pompage compose le stockage de carburant.

Pour un modèle de la chaîne de traction du véhicule, les éléments de transformation sont définis en groupant les composants de traction du véhicule puisque leur fonctionnalité est de transformer le domaine physique d'énergie. Dans les travaux menés, il y a trois éléments transformateur proposés pour un VEH : *i*) transformateur F-à-M (*fuel-à-mécanique* ;

conversion d'énergie thermique en énergie mécanique); *ii*) transformateur M-à-E (*mécanique-à-électrique*; conversion d'énergie mécanique en énergie électrique) et *iii*) transformateur E-à-M (*électrique-à-mécanique*; conversion d'énergie électrique en énergie mécanique). Ces éléments représentent respectivement les groupes de composants physiques suivants : *i*) le moteur thermique avec la boîte de vitesses; *ii*) l'onduleur, la machine électrique (ou alternateur) avec ou sans réducteur et *iii*) l'onduleur, la machine électrique et le réducteur.

Par la suite, les éléments fonctionnels d'une chaîne de traction d'un VEH sont définis et paramétrés. Plus précisément, la conception de l'élément transformateur F-à-M est détaillée à partir de la chaîne de traction thermique. Les composants principaux de ce groupe sont illustrés dans la [Figure 4.3](#).

#### 4.1.1.1 Conception de l'élément transformateur F-à-M

Tout d'abord, les limites maximales sont définies pour les puissances en entrée (E) et en sortie (S) de l'élément transformateur. Ces informations déterminent l'*acceptance* (la puissance maximale acceptée d'un autre élément fonctionnel à un instant donné) et la *disponibilité* (la puissance maximale fournie à un autre élément fonctionnel à un instant donné) des ports source et consommateur. De façon générale, l'élément transformateur permet un transfert d'énergie bidirectionnel. Néanmoins, dans cet exemple particulier, l'élément transformateur F-à-M représente un groupe des composants caractérisé par un transfert d'énergie unidirectionnel. Par conséquent, l'acceptance du port source de cet élément est fixée à 0 (ici, le fonctionnement du frein moteur est négligé). De plus, la puissance mécanique maximale de la chaîne de traction thermique définit la disponibilité du port source de l'élément transformateur F-à-M. En outre, le rendement de la chaîne de traction thermique et la puissance thermique maximale que l'élément peut en recevoir définissent l'acceptance du port consommateur de l'élément transformateur F-à-M. La disponibilité du port consommateur est nulle, car cet élément ne permet pas la transmission d'énergie via le port consommateur (transfert unidirectionnel).

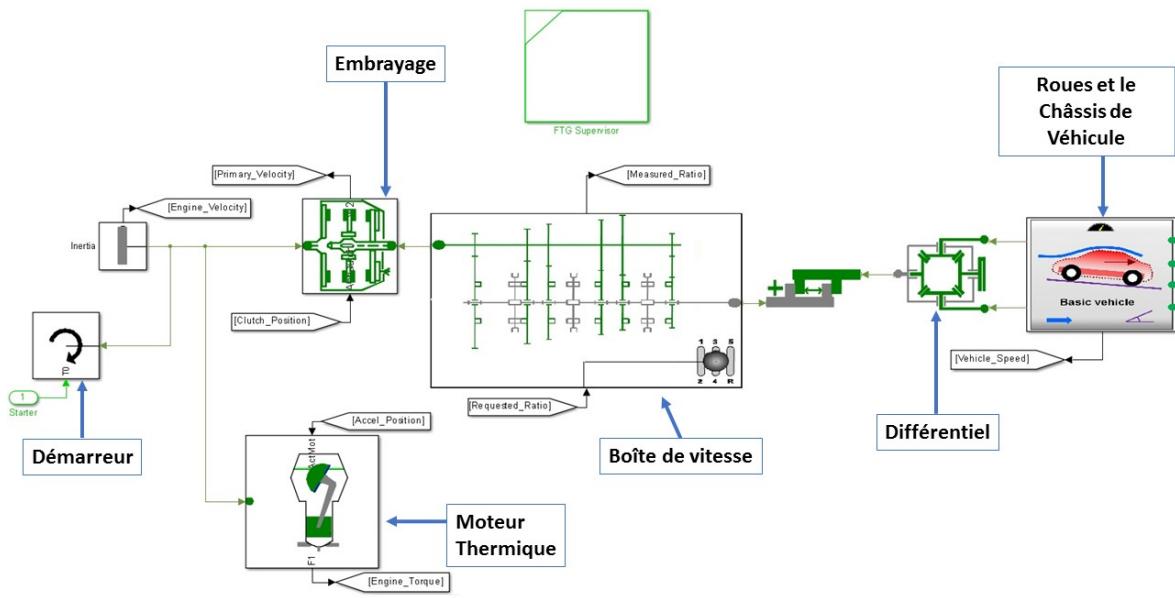


FIGURE 4.3 – Chaîne de traction thermique d'un véhicule électrique hybride.

Afin de dimensionner l'élément transformateur F-à-M, la chaîne de traction thermique représentée dans la Figure 4.3 est considérée comme un élément de type « boîte noire » avec des paramètres et ports E/S (ou consommateur/source, respectivement) à définir (Figure 4.4).

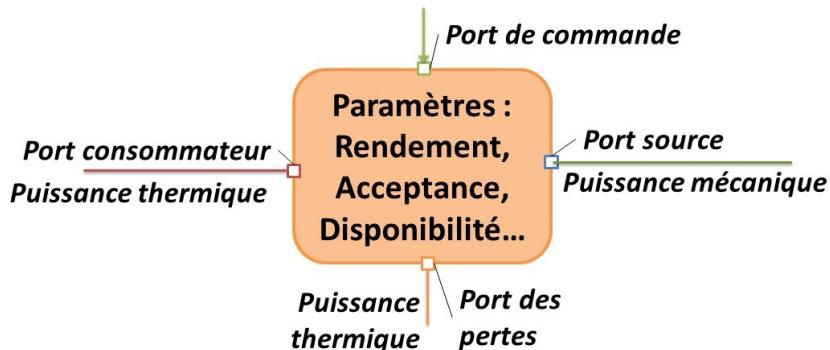


FIGURE 4.4 – Les ports et les paramètres d'élément transformateur F-à-M.

Sachant que la fonctionnalité de ce groupe est de transformer l'énergie thermique (l'énergie de carburant) en énergie mécanique, les niveaux d'énergie sur les ports E/S (consommateur/source) ne sont pas les mêmes. Par conséquent, l'élément transformateur F-à-M reçoit de l'énergie thermique par le port E (le port consommateur) et transmet de l'énergie mécanique par le port S (le port source). Le port consommateur est connecté à l'élément de stockage de carburant. L'énergie mécanique produite peut être utilisée pour la mobilité du véhicule (par le différentiel et les dynamiques du véhicule : roues, châssis) et pour le confort thermique (chauffage de la cabine du véhicule, etc.). De même, cette énergie peut être récupérée pour recharger la batterie.

Dès que les ports E/S sont définis, l'acceptance des effecteurs (mobilité et confort thermique) à l'élément transformateur F-à-M et l'acceptance de l'élément transformateur aux effecteurs sont paramétrées. Comme déjà mentionné, en raison du transfert d'énergie unidirectionnel de la chaîne de traction thermique (le moteur thermique ne permet pas le freinage régénératif), l'acceptance des effecteurs à l'élément transformateur F-à-M est réglée à 0. Cela signifie que pendant les phases de décélération, l'élément transformateur F-à-M n'est pas utilisé et le système de freinage mécanique peut être activé. En revanche, l'acceptance de l'élément transformateur F-à-M à l'effecteur est déterminée à partir de la puissance maximale fournie par la chaîne de traction thermique et le rendement global du groupe des composants.

La Figure 4.5 illustre les caractéristiques statiques d'un moteur thermique, obtenues auprès du constructeur. Si la boîte de vitesse n'est pas prise en compte, les caractéristiques d'un moteur thermique sont similaires à celles d'un moteur électrique. Tant que le système physique d'une chaîne de traction thermique regroupe le moteur thermique avec la boîte de vitesse, les caractéristiques du moteur thermique ne sont pas suffisantes pour anticiper la puissance maximale transmise aux roues du véhicule.

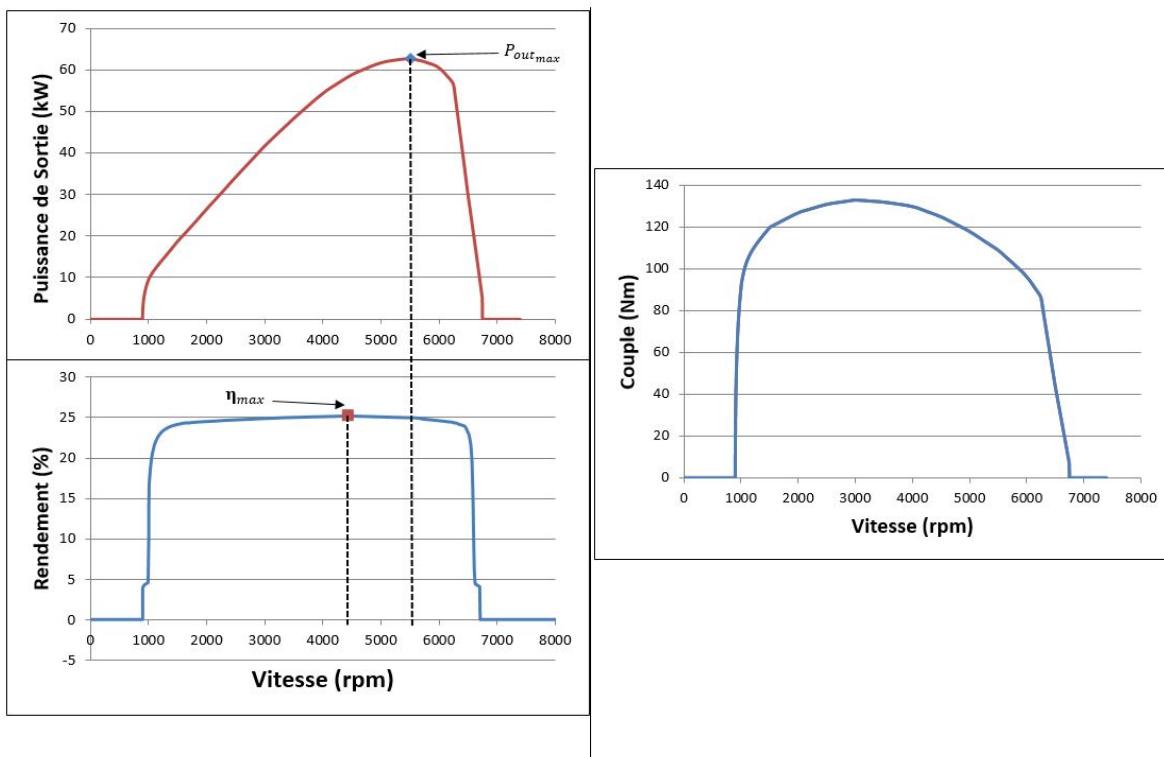
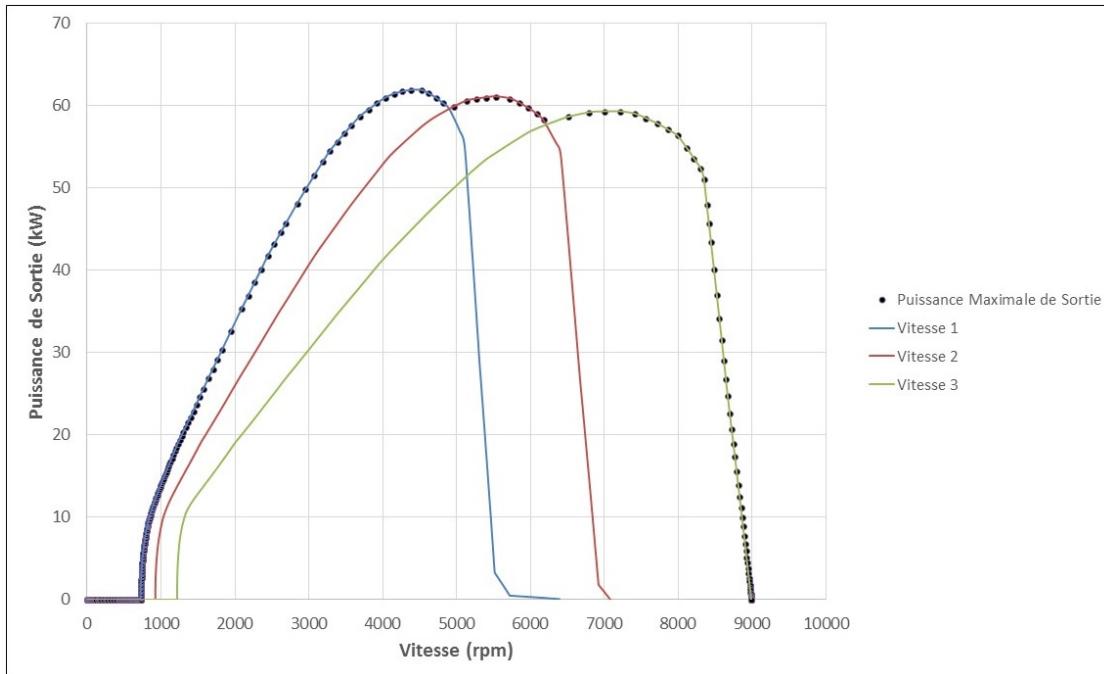


FIGURE 4.5 – Caractéristiques statiques d'un moteur thermique – (a) puissance de sortie - vitesse, rendement - vitesse ; (b) couple - vitesse.

Le rôle d'une boîte de vitesse est d'adapter les caractéristiques d'un moteur thermique au besoin de traction d'un véhicule. A chaque changement de vitesse, le rendement et les performances de la chaîne de traction thermique évoluent. Dans cet exemple, une boîte de vitesse avec trois rapports de vitesse est considérée.

Les caractéristiques statiques puissance - vitesse d'un moteur thermique avec boîte de

vitesse sont illustrées dans la [Figure 4.6](#). Celles-ci dépendent des valeurs du rapport de vitesse qui éventuellement peuvent changer les performances de la chaîne de traction thermique. A partir de ces caractéristiques, la puissance maximale de sortie du groupe est déterminée (représentée en pointillé dans la [Figure 4.6](#)). La valeur maximale de la caractéristique globale fournit la puissance maximale en sortie de l'élément transformateur F-à-M. Dans cet exemple, la puissance mécanique maximale de la chaîne de traction thermique est d'environ 62kW. Cela signifie que pour un moteur thermique ayant une puissance de sortie de 70kW (spécification du constructeur), les pertes mécaniques en boîte de vitesse sont de 8kW.



**FIGURE 4.6 – Caractéristiques de sortie de la chaîne de traction thermique avec trois rapports de vitesse.**

Après avoir défini la puissance maximale de l'élément transformateur F-à-M, afin d'établir l'acceptance de cet élément, le rendement de la chaîne de traction thermique doit être déterminé. Le couple de sortie pour une vitesse et une puissance de sortie données est calculé de la façon suivante :

$$\tau_n \omega_n = P_{out,n} \quad (4.1)$$

où  $\tau$  est le couple,  $n$  est la valeur du rapport de vitesse,  $\omega$  est la vitesse angulaire donnée et  $P_{out}$  est la puissance de sortie de la chaîne de traction thermique.

Les caractéristiques statiques couple-vitesse pour trois rapports de vitesse avec les zones de fonctionnement associées sont illustrées dans la [Figure 4.7](#). Ces valeurs sont obtenues par la modification des valeurs du couple et de la vitesse données par le constructeur [Figure 4.5](#)) en cohérence avec les rapports de vitesse. La boucle de régulation locale de la chaîne de traction thermique doit conserver le fonctionnement du système dans ces zones afin de maximiser le rendement du groupe des composants. La valeur du rendement de l'élément transformateur F-à-M est donné par la moyenne des rendements maximaux de toutes les

zones de fonctionnement. Cela signifie également que la commande locale de la chaîne de traction thermique assure le fonctionnement du groupe des composants à l'intérieur de ces zones admissibles (Figure 4.7).

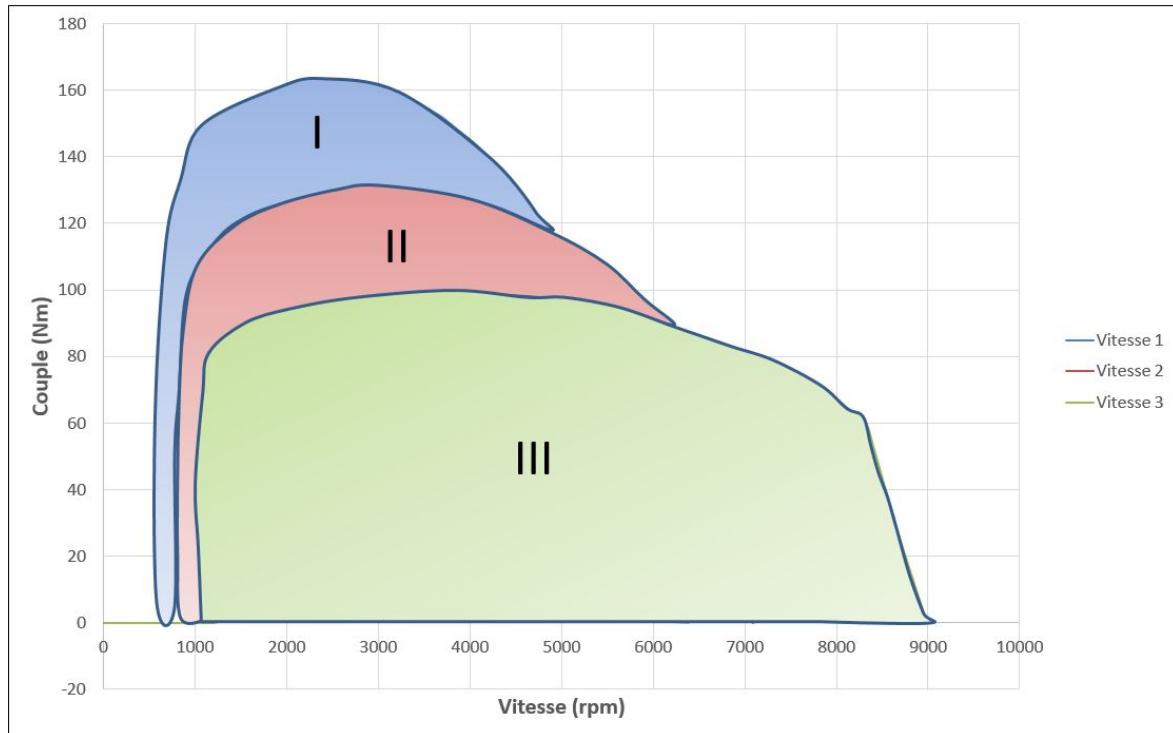


FIGURE 4.7 – Caractéristiques statiques couple-vitesse pour trois rapports de vitesse avec les zones de fonctionnement de rendement maximal.

Dans la Figure 4.8, la caractéristique statique rendement moyen-couple de la chaîne de traction thermique est illustrée. Tandis que le correcteur local de la chaîne de traction thermique est supposé à assurer un fonctionnement à rendement maximal pour chaque point (couple, vitesse), les points correspondant aux couples inférieurs à 50 Nm sont négligés en raison du fonctionnement du système à un rendement plus faible que la valeur moyenne (22,5%). A partir des valeurs données par le constructeur et le rendement moyen calculé, l'acceptance de l'élément transformateur F-à-M est déterminée par :

$$P_{acc_1} = P_{out_1} \frac{1}{\eta_{1-2}} = 70kW \frac{1}{0,225} = 310kW \quad (4.2)$$

où  $P_{acc_1}$  est l'acceptance du port d'entrée (le port consommateur),  $P_{out_1}$  est la puissance de sortie du port de sortie (le port source) et  $\eta_{1-2}$  est le rendement du port consommateur au port source d'élément transformateur F-à-M.

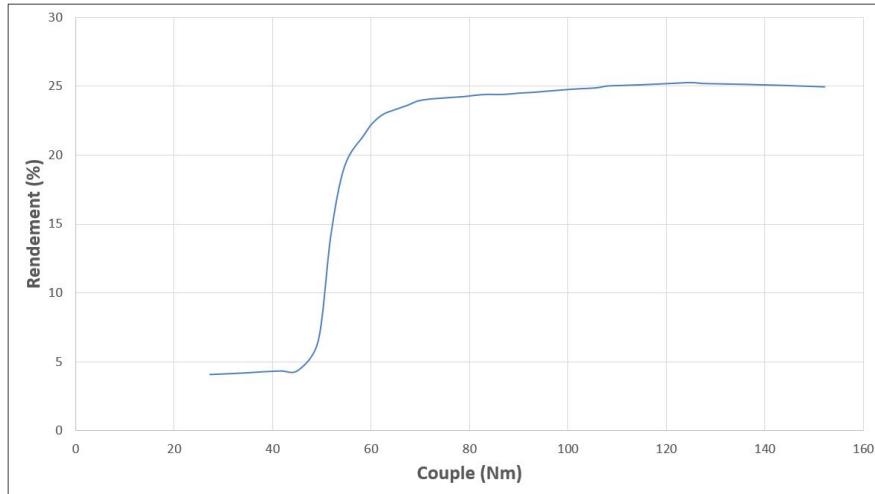


FIGURE 4.8 – Caractéristique statique rendement moyen - couple de la chaîne de traction thermique.

Par ailleurs, le paramétrage de l'élément transformateur E-à-M peut être réalisé d'une façon similaire. Cet élément représente la fonctionnalité de la chaîne de traction électrique qui contient l'onduleur, la machine électrique et le réducteur. Puisque ce groupe de composants ne contient pas de boîte de vitesse, mais plutôt un réducteur avec un seul rapport de vitesse, le paramétrage est plus simple que celui de la chaîne de traction thermique. Dans ce cas, le rendement global prend en compte les rendements des composants constitutifs : convertisseur, réducteur et machine électrique. Pourtant, la principale différence consiste dans le fait que l'élément transformateur E-à-M peut avoir une acceptance non nulle pour le port de sortie (le port source), qui signifie que cet élément a la capacité d'absorber l'énergie du freinage régénératif envoyée par l'effecteur mobilité (dynamique du véhicule). En conséquence, les acceptances de deux ports de l'élément transformateur E-à-M doivent être définies, ainsi que les rendements de la transformation bidirectionnelle. Le paramétrage final des éléments est donné dans le [Chapitre 5](#) avec l'application de la démarche de paramétrage à un véhicule hybride.

Le paramétrage d'un élément fonctionnel peut être affiné selon la complexité du modèle fonctionnel et de la dynamique d'élément. Ce phénomène va être détaillé par la suite pour l'élément transformateur F-à-M.

#### 4.1.1.2 Paramétrage de la dynamique d'éléments fonctionnels

Le paramétrage dynamique des éléments fonctionnels est présenté en partant de la répartition de la puissance de charge d'un véhicule, proposée en [84, 85]. Dans ce cas, la puissance de charge est décomposée en deux composants : la puissance moyenne (constante) et la puissance dynamique (l'écart entre la puissance demandée et la valeur moyenne). La décomposition est montrée dans la [Figure 4.9](#).

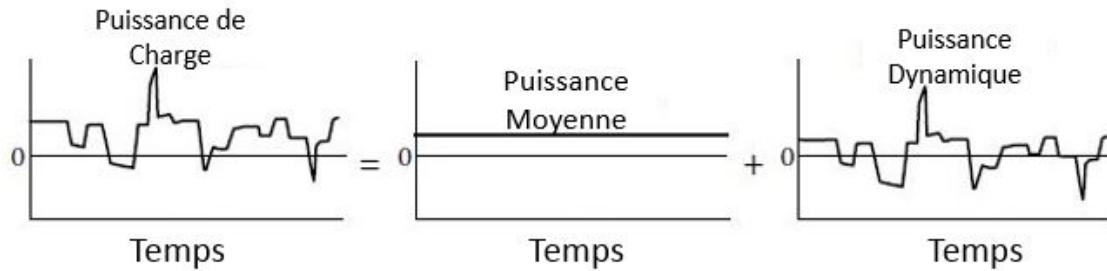


FIGURE 4.9 – Puissance de charge décomposée en puissances moyenne et dynamique [84, 85].

Un exemple pour les stratégies de gestion d'énergie dans un VEH est de répartir la puissance demandée entre les différents chaînes de traction de façon suivante : la chaîne de traction thermique (composée d'un groupe de composantes capables de produire une puissance constante à long terme) fournit la puissance moyenne afin de maximiser le rendement du système, alors que la chaîne de traction électrique complète la puissance dynamique nécessaire pour accomplir la mission du véhicule. De plus, l'énergie moyenne en sortie d'une chaîne de traction électrique devrait être nulle sur un cycle de conduite complet lorsque le freinage régénératif est utilisé (afin d'obtenir le niveau d'état de charge initial à la fin du cycle de conduit). Cela peut mener le concepteur à développer des algorithmes de gestion d'énergie qui assurent le même état de charge du stockage électrique au début et à la fin du cycle de conduite. Les fonctionnalités principales de la chaîne de traction électrique sont donc de fournir la puissance nécessaire en régime transitoire et de récupérer l'énergie lors de phases de freinage (freinage régénératif). De ce fait, le paramétrage des éléments fonctionnels est réalisé en prenant en compte la dynamique du groupe des composants physiques. Avec un paramétrage approprié des éléments fonctionnels, les informations transférées aux distributeurs sont pertinentes et leur utilisation dans des algorithmes de gestion d'énergie ne pose pas de difficultés, surtout pour la construction de l'architecture de commande du système multi-physiques.

Enfin, après la validation des paramètres et l'allocation des ressources du modèle fonctionnel, ce modèle sera éventuellement adapté afin d'être utilisé comme le système GGR du modèle multi-physiques.

#### 4.1.2 Interconnexion des modèles fonctionnel et multi-physiques

Au niveau fonctionnel, le système est modélisé indépendamment de la technologie des composants physiques et la stratégie de commande est définie par le système de gestion décisionnelle (GD) à partir de modèles des missions. De même, le modèle fonctionnel intègre la stratégie de gestion d'énergie du système qui peut être ensuite utilisée par le superviseur du modèle multi-physiques.

Dans la Figure 4.10, les représentations des systèmes de commande et de supervision sont illustrées, ainsi que les échanges des flux, pour un modèle fonctionnel et un modèle multi-physiques d'un véhicule électrique (VE). La problématique d'interconnexion peut être

formulée de la façon suivante : décider des sémantiques compatibles à utiliser afin de réaliser la connexion des modèles.

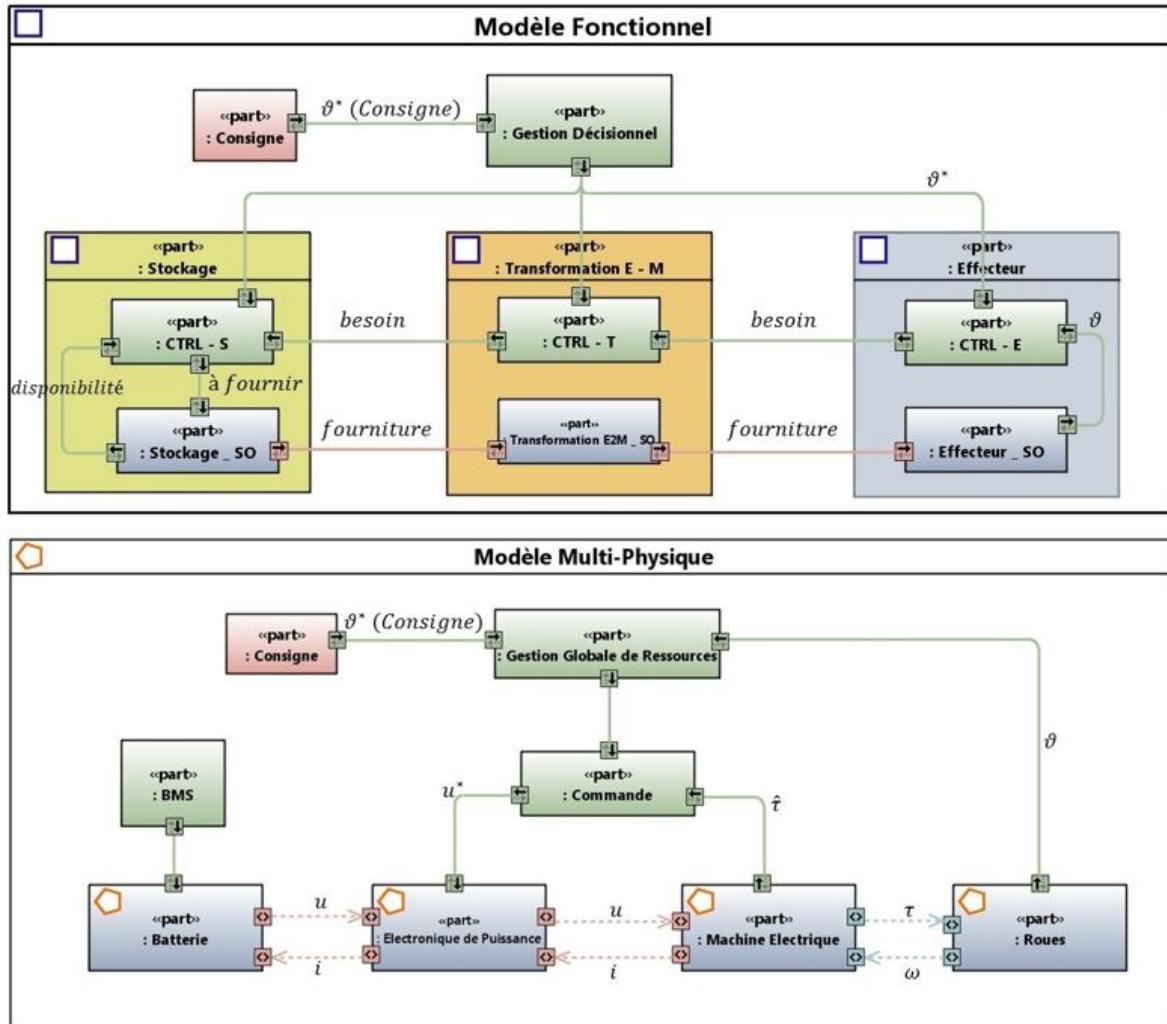


FIGURE 4.10 – Systèmes de commande et échanges des flux au niveau fonctionnel et au niveau multi-physiques [106, 107].

Dans la Figure 4.10, il est possible de voir que les échanges des flux sont différents pour les deux modèles fonctionnel et multi-physiques. Par conséquent, l'interconnexion ne peut pas être faite directement. Puisque les composants multi-physiques ont besoin des références du domaine physique et les composants du modèle fonctionnel exigent des références de besoin de puissance (énergie) pour réaliser des simulations, la connexion entre les flux de puissance et les flux du domaine physique est une étape indispensable.

A ce stade, les avantages des propriétés d'interconnexion des modèles sont les suivants :

- la modélisation fonctionnelle permet la conception rapide de l'architecture de commande ainsi que l'adaptation rapide aux changements éventuels du système.
- la représentation multi-physiques est plus précise mais très complexe et exige un temps de simulation important lorsque des essais sont effectués.

Les prestations des deux modèles représentés à des niveaux d'abstraction différents sont analysées. La meilleure solution obtenue au niveau fonctionnel est ensuite adaptée et intégrée au niveau multi-physiques afin d'effectuer des tests supplémentaires, nécessaires dans le processus de validation. En prenant en compte les avantages d'interconnexion, la construction d'une interface entre les modèles fonctionnel et multi-physiques est proposée. Un exemple est illustré dans la Figure 4.11.

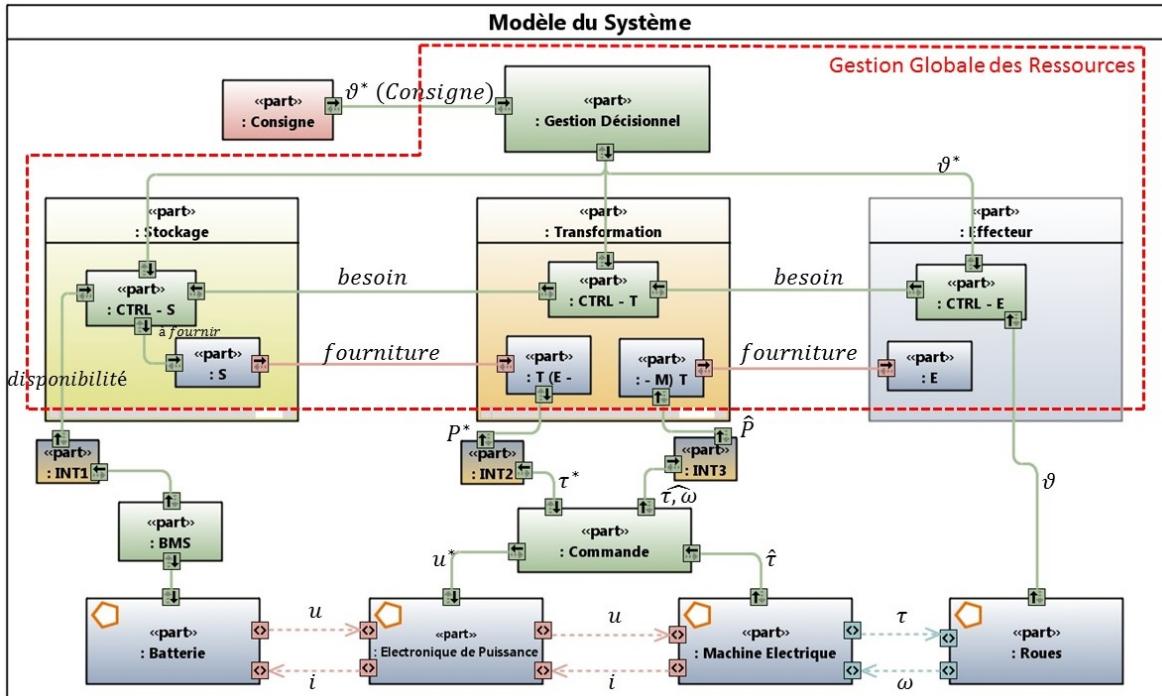


FIGURE 4.11 – L'interconnexion entre domaines fonctionnel et multi-physiques [106, 107].

L'interface proposée contient les équations de transition entre les domaines physique et fonctionnel. Elle accomplit les fonctions suivantes :

- déterminer les références physiques équivalentes exigées par le modèle multi-physiques et fondées sur le besoin de puissance fourni par le modèle fonctionnel,
- mesurer/estimer la fourniture de puissance que le système est capable de livrer en utilisant les informations du modèle multi-physiques et le transfert de fourniture de puissance estimé au modèle fonctionnel.

Pour chaque élément du modèle fonctionnel, une interface d'interconnexion est obligatoire afin de calculer/adapter les consignes nécessaires.

Si l'on considère l'élément de transformation électromécanique, l'interface entre cet élément et le groupe de traction électrique (commande et machine électrique pour cet exemple) doit utiliser les équations suivantes (cas de démarrage est négligé) :

$$\frac{P_{fnc}^*}{|\hat{\omega}_r|} = \tau_{cns}^* \text{ où } |\hat{\omega}_r| \neq 0 \quad (4.3)$$

$$P_{mech} = \hat{P}_{fnc} \quad (4.4)$$

où  $P_{fnc}^*$  est la consigne de puissance ;  $\hat{\omega}_r$  est la vitesse angulaire estimée/mesurée du rotor de la machine électrique ;  $\tau_{cns}^*$  est la consigne de couple ;  $P_{mech}$  est la puissance mécanique de sortie calculée de la machine électrique et  $\hat{P}_{fnc}$  est la puissance de sortie de la machine électrique estimée/mesurée.

Une fois que les éléments du modèle fonctionnel ont été adaptés afin d'assurer la compatibilité avec les composants du modèle multi-physiques et que les interfaces d'interconnexion ont été développées, le modèle fonctionnel peut être utilisé pour la conception du système de gestion globale de ressources (GGR) au niveau multi-physiques. Cette utilisation facilite les travaux des concepteurs pour obtenir le superviseur du modèle multi-physiques car le choix de la stratégie de gestion des ressources, le dimensionnement des groupes des composants et le choix de l'architecture du système sont faits au niveau fonctionnel. L'approche proposée permet de diminuer le nombre des essais et le temps de validation des étapes citées précédemment, avant de s'intéresser à l'analyse du modèle multi-physiques obtenu.

## 4.2 Formalisme du problème d'optimisation

La problématique de répartition d'énergie dans le contexte des véhicules hybrides fait l'objet de nombreuses études. Généralement, l'intérêt est dirigé vers l'utilisation des méthodes de gestion énergétique pour assurer une distribution d'énergie optimale entre les différents groupes de composants. Plusieurs approches ayant comme objectif la minimisation de la consommation de carburant et d'émissions du véhicule ont été étudiées et comparées dans la littérature [40, 41, 46, 53, 122-126]. L'état de l'art (réalisé en [Chapitre 1](#)) des différentes approches de gestion d'énergie utilisées pour les véhicules électriques hybrides a amené les travaux de cette thèse à s'intéresser à la stratégie de la commande prédictive à base de modèle (en anglais, Model Predictive Control - MPC) qui permet la résolution des problèmes d'optimisation sous contraintes pour les systèmes multi-sources/multi-consommateurs. Cette approche a été déjà utilisée pour optimiser la gestion des flux d'énergie pour les VEHs [49, 51, 52, 54, 55, 127]). De ce fait, cette stratégie a été étudiée au niveau multi-physiques afin d'analyser ces performances en vue d'une éventuelle mise en œuvre au niveau fonctionnel (les principes et l'application à un VEH sont donnés en [Annexe B](#)).

L'utilisation de la commande prédictive au niveau de supervision permet d'optimiser les consignes de couples demandées au moteur thermique et à la machine électrique tout en respectant les limitations physiques du véhicule. D'après les premiers résultats obtenus, on peut conclure que l'approche MPC pourrait être l'une des solutions envisageables pour l'optimisation énergétique globale des VEHs. Néanmoins, l'intégration de l'algorithme de commande prédictive dans le modèle fonctionnel n'est pas évidente car elle limite l'utilisation des distributeurs. La raison est liée à la disponibilité des informations utilisées par l'algorithme de commande au niveau d'éléments distributeurs ; ces informations pourront être collectées par le superviseur et envoyées aux distributeurs, mais cela engendra une

éventuelle augmentation du temps de simulation et une dégradation de la modularité du système. Cependant, la modularité est l'un des plus importants avantages de la modélisation fonctionnelle. Si le modèle perd cette propriété, l'évaluation du même algorithme pour une autre architecture du véhicule ou la comparaison des performances pour des architectures différentes ne seront pas réalisable. De plus, la prédition des états du système nécessaire pour le calcul de la commande, ajoute une charge de calcul non-négligeable dans la simulation du modèle fonctionnel. Celle-ci s'oppose au principe de la modélisation fonctionnelle qui consiste à développer un modèle énergétique composée par des éléments simples afin de limiter la complexité et le temps de simulation. Une autre difficulté d'implémentation de l'algorithme est la nécessité de transformation des natures des signaux et des commandes. Dans l'exemple donné en [Annexe B](#), les signaux de commandes sont des couples qui ne peuvent pas être utilisés directement par les éléments de la modélisation fonctionnelle. Pour s'affranchir de ce problème, une estimation de la vitesse du véhicule est nécessaire pour calculer la consigne de puissance équivalente et l'utiliser pour la commande du modèle fonctionnel.

Même si la dynamique de la vitesse peut être remplacée par la dynamique de l'énergie du véhicule pour faire appel à des références en énergie et des commandes en puissance, la mise en œuvre reste conditionnée par la présence d'un système de supervision centralisé du système qui assure la transmission des informations entre les distributeurs et les autres éléments du modèle fonctionnel. Par la suite, l'approche de la commande prédictive fonctionnelle (PFC) a été proposée afin de garder la modularité de la méthodologie de modélisation fonctionnelle.

#### 4.2.1 Principes de la commande prédictive fonctionnelle

Le principe de la stratégie de commande prédictive fonctionnelle peut être résumé dans les étapes suivantes ([Figure 4.12](#)) :

- i. estimation du comportement futur du processus à l'aide d'un modèle,
- ii. choix d'une trajectoire de référence pour joindre la consigne,
- iii. calcul du scénario de commande qui permet d'atteindre la trajectoire de référence aux points de coïncidence,
- iv. utilisation de la première commande du scénario et réitération de la procédure selon le principe de « la stratégie à horizon glissant ».

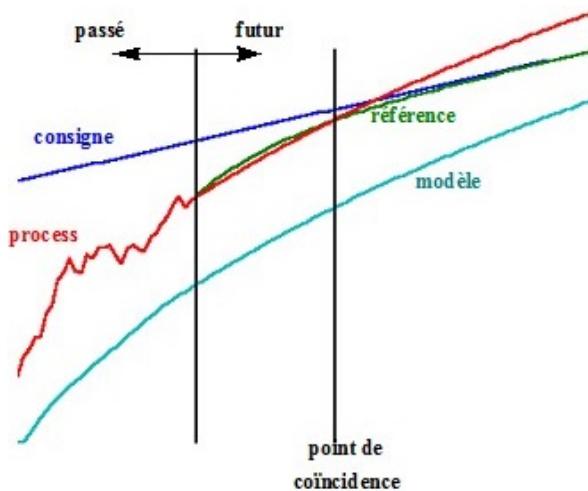


FIGURE 4.12 – Principe de la commande prédictive fonctionnelle (PFC).

La stratégie utilise un point de coïncidence, dans le futur, qui sera repéré par son indice  $h$  ou plus généralement un ensemble de points de coïncidence noté  $H$ . La notation  $x(n + h)$  représente la prédition de la variable  $x$  calculée sur un horizon  $h$  à l'instant  $n$ .

La prédition de la sortie du processus  $y_p(n + h)$  peut être définie comme la somme des 3 termes suivants (Figure 4.13) :

- $y_{mi}(n + h)$ , la sortie prédictée du modèle de commande (appelé aussi modèle interne) qui traduit la relation entre la commande et la sortie du modèle,
- $y_{m\gamma}(n + h)$ , la sortie prédictée du modèle de perturbation qui traduit la relation entre les perturbations mesurées et la sortie du modèle,
- $e(n + h)$  l'erreur de prédition qui tente de décrire la partie mesurée du processus et non expliquée par les modèles précédents.

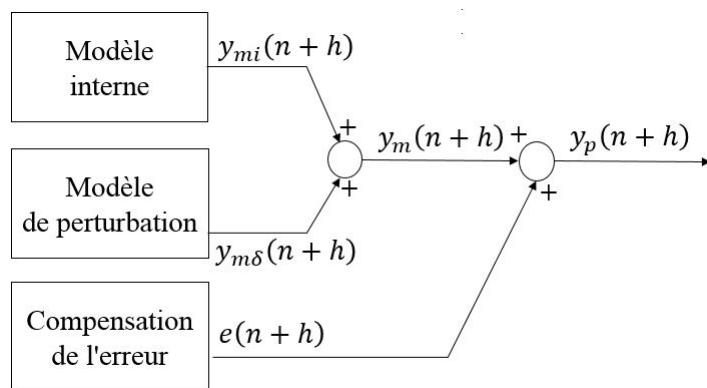


FIGURE 4.13 – Prédiction de la sortie du processus.

De la Figure 4.13, la sortie prédictée du processus s'écrit :

$$y_p(n + h) = y_m(n + h) + e(n + h) \quad (4.5)$$

La sortie prédite du modèle, notée  $y_m(n + h)$ , est définie par la somme des sorties prédites  $y_{mi}(n + h)$  et  $y_{m\gamma}(n + h)$ . Dans ce qui suit, les perturbations mesurées (supposées connues au moyen d'un modèle de prédiction) seront négligées. On a donc  $y_m(n + h) = y_{mi}(n + h)$ .

#### 4.2.1.1 Modèle du procédé

Dans ce contexte, on adopte un modèle linéaire défini par les équations d'état discrètes :

$$\begin{aligned} x_m(n+1) &= A_m x_m(n) + B_m u(n) \\ y_m(n) &= C_m x_m(n) \end{aligned} \quad (4.6)$$

où  $x_m$ ,  $u$  et  $y_m$  représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur de commande et le vecteur de sortie du modèle,  $A_m$ ,  $B_m$  et  $C_m$  sont respectivement la matrice d'évolution, la matrice de commande et la matrice d'observation.

La prédiction du vecteur d'état peut être calculée à partir de l'état à l'instant  $n$  et du scénario de commande futur :

$$\begin{aligned} x_m(n+1) &= A_m x_m(n) + B_m u(n) \\ x_m(n+2) &= A_m x_m(n+1) + B_m u(n+1) = A_m^2 x_m(n) + A_m B_m u(n) + B_m u(n+1) \\ &\vdots \\ x_m(n+h) &= A_m^h x_m(n) + \sum_{k=0}^{h-1} A_m^{h-1-k} B_m u(n+k) \end{aligned} \quad (4.7)$$

La sortie future du modèle est donnée par :

$$y_m(n+h) = C_m x_m(n+h) \quad (4.8)$$

Ce qui donne :

$$y_m(n+h) = C_m A_m^h x_m(n) + C_m \sum_{k=0}^{h-1} A_m^{h-1-k} B_m u(n+k) \quad (4.9)$$

Dans le cas d'un système linéaire, la sortie future du modèle peut être décomposée en deux parties :

$$y_m(n+h) = y_{ml}(n+h) + y_{mf}(n+h) \quad (4.10)$$

Donc :

$$y_{ml}(n+h) = C_m A_m^h x_m(n) \quad (4.11)$$

et :

$$y_{mf}(n+h) = C_m \sum_{k=0}^{h-1} A_m^{h-1-k} B_m u(n+k) \quad (4.12)$$

où :

- $y_{ml}(n + h)$  est la sortie « *lâchée* » du modèle qui dépend uniquement du passé du l'état du système (sans action de commande).
- $y_{mf}(n + h)$  est la sortie « *forcée* » du modèle qui est calculée en supposant l'état initial nul et avec la commande à déterminer.

#### 4.2.1.2 Sortie de référence

Dans la commande prédictive fonctionnelle, à l'instant  $n$ , les consignes futures  $c(n + h)$ ,  $h \in H$  sont considérées connues ou estimées.

La trajectoire de référence est définie comme la réponse d'un système de premier ordre initialisé sur la sortie du processus :

$$y_{ref}(n) = y_p(n) \quad (4.13)$$

et convergeant vers la consigne :

$$y_{ref}(n + h) - c(n + h) = \alpha_r \left( y_{ref}(n + h - 1) - c(n + h - 1) \right) \quad (4.14)$$

avec une vitesse de convergence donnée par  $\alpha_r$ , le décrément de la trajectoire de référence.

On en déduit donc :

$$y_{ref}(n + h) - c(n + h) = \alpha_r^h \left( y_p(n) - c(n) \right) \quad (4.15)$$

#### 4.2.1.3 Structuration de la commande future

La sortie future du modèle  $y_m(n + h)$ ,  $h \in H$  dépend de l'expression de la commande future utilisée. Dans la stratégie commande prédictive fonctionnelle, la commande  $u(n + k)$  avec  $k \leq \max(H)$  est structurée sous forme de combinaison linéaire de fonctions de base  $\{u_{b,j}, j = 1, \dots, n_b\}$ .

On a donc :

$$u(n + k) = \sum_{j=1}^{n_b} \mu_j(n) u_{b,j}(k) \quad (4.16)$$

En utilisant les propriétés des systèmes linéaires, la sortie forcée s'écrit :

$$y_{mf}(n + h) = \sum_{j=1}^{n_b} \mu_j(n) y_{b,j}(h) \quad (4.17)$$

où  $y_{b,j}, j = 1, \dots, n_b$  sont les sorties de base du modèle, c'est-à-dire les réponses du modèle

aux fonctions de base.

La commande optimale est calculée par la résolution d'un problème d'optimisation, qui minimise, sur un horizon futur fini, l'écart entre la trajectoire de référence  $y_{ref}(n + h)$  et la sortie prédictive  $y_p(n + h)$  du processus. La critère quadratique à minimiser est le suivant :

$$J(n) = \sum_{h \in H} \left( y_{ref}(n + h) - y_p(n + h) \right)^2 \quad (4.18)$$

En séparant les inconnus ( $\mu_j$ ) des autres termes dans les équations 4.5, 4.6, 4.10, 4.15, 4.17, 4.18, nous obtenons :

$$J(n) = \sum_{h \in H} \left( \sum_{j=1}^{n_b} \mu_j(n) y_{b,j}(h) - d(n + h) \right)^2 \quad (4.19)$$

avec :

$$d(n + h) = c(n + h) + \alpha_r^h \left( y_p(n) - c(n) \right) - y_{ml}(n + h) - e(n + h) \quad (4.20)$$

et :

$$e(n + h) = y_p(n + h) - y_m(n + h) \quad (4.21)$$

La minimisation du critère quadratique (équation 4.19) à l'instant  $n$  revient donc à déterminer les coefficients  $\mu_j(n), j = 1, \dots, n_b$ .

Suivant la stratégie à horizon glissant, seul le premier élément de la séquence de commande optimale est appliqué au système :

$$u(n) = \sum_{j=1}^{n_b} \mu_j(n) u_{b,j}(0) \quad (4.22)$$

La procédure est ensuite réitérée à l'instant suivant, en utilisant une nouvelle mesure.

#### 4.2.1.4 Mise en oeuvre de PFC dans un cas simple

Nous définissons un cas simple par les hypothèses suivantes :

- i. le système est linéaire et invariant dans le temps,
- ii. la commande et la consigne sont constantes sur l'horizon de prédiction,
- iii. un seul point de coïncidence,  $h$ , est pris en considération.

Dans ce cas, la commande et le problème d'optimisation à résoudre (équation 4.19), s'expriment par :

$$J(n) = \left( \mu_1(n) y_{b,1}(h) - d(n + h) \right)^2 \quad (4.23)$$

avec :

$$d(n+h) = c(n) + \alpha_r^h \left( y_p(n) - c(n) \right) - y_{ml}(n+h) - \left( y_p(n) - y_m(n) \right) \quad (4.24)$$

D'après l'équation 4.22 :

$$u(n) = \mu_1(n) u_{b,j}(0) = \mu_1(n) \quad (4.25)$$

on obtient donc :

$$J(n) = \left( u(n) y_{b,1}(h) - \left( (1 - \alpha_r^h) (c(n) - y_p(n)) + (y_m(n) - y_{ml}(n+h)) \right) \right)^2 \quad (4.26)$$

en notant :

$$b(n) = \frac{(1 - \alpha_r^h) (c(n) - y_p(n)) + (y_m(n) - y_{ml}(n+h))}{y_{b,1}(h)} \quad (4.27)$$

Minimiser  $J(n)$ , devient à minimiser  $O(n)$  avec :

$$O(n) = \left( u(n) - b(n) \right)^2 \quad (4.28)$$

#### 4.2.2 Gestion fonctionnelle des ressources (traitement fonctionnel)

La modularité de la modélisation fonctionnelle est assurée par l'utilisation des éléments de distribution. Les distributeurs font le lien entre les consommateurs et les sources et allouent les besoins et les puissances reçus selon des critères de performance, l'algorithme utilisé et les limitations des éléments fonctionnels. Pour un système multi-sources/multi-consommateurs, l'allocation devient assez complexe, du fait qu'elle implique la résolution de deux sous-problèmes différents. Pour optimiser la répartition de ressources, l'une des solutions est de décomposer le distributeur en deux sections [73]. Cette démarche simplifie le problème d'optimisation en le divisant en deux sous-problèmes : la répartition des besoins pour un distributeur mono-source/multi-consommateurs et la répartition de puissance fournie pour un distributeur multi-sources/mono-consommateur. L'approche proposée offre une solution aux problèmes de gestion en respectant la modularité de la modélisation fonctionnelle ainsi que les contraintes des éléments fonctionnels (par exemple : puissance maximale, disponibilité, acceptance, etc.). Cette approche sera détaillée par la suite en considérant un exemple simple.

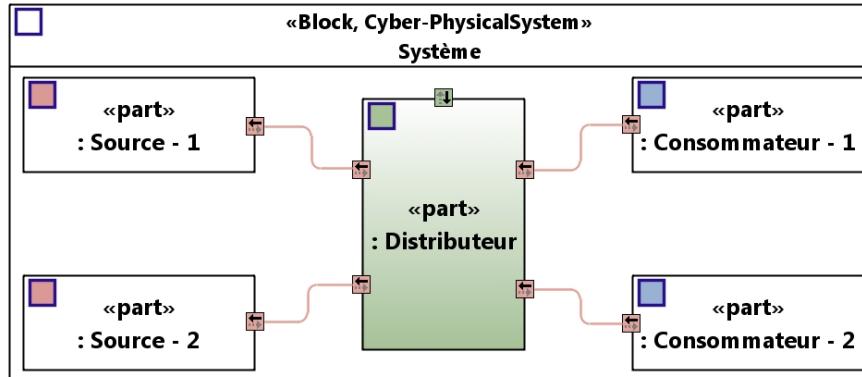


FIGURE 4.14 – Représentation du système multi-sources/multi-consommateurs.

La représentation d'un système contenant deux consommateurs et deux sources reliées par un distributeur est illustrée dans la Figure 4.14.

Par application de la stratégie de la commande prédictive fonctionnelle, le distributeur utilise un critère de performance  $J(n)$  afin de gérer la répartition des besoins et des puissances reçus. Ce critère peut être écrit en utilisant l'équation 4.19 sous la forme suivante :

$$J(n) = J_1(n) + J_2(n) = \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_i O_i + \sum_{j=1}^{n_s} \beta_j C_j \quad (4.29)$$

où  $n_s$  et  $n_c$  sont respectivement le nombre de sources et de consommateurs,  $O_i$  représentent les fonctions d'objectifs calculées par les consommateurs sur l'horizon de prédiction et  $C_j$  représentent les fonctions de coût déterminées par les sources sur l'horizon de prédiction. Le distributeur collecte les informations fournies par les éléments connectés pour constituer l'expression du critère (équation 4.29) avec les pondérations  $\alpha_i$  et  $\beta_j$  et résout un problème d'optimisation permettant l'allocation des ressources.

Afin de gérer la répartition de besoins vers les sources et de puissances vers les consommateurs, le système est représenté sous une forme équivalente (Figure 4.15). La distribution est réalisée par deux distributeurs interconnectés afin de séparer le problème de gestion de ressource en deux parties : un problème de gestion d'un système multi-sources/mono-consommateur et un problème de gestion d'un système mono-source/multi-consommateurs.

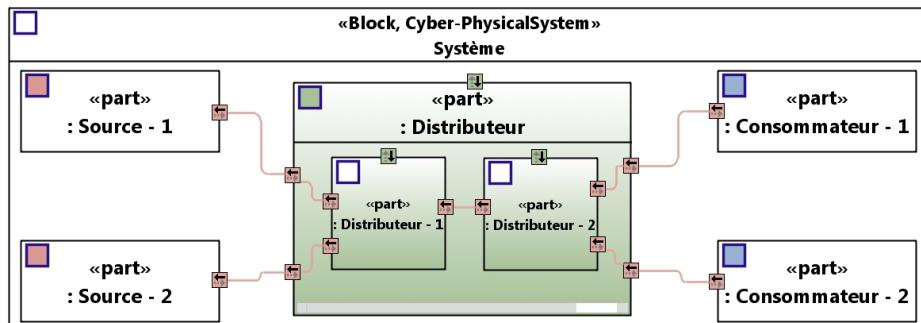


FIGURE 4.15 – Représentation du problème de gestion de ressources décomposé.

#### 4.2.2.1 Allocation de puissance dans un sous-système mono-source/multi-consommateurs

La (Figure 4.16) représente un sous-système de mono-source/multi-consommateurs. Pour ce système, on note :

- $b_k$  ( $k = [1, 2]$ ,  $n_c = 2$ ) - le besoin calculé par le système de pilotage (SP) de chaque effecteur,
- $y_k$  - la réponse du système calculé par le système opérant (SO) de l'effecteur,
- $b$  - le besoin total à repartir,
- $u$  - la puissance totale à fournir,
- $u_k$  - la puissance fournie à chaque effecteur,
- $O_k$  - la fonction objectif calculée par le SP de chaque effecteur,
- $y_k^{ref}$  - la référence de l'effecteur de mission.

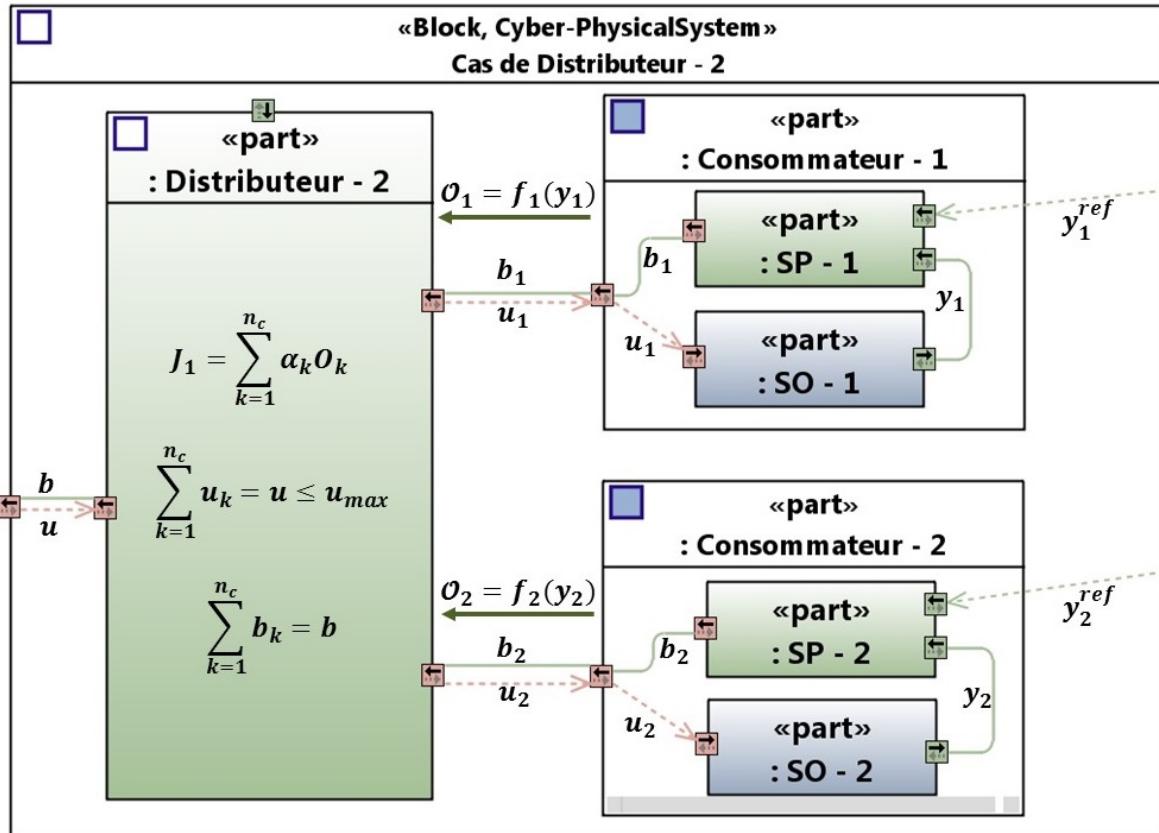


FIGURE 4.16 – Représentation détaillée du problème d'allocation de ressources en Distributeur – 2.

La fonction objective calculée par chaque consommateur correspondant à la PFC dans le cas simple [équation 4.28](#) est la suivante :

$$O_k(n) = f_k(y_k(n)) = (u_k(n) - b_k(n))^2 \quad (4.30)$$

Le Distributeur-2 détermine les puissances à délivrer aux consommateurs par la résolution du problème d'optimisation sous contraintes d'égalité suivant :

$$\begin{aligned} & \min_{u_k(n)} \sum_{k=1}^{n_c} \alpha_k O_k(n) \\ & \text{sujet à } \sum_{k=1}^{n_c} u_k(n) = u(n) \\ & \quad \sum_{k=1}^{n_c} b_k(n) = b(n) \end{aligned} \quad (4.31)$$

où les pondérations  $\alpha_k$  définissent la répartition des puissances aux consommateurs.

Pour l'exemple considéré, le critère à minimiser, noté  $J_1(n)$ , peut être reformulé sous la forme :

$$J_1(n) = \alpha_1 (u_1(n) - b_1(n))^2 + \alpha_2 (u_2(n) - b_2(n))^2 \quad (4.32)$$

La contrainte d'égalité sur les variables de commande peut être intégrée dans la fonction de coût en remplaçant l'une des variables de commande  $u_1(u_2)$  en fonction de l'autre  $u_2(u_1)$ . Selon la variable remplacée dans l'[équation 4.32](#), deux problèmes d'optimisation sans contraintes sont obtenus :

$$\min_{u_1} (\alpha_1 + \alpha_2) u_1^2 - 2(\alpha_1 b_1 + \alpha_2 (u - b_2)) u_1 + (\alpha_1 b_1^2 + \alpha_2 (u - b_2)^2) \quad (4.33)$$

$$\min_{u_2} (\alpha_1 + \alpha_2) u_2^2 - 2(\alpha_2 b_2 + \alpha_1 (u - b_1)) u_2 + (\alpha_2 b_2^2 + \alpha_1 (u - b_1)^2) \quad (4.34)$$

Les commandes  $u_1(n)$  et  $u_2(n)$  optimales sont les solutions des équations  $\frac{\partial J_1(n)}{\partial u_k(n)} = 0$  pour  $k = 1, 2$  et ont les expressions :

$$u_1(n) = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} b_1(n) + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} (u(n) - b_2(n)) \quad (4.35)$$

$$u_2(n) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} b_2(n) + \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} (u(n) - b_1(n)) \quad (4.36)$$

Les relations [relations 4.35](#) et [4.36](#) sont obtenues pour un système qui dispose de deux consommateurs. Pour les systèmes qui contiennent plus que deux consommateurs, la résolution du problème d'optimisation [\(4.31\)](#) est assurée en utilisant les multiplicateurs de Lagrange. La définition du lagrangien associé au problème d'optimisation sous contraintes est la suivante :

$$L(u_k(n), \lambda_1, \lambda_2) = J_1(n) + \lambda_1 \left( \sum_{k=1}^{n_c} u_k(n) - u(n) \right) + \lambda_2 \left( \sum_{k=1}^{n_c} b_k(n) - b(n) \right) \quad (4.37)$$

où  $J_1(n) = \sum_{k=1}^{n_c} \alpha_k (u_k(n) - b_k(n))^2$  et  $\lambda_1, \lambda_2$  représentent les multiplicateurs de Lagrange.

La solution du problème d'optimisation [\(4.31\)](#) pour  $n_c > 2$  est obtenue tel que la différen-

tielle de  $L(u_k(n), \lambda_1, \lambda_2)$  soit nulle. Le système d'équations obtenu est donné dans l'[équation 4.38](#).

$$\begin{aligned}\frac{\partial L(n)}{\partial u_1(n)} &= 2\alpha_1(u_1(n) - b_1(n)) + \lambda_1 \\ \frac{\partial L(n)}{\partial u_2(n)} &= 2\alpha_2(u_2(n) - b_2(n)) + \lambda_1 \\ \frac{\partial L(n)}{\partial \lambda_1(n)} &= u_1(n) + u_2(n) - u(n)\end{aligned}\quad (4.38)$$

Ce système peut être reformulé sous forme matricielle de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} 2\alpha_1 & 0 & 1 \\ 0 & 2\alpha_2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(n) \\ u_2(n) \\ \lambda_1(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\alpha_1 b_1(n) \\ 2\alpha_2 b_2(n) \\ u(n) \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

La solution fondée sur la stratégie de commande prédictive fonctionnelle est implémentée dans le Distributeur 2 ([Figure 4.16](#)) et les performances de la solution proposée sont analysées dans deux cas particuliers : la puissance totale à fournir est supérieure ou égale aux besoins des effecteurs (Exemple I) et la puissance fournie est inférieure au besoin total (Exemple II).

#### 4.2.2.1.1 Exemple 1 pour Distributeur – 2 $(u(n) \geq b(n))$

Dans ce cas, les effecteurs ont alloué des objectifs différents. Ceux-ci sont représentés par deux signaux rectangulaires avec des périodes différents, illustrés sur les courbes de la [Figure 4.17](#) en rouge. Pour satisfaire ces objectifs, la puissance nécessaire est calculée par le système de pilotage de chaque effecteur. Les propriétés des effecteurs et de la source sont données dans le [Tableau 4.1](#).

**TABLEAU 4.1 – Exemple 1 : propriétés des éléments de Distributeur – 2.**

Elément	Propriété	Valeur
Effecteur - 1	Puissance maximale (W)	200
	Besoin de puissance moyenne (W)	100
	Puissance minimale (W)	-200
Effecteur - 2	Puissance maximale (W)	200
	Besoin de puissance moyenne (W)	100
	Puissance minimale (W)	-200
Source	Disponibilité (W)	400
	Acceptance (W)	400

Les résultats de simulation sont illustrés dans la [Figure 4.17](#). Avec ces caractéristiques du système mono-source/multi-consommateurs, la puissance fournie par la source est suffisante afin de satisfaire la demande en puissance pour la réalisation des missions. Cela signifie que les valeurs de  $\alpha_1$  et de  $\alpha_2$  n'ont pas un effet visible sur les puissances fournies (pas besoin de faire une répartition).

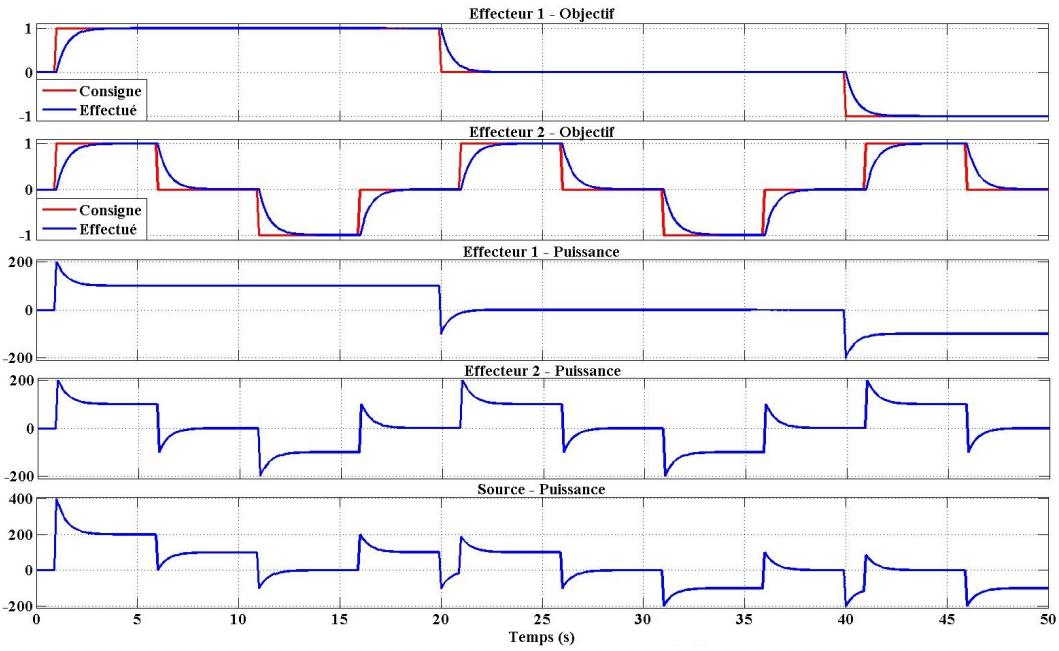


FIGURE 4.17 – Exemple 1 : allocation des ressources réalisée par le Distributeur – 2.

#### 4.2.2.1.2 Exemple 2 pour Distributeur – 2 $(u(n) < b(n))$

Pour ce deuxième exemple, les propriétés de la source et des effecteurs sont données dans le Tableau 4.2. Lorsque la puissance de la source n'est pas suffisante pour assurer toujours les besoins des effecteurs, la répartition est effectuée selon les pondérations  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $0 < \alpha_1 \leq 1$ ), et, si besoin, selon la disponibilité de la source. Dans l'exemple considéré,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ . La puissance négative d'un des effecteurs est utilisée pour satisfaire la mission de l'autre effecteur (Figure 4.18). Cette fonctionnalité peut être observée par exemple dans l'intervalle de temps [5s – 10s].

L'influence des valeurs des pondérations sur la répartition de puissance sera examinée lors d'une application sur le véhicule hybride en Section 5.3.3.1.

TABLEAU 4.2 – Exemple 2 : propriétés des éléments de Distributeur – 2.

Elément	Propriété	Valeur
Effecteur - 1	Puissance maximale (W)	200
	Besoin de puissance moyenne (W)	100
	Puissance minimale (W)	-200
Effecteur - 2	Puissance maximale (W)	200
	Besoin de puissance moyenne (W)	100
	Puissance minimale (W)	-200
Source	Disponibilité (W)	100
	Acceptance (W)	100

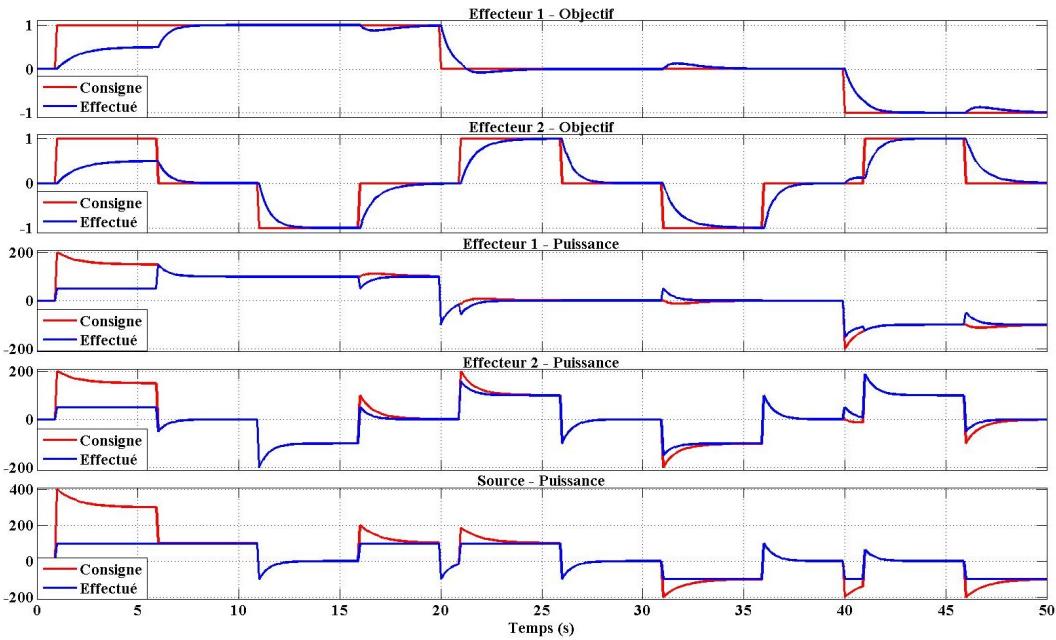


FIGURE 4.18 – Exemple 2 : allocation des ressources réalisée par le Distributeur – 2.

#### 4.2.2.2 Allocation de besoin dans un sous-système multi-sources/mono-consommateur

Dans cette section le problème d'allocation du besoin dans un sous-système multi-sources/mono-consommateur est abordé ayant comme objectif la proposition d'un algorithme de gestion pour le Distributeur – 1 (Figure 4.15). Afin de réaliser cette allocation, la connaissance des sources est nécessaire. Cette connaissance peut s'avérer utile soit pour prioriser l'une des sources sous condition de son état de charge, soit pour utiliser une source pour compléter la puissance fournie par une autre source en régime transitoire (cette fonctionnalité a été expliquée en Section 4.1.1.2). Cela rend l'algorithme heuristique. Dans le cas d'un véhicule hybride, cette priorisation sera définie pour la source d'énergie électrique. De même, une fonction de coût sera implémentée dans les éléments de stockage ou les sources du modèle et le distributeur changera la priorité pour la source « *la moins chère* » (la source avec le coût le plus petit).

L'allocation de besoin réalisée par le Distributeur – 1 est donnée dans la Figure 4.19. Ici, la formulation du problème d'optimisation est :

$$\begin{aligned} \min_{b_k(n)} & \sum_{k=1}^{n_s} \beta_k C_k(n) \\ \text{sujet à } & \sum_{k=1}^{n_s} u_k(n) = u(n) \\ & \sum_{k=1}^{n_s} b_k(n) = b(n) \end{aligned} \quad (4.40)$$

avec  $\beta_k$  des pondérations définissant l'allocation des besoins aux sources.

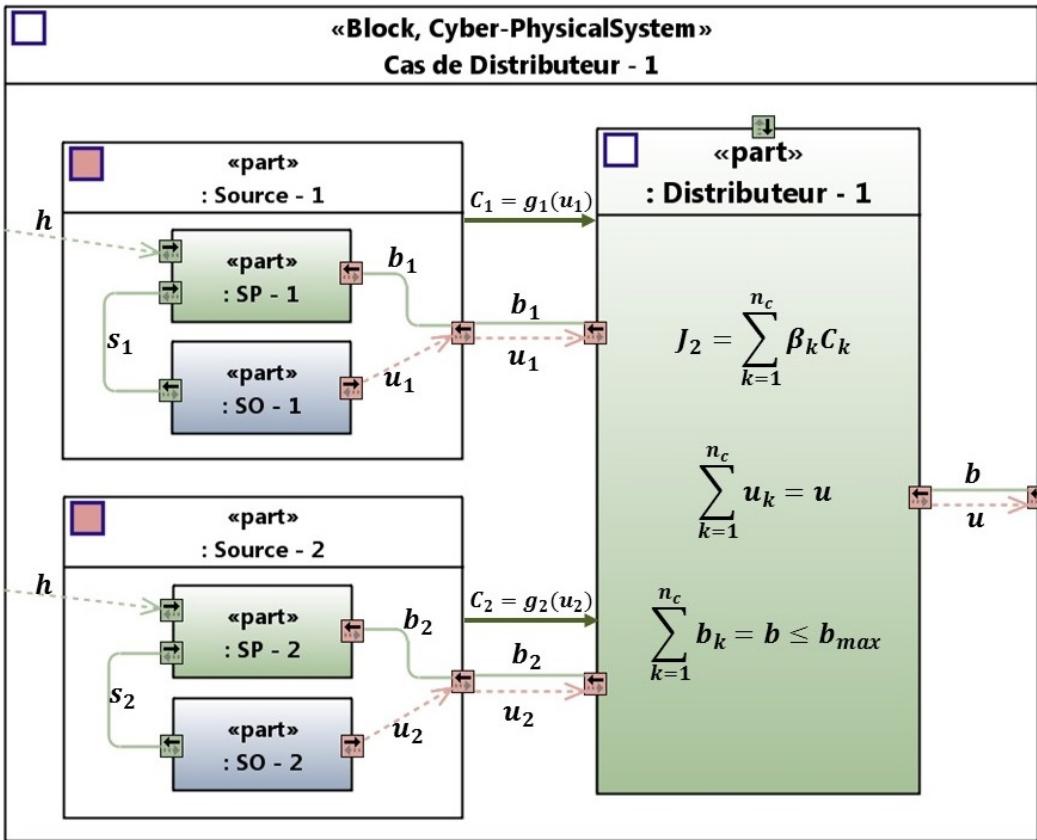
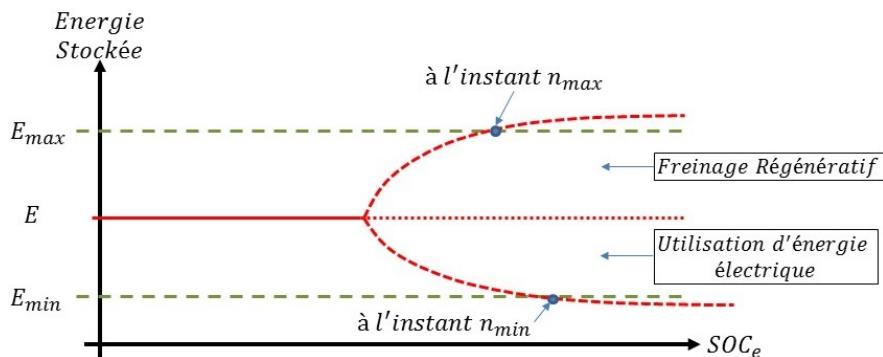


FIGURE 4.19 – Représentation détaillée du problème d'optimisation en Distributeur – 1.

Comme déjà précisé, la connaissance des sources d'énergie est nécessaire pour la répartition des besoins. Pour un véhicule hybride, la puissance maximale disponible de la chaîne de traction électrique, sur une durée  $h$ , doit être définie afin de réaliser la répartition des besoins. Cela peut être calculée par l'estimation de l'état de charge et à partir de l'énergie maximale du stockage électrique.

La puissance et l'énergie stockée de l'élément doivent respecter respectivement les bornes inférieures  $P_{min} (< 0)$ ,  $E_{min} (> 0)$  et supérieures  $P_{max} (> 0)$  et  $E_{max}$  :

$$P_{min} < P < P_{max} \quad \text{et} \quad E_{min} < E < E_{max} \quad (4.41)$$

FIGURE 4.20 – Evolution d'énergie stockée selon l'état de charge du stockage électrique ( $SOC_e$ ).

Si l'on suppose que  $P_{min}$  ( $P_{max}$ ) est appliquée sur un horizon futur  $h$ , l'évolution de l'énergie stockée a une forme exponentielle (réponse d'un système du premier ordre) (Figure 4.21).

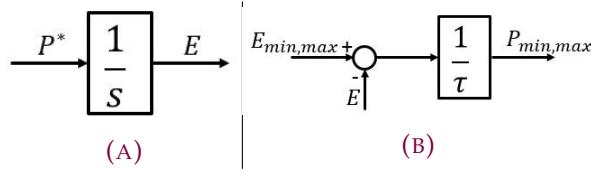


FIGURE 4.21 – Représentation de (a) calcul d'énergie de stockage, (b) régulateur de puissance.

Où la constante de temps  $\tau$  caractérise le temps de réponse de la chaîne de traction. A l'instant  $n$ , on cherche à calculer la puissance à fournir,  $P(n)$ , et à prédire la puissance maximale (ou minimale) sur l'horizon de prédition,  $P_{max}(n+h)$  ( $P_{min}(n+h)$ ).

On suppose qu'on applique sur l'horizon futur, la puissance demandée  $P^*$  tant qu'elle est inférieure (supérieure) à la puissance  $P_{max}$  ( $P_{min}$ ). On note avec  $n_{max}$  l'instant où  $P^*$  vaut  $P_{max}$ . A cet instant, la puissance demandée vérifie la relation :

$$P^* = P_{max}(n + n_{max}) = \frac{1}{\tau} (E_{max} - E(n + n_{max})) \quad (4.42)$$

Lorsqu'on applique  $P^*$  dans l'intervalle  $[n, n + n_{max}]$ , l'énergie obtenue à la fin de l'horizon est :

$$E(n + n_{max}) = E(n) + n_{max} T P^* \quad (4.43)$$

où  $T$  est la période de commande. On a donc :

$$n_{max} T = \frac{E_{max} - E(n)}{P^*} - \tau \quad (4.44)$$

Si l'instant  $h$  est inférieur à  $n_{max}$ , il n'y a pas de limitation de la puissance fournie (qui est égale à la demande  $P^*$ ) et la puissance maximale prédictive est  $P_{max}(n+h) = \frac{1}{\tau} (E_{max} - E(n+h))$  avec  $E(n+h) = E(n) + h T P^*$ . D'où :

$$P_{max}(n+h) = \frac{1}{\tau} (E_{max} - E(n) - h T P^*) \quad (4.45)$$

Si l'instant  $h$  est supérieur à  $n_{max}$ , en considérant l'équation 4.42 et la réponse exponentielle :

$$E_{max} - E(n+h) = \alpha^{(h-n_{max})T} (E_{max} - E(n+n_{max})) \quad (4.46)$$

Donc à partir des équations 4.42, 4.43 et 4.46 :

$$P_{max}(n+h) = \alpha^{(h-n_{max})T} P^* \quad (4.47)$$

où  $\alpha$  est l'incrément de la réponse de premier ordre. Alors, la prédiction de la puissance maximale est faite avec la relation :

$$P_{max}(n+h) = e^{-\frac{(h-n_{max})T}{\tau}} P^* \quad (4.48)$$

En utilisant ce calcul de la puissance maximale disponible de la chaîne de traction électrique (stockage électrique), deux fonctionnements différents sont proposés pour la répartition des besoins :

1. Fonctionnement « *boost* »,
2. Fonctionnement « *partage de besoin par priorisation* ».

#### 4.2.2.2.1 Fonctionnement « *boost* »

Ce fonctionnement est adapté à un système ayant des sources avec des dynamiques et des limitations différentes (par exemple, une source lente de grande capacité et une source rapide de capacité limitée). C'est le cas du véhicule hybride avec la chaîne de traction thermique (la source de carburant, la Source – 2 dans la Figure 4.19) et la chaîne de traction électrique (le stockage électrique, la Source – 1 dans la Figure 4.19). Ce fonctionnement utilise une principe similaire à celui de la décomposition de la puissance de charge [84, 85] illustrée dans la Figure 4.9.

Si on se limite à la source de grande capacité (cas du carburant) mais avec une dynamique relativement lente, le besoin est assuré après un certain délai lié à la dynamique de la source.

La fonction de coût ( $C$ ) dans l'équation 4.40 peut être formulée en s'inspirant de la commande prédictive (équation 4.28) :

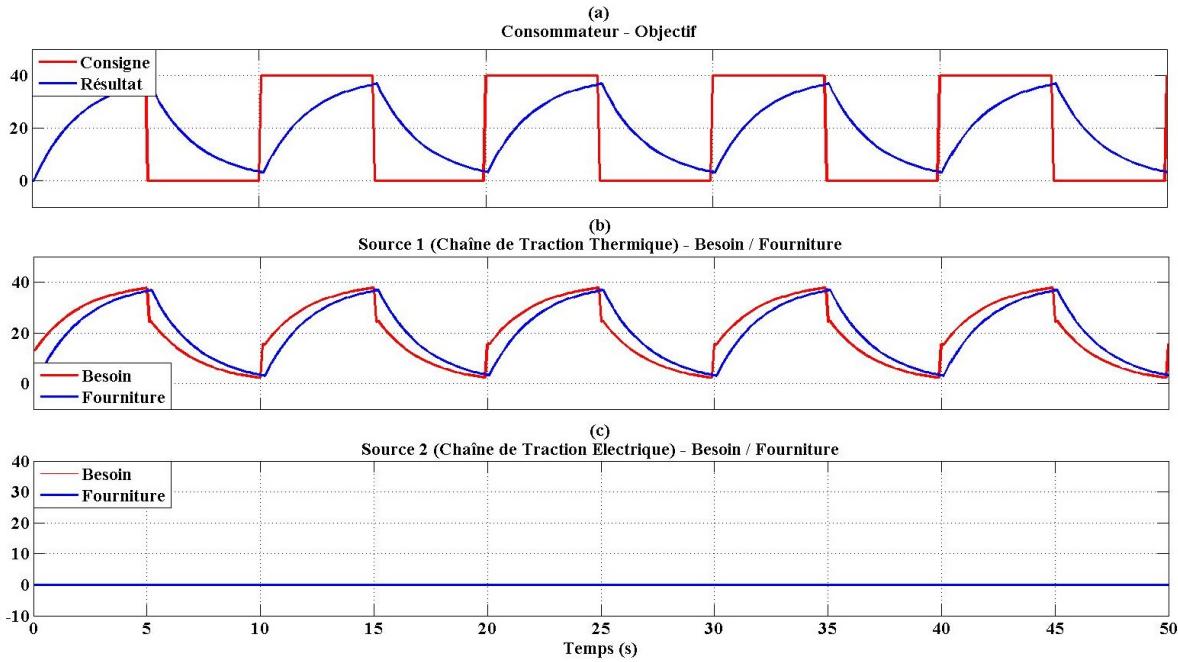
$$C = \left( b(n+h) - b_1(n+h) \right)^2 \quad (4.49)$$

où  $h$  est le point de prédiction,  $b$  le besoin et  $b_1$  la puissance à fournir par la Source – 1 sur l'horizon de prédiction.

En supposant une prédiction plate (constante dans le futur) :

$$b(n+h) = b(n) \quad (4.50)$$

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement « *boost* », on prend l'exemple d'un système avec deux sources et un consommateur, où une source représente la chaîne de traction thermique et l'autre regroupe la chaîne de traction électrique. Dans cet exemple, la chaîne de traction thermique est la seule source d'énergie utilisée afin de satisfaire la mission demandée (la courbe rouge dans la Figure 4.22a). Les résultats de simulation obtenus sont illustrés dans la Figure 4.22.



**FIGURE 4.22** – Résultats de simulation avec la chaîne de traction thermique pour la traction du VEH (fonctionnement « boost »).

On remarque que, malgré la prédiction, la source ne permet pas d'avoir une réponse rapide. Il peut donc être intéressant, dans le cas d'une hybridation, d'utiliser la source rapide pour compenser la dynamique de la source lente. C'est la méthode dite « boost ».

L'objectif de la méthode « boost » est de compenser la dynamique de la source lente (Source – 1) par une action sur la source rapide (Source – 2).

Le coût exprimé à l'instant courant avec :

$$C = \left( b(n) - b_t(n) \right)^2 \quad (4.51)$$

où  $b_t$  est la consigne totale à allouer sur les deux sources :

$$b_t(n) = b_1(n) + b_2(n) \quad (4.52)$$

Le besoin alloué à la Source – 1 est conservé :

$$b_1(n+h) = b(n+h) \cong b(n) \quad (4.53)$$

Le besoin alloué à la Source – 2 est fonction de la différence entre le besoin et la fourniture de la Source – 1 :

$$b_2(n) = \min \left\{ P_{2,max}(n+h), \gamma(b(n) - u_1(n)) \right\} \quad (4.54)$$

où  $u_1$  est la fourniture de la Source – 1 et  $\gamma$  le coefficient de compensation compris entre 0 (pas de compensation) et 1 (compensation maximale).

Pour illustrer cette répartition, on reprend l'exemple précédent d'un système avec deux sources et un consommateur. Les résultats obtenus pour une compensation maximale ( $\gamma = 1$ ) sont illustrés dans la Figure 4.23. On note que la sortie du modèle satisfait la mission demandée (Figure 4.23a). L'utilisation de la chaîne de traction électrique est tracée par la Figure 4.23c.

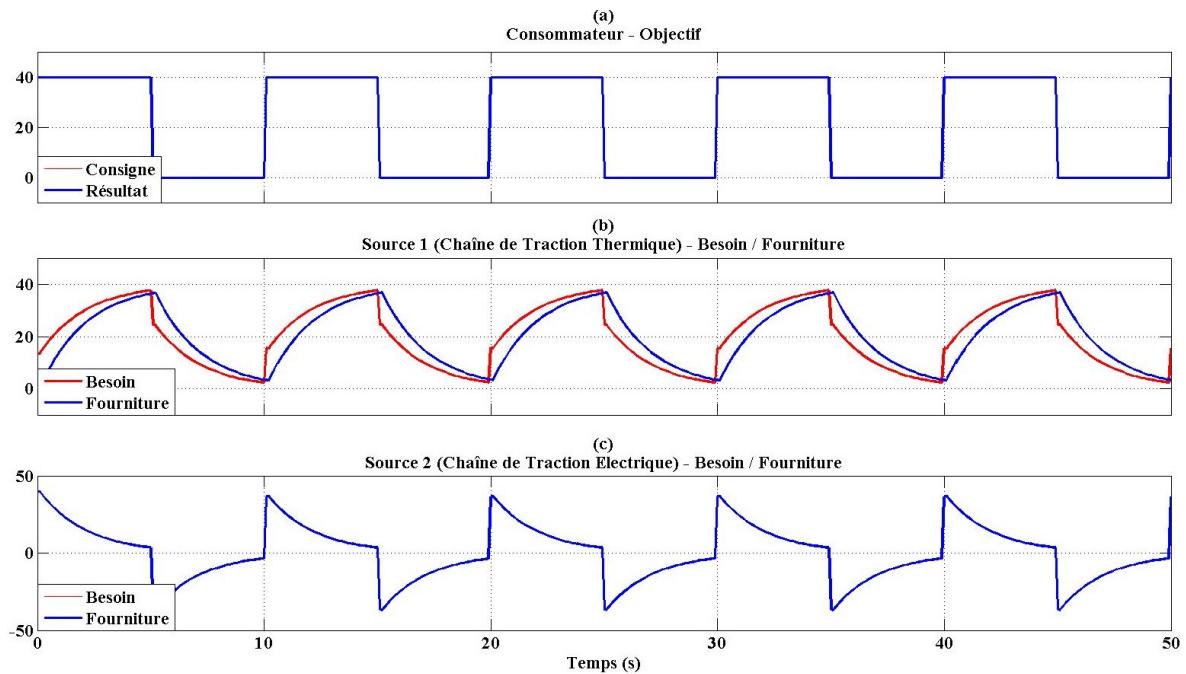
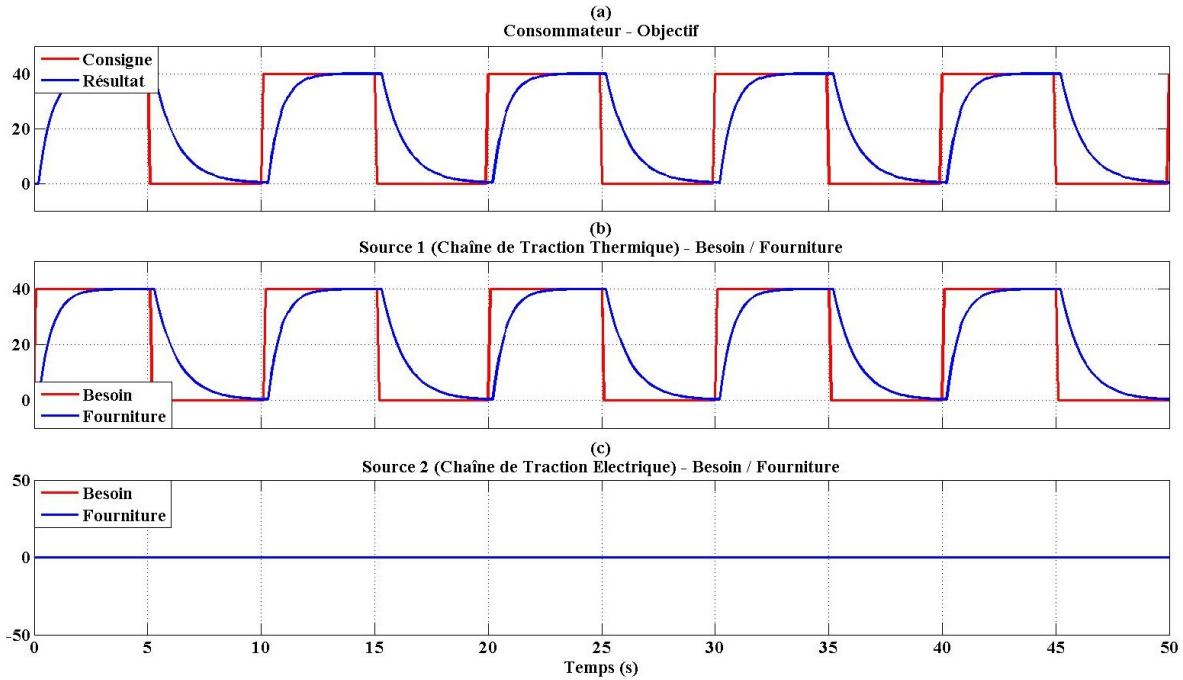


FIGURE 4.23 – Résultats de simulation avec la chaîne de traction thermique et la chaîne de traction électrique pour la traction du VEH (fonctionnement boost).

#### 4.2.2.2 Fonctionnement « partage de besoin par priorisation »

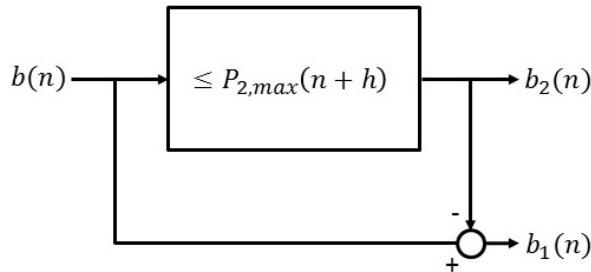
Ce fonctionnement alloue les besoins aux sources en utilisant l'estimation de la puissance maximale de la chaîne de traction électrique (le stockage électrique) effectuée précédemment par l'équation 4.48.

Le même exemple (système avec deux sources et un consommateur) est repris pour illustrer ce fonctionnement. Dans un premier temps, seulement la chaîne de traction thermique est sollicitée. Lorsque la chaîne de traction électrique n'étant pas utilisée, la priorité est accordée à la seule source disponible et le besoin total est alloué entièrement à la Source – 1. Les résultats de simulation sont présentés dans la Figure 4.24.



**FIGURE 4.24 –** Résultats de simulation avec la chaîne de traction thermique pour la traction d'un VEH (fonctionnement « partage de besoin par priorisation »).

Pour le deuxième cas, la chaîne de traction électrique est ainsi prise en considération afin de satisfaire la mission demandée. Dans ce cas, la répartition est effectuée par l'utilisation prioritaire de la chaîne de traction électrique à la chaîne de traction thermique.



**FIGURE 4.25 –** Allocation de besoin en fonctionnement « partage de besoin par priorisation ».

Cette allocation est illustrée par la **Figure 4.25** : le besoin est alloué à la Source – 2, en respectant la contrainte  $P_{2,max}$  ; le reste est alloué à la Source – 1.

La Source - 2 étant prioritaire, le besoin alloué  $b_2(n)$  s'écrit :

$$b_2(n) = \max \left\{ b(n), P_{2,max}(n + h) \right\} \quad (4.55)$$

Si la demande totale en puissance  $b(n)$  est inférieure à la prédition de la puissance maximale que la Source - 2 peut fournir, alors le besoin alloué à cette source est :

$$b_2(n) = b(n) \quad \text{et} \quad b_1(n) = 0 \quad (4.56)$$

Si le besoin alloué à la Source – 2 est limitée ( $P_{2,max}(n + h) < b(n)$ ), alors :

$$b_2(n) = P_{2,max}(n + h) \quad (4.57)$$

$$b_1(n) = b(n) - P_{2,max}(n + h) \quad (4.58)$$

Cette répartition de besoin est appliquée au même exemple d'un sous-système multi-sources/mono-consommateur et les résultats obtenus sont illustrés dans la Figure 4.26 :

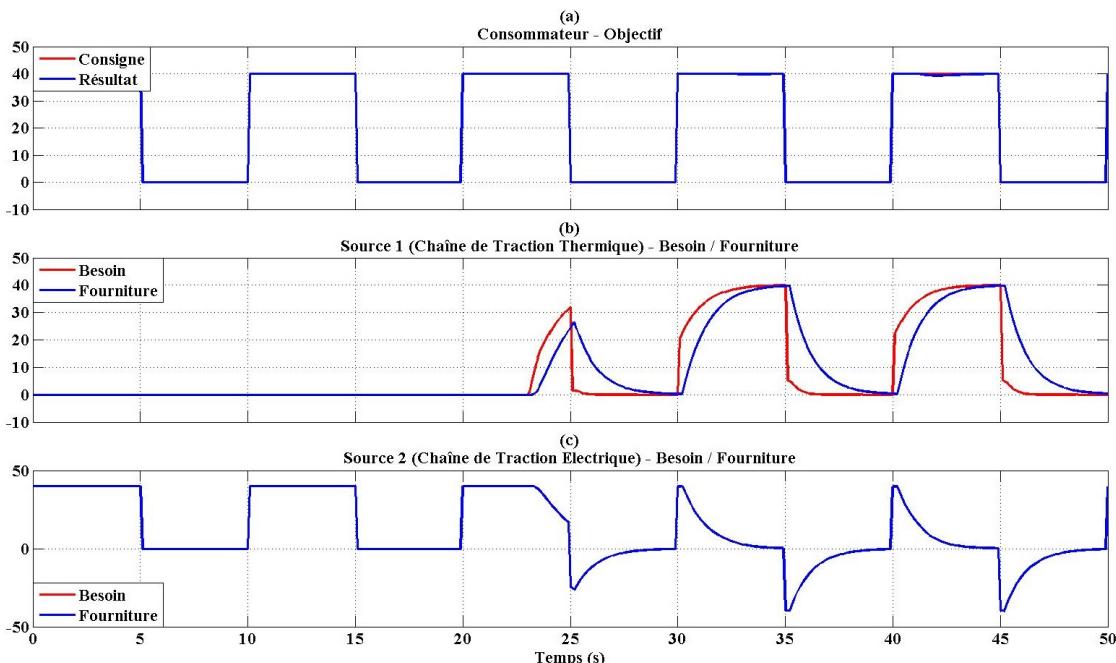


FIGURE 4.26 – Résultats de simulation avec la chaîne de traction thermique et la chaîne de traction électrique pour la traction du VEH (fonctionnement « partage de besoin par priorisation »).

Ici, la priorité est accordée à la chaîne de traction électrique. La chaîne de traction thermique commence à recevoir du besoin dans l'intervalle [20, 25s], où le  $SOC_e$  de la chaîne de traction électrique n'est plus suffisant pour fournir l'énergie nécessaire au consommateur. Après cet instant, le besoin est réparti entre les deux sources afin de fournir la puissance demandée pour satisfaire la mission :

- la chaîne de traction électrique reçoit un besoin égal à la puissance maximale calculée dans l'horizon de prédiction,
- la chaîne de traction thermique reçoit le reste de besoin total.

## 4.3 Conclusions partielles

Ce chapitre est composé de deux sections qui introduisent l'architecture de commande en détaillant l'adaptation du modèle fonctionnel en vue de l'interconnexion avec le modèle

multi-physiques, et les stratégies de gestion de ressources pour une allocation optimisée dans un système multi-sources/multi-consommateurs représenté au niveau fonctionnel.

Dans la première section, l'architecture de commande est introduite en utilisant les niveaux de modélisation. Ensuite, l'identification d'éléments fonctionnels et des propriétés associées est abordée à partir des données fournies par les constructeurs pour des composants physiques. Un exemple est présenté pour un groupe de traction thermique. Le paramétrage des éléments fonctionnels est une étape essentielle afin d'obtenir des résultats pertinents et exploitables au niveau multi-physiques, étant donné que le modèle fonctionnel est couplé au modèle multi-physiques pour assurer la gestion de ressources en tant que superviseur. Le couplage est réalisable grâce à une interface qui transforme la nature des flux d'un niveau de représentation à un autre. Cette interface utilise les références du modèle fonctionnel et les mesures ou les estimations du modèle multi-physiques et calcule la référence physique et l'estimation de puissance. Avec cette démarche, la répartition de puissance décidée par le modèle fonctionnel, est appliquée au modèle multi-physiques.

La deuxième section illustre deux approches d'optimisation énergétique fondée sur le principe de la commande prédictive fonctionnelle (PFC) appliqué au niveau fonctionnel. Dans ces travaux, le choix a été fait d'utiliser des modèles en puissance en raison de facilité de manipulation de ces modèles. L'approche PFC a été adaptée afin réaliser la répartition des besoins et l'allocation des puissances fournies pour un système multi-sources/multi-consommateurs. L'intérêt de cette approche consiste dans l'utilisation des informations disponibles qu'au niveau des distributeurs, transmises par les différents éléments connectés. Ceci aide à garder la modularité du modèle fonctionnel qui est très importante dans le processus de conception et validation du système complexe ainsi que dans la construction de son architecture de commande. Afin de faciliter la répartition des besoins et des ressources entre les consommateurs et les sources (ou stockages) du système, le problème de gestion d'énergie est divisé en deux sous-problèmes : l'allocation de la puissance fournie par un distributeur mono-source/multi-consommateurs et la répartition des besoins pour un distributeur multi-sources/mono-consommateur. Pour la répartition des besoins, deux fonctionnements sont proposés : le fonctionnement « boost » et le fonctionnement « partage de besoin par priorisation ».

Les modes de fonctionnements pour la répartition de besoin proposés seront choisis par le conducteur ou le gestionnaire décisionnel (le superviseur du modèle fonctionnel). Cependant, le meilleur choix de la stratégie de répartition de besoin peut différer par rapport aux conditions de fonctionnement prédéfinies selon le cas d'usage, le type de conduite, les indicateurs de performance (consommation de carburant, nombre de cycle d'allumage/arrêt, etc.). Une analyse plus détaillée et une comparaison des stratégies appliquées à la gestion de ressources d'un véhicule électrique hybride est effectuée dans le [Chapitre 5](#), selon le cas d'usage et différentes conditions de fonctionnement.

## Chapitre 5

# Application à l'optimisation énergétique d'un VEH

Les véhicules hybrides sont des systèmes multi-sources/multi-consommateurs complexes. Les sources de puissance de ces véhicules sont les chaînes de traction électrique et thermique. Dans le cas général, un moteur thermique (ICE) et une ou plusieurs machines électriques existent afin de fournir la puissance nécessaire aux consommateurs des VEHs (auxiliaires électriques, déplacement, confort thermique etc.). De plus, le moteur thermique est alimenté par le carburant, et la machine électrique est alimentée par la batterie ou par le moteur thermique selon l'architecture de la chaîne de traction du véhicule. Ces composants forment le système du véhicule en permettant des interconnexions possibles pour satisfaire des objectifs définis par les consommateurs (missions du véhicule : par exemple la mobilité ou le confort thermique).

Dans le chapitre précédent, la problématique d'optimisation énergétique d'un VEH a été formalisée en prenant en compte l'utilisation de la modélisation fonctionnelle. Ceci est d'usage quand le véhicule a une nouvelle tâche ou dans les cas de reconfiguration de l'architecture de la chaîne de traction par exemple la modification de l'architecture. Pour valider la méthodologie proposée et évaluer l'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie utilisé, un cas d'étude pour chaque architecture (hybride parallèle et hybride rechargeable dans ces travaux) sera considéré dans ce chapitre.

Les approches de modélisation développées au cours de ces travaux ont permis de définir et réaliser une librairie spécialisée pour la modélisation fonctionnelle. Elles ont conduit également au développement d'un démonstrateur orienté pour les véhicules hybrides pour la création des modèles des VEHs. Cette librairie, « *PhiEMI* » a été réalisée en utilisant l'environnement Matlab/Simulink et intégrée dans l'outil « *PhiSim* » (*PhiSim* est un environnement de modélisation et simulation pour les systèmes multi-physiques). Cet outil permet la création de modèles avec leur commande (leur commande locale associée à une commande générale,

c'est-à-dire le superviseur) dans un environnement multiport. Dans cet environnement, plusieurs librairies multi-domaines personnalisables sont disponibles : mécanique, électrique, thermique, commande, etc. Ces librairies sont fondées sur la méthodologie Bond-Graph pour la définition des flux énergétiques standardisés et l'implémentation de cette méthodologie dans un environnement de type schémas bloc (PhiGraph) pour l'utilisation avec Simulink [17]. D'autre part, PhiEMI contient les éléments introduits dans le [Chapitre 3](#), avec des éléments spécialisés comme par exemple le freinage mécanique.

Dans ce chapitre, les concepts introduits dans les chapitres précédents par la modélisation d'un VEH avec toute la boucle de conception-évaluation sont illustrés. La méthodologie utilisée permettra de faire automatiquement le lien entre les exigences, la définition de l'architecture, la simulation et enfin de conclure sur la validité et la pertinence des modèles. Puis, la démarche permettant d'obtenir qualitativement mais aussi quantitativement la représentation fonctionnelle à partir des ensembles multi-physiques ou technologiques sera montrée [105]. La définition d'un cas d'étude pour un VEH en incluant les définitions des gammes des deux VEHs ainsi que leurs architectures sera détaillée. Ensuite, les modèles fonctionnels et multi-physiques de ces VEHs pour la simulation avec le cas d'étude défini seront présentés. Ceci sera suivi par la comparaison des résultats de simulations et la validation des modèles construits dans les deux niveaux de modélisation. Enfin, l'interconnexion des modèles fonctionnel et multi-physiques pour les VEHs sera présentée avec des exemples d'interfaces d'interconnexion.

Cette démarche conduit à un modèle de simulation permettant une évaluation et une validation plus détaillées du système dans sa globalité. Une autre utilisation de cette approche est d'utiliser le modèle fonctionnel comme le Gestionnaire Globale des Ressources (GGR) du système. Ceci est illustré avec deux méthodes de gestion d'énergie : une stratégie de gestion d'énergie fondée sur des priorités (et des règles) et la stratégie de gestion d'énergie fondée sur le principe de la commande prédictive fonctionnelle (PFC) proposée en [Chapitre 4](#) pour l'allocation des besoins et l'allocation de la puissance fournie. La première approche, stratégie de gestion d'énergie fondée sur des priorités et des règles, contient les priorités choisies par le gestionnaire décisionnel pour l'allocation de besoin ou de la puissance fournie par les distributeurs en respectant les limitations des éléments fonctionnels. En revanche, la stratégie fondée sur PFC utilise la solution d'un problème d'optimisation pour gérer la répartition de puissance fournie entre les consommateurs et une solution sous-optimale pour gérer la répartition des besoins entre les sources (ou les stockages), qui est implémentée avec deux fonctionnements différents. Enfin, une comparaison entre ces trois approches (stratégie fondée sur des règles, stratégie fondée sur PFC avec fonctionnement « boost » et stratégie fondée sur PFC avec fonctionnement de « partage des besoins par priorisation ») selon leurs indicateurs de performances et leurs exploitations sera effectuée et commentée.

## 5.1 Définition d'un cas d'étude pour un VEH

Un VEH consiste en un moteur thermique et une ou plusieurs machines électriques pour l'utilisation en propulsion du véhicule et les autres missions à faire (par exemple climatisation et les auxiliaires électriques). L'énergie thermique pour alimenter le moteur thermique est fournie par le carburant, contenu dans le réservoir, et l'énergie électrique pour alimenter les machines électriques en mode moteur est fournie par la batterie. Selon le type de véhicule, la batterie peut être rechargée par la chaîne de traction thermique ou par le freinage régénératif ou par le réseau électrique pour les VEH rechargeables (PHEV). En revanche, le réservoir de carburant peut seulement être rechargé dans une station-service.

Afin de pouvoir proposer une définition d'un cas d'étude, les critères d'évaluation doivent être déterminés. Ces critères sont caractérisés par les missions du véhicule et les exigences. Dans le contexte de cette thèse, les missions « *mobilité* », « *confort thermique* » et « *auxiliaires électriques* » seront pris en compte, mais la priorité des évaluations sera donnée à la mobilité et confort thermique du véhicule. Les critères de mobilité d'un VEH sont : *i*) la consommation de carburant (ce critère contient aussi les émissions de CO<sub>2</sub> car elles sont liées directement à la consommation de carburant) ( $Conso_f$ ), *ii*) le nombre de cycles allumage/arrêt du moteur thermique ( $n_{mth}$ ) et *iii*) la variation de l'état de charge du stockage électrique ( $\Delta SOC_e$ ). Cet indicateur de performance conduit au calcul de la consommation de carburant corrigée ( $Conso_{cor}$ ). La relation pour calculer l'indicateur ( $Conso_{cor}$ ) est détaillé dans les prochaines sections de ce chapitre. D'autre part, pour la mission « *confort thermique* », le critère est la température de la cabine du véhicule. Le besoin d'énergie du confort thermique peut être obtenu non seulement par le système électrique mais par l'élément transformateur fuel à mécanique (F-à-M). Cela amène au choix des consommateurs du modèle : les dynamiques du véhicule, le confort thermique (ceci est une mission du véhicule, ici il est considéré comme un consommateur mécanique correspondant au compresseur du système de climatisation) et les auxiliaires électriques. Ces consommateurs seront les effecteurs du modèle fonctionnel, le calcul de besoin du système étant géré par ces éléments.

L'évaluation des critères d'un VEH pour la mission « *mobilité* » exige des cas d'usage différents. Par exemple, pour la consommation de carburant les constructeurs automobiles utilisent les cycles de conduite comme le NEDC pour les normes [128, 129] ou le WLTC. En revanche, pour évaluer les performances du véhicule, ces cycles ne seront pas applicables car les accélérations et les vitesses maximales sont prédéfinies par le cycle. En conséquence, pour évaluer les performances du véhicule, le cas d'usage sera une demande d'accélération maximale. Selon les résultats obtenus, ce cas d'usage sera également utilisé afin d'aboutir à un paramétrage plus précis du véhicule. Le cas d'usage du cycle NEDC ou du cycle WLTC (détailés en [Chapitre 2](#)) sera utilisé pour une analyse détaillée de la consommation de carburant et les autonomies électrique et hybride des véhicules. De plus, ces cycles peuvent être séparée en plusieurs segments pour affiner l'analyse des résultats de simulation. Les segments à observer sont :

- Pour le NEDC :

- Urbain (partie ECE15 de NEDC, entre 0 s et 800 s),
- Autoroute (partie EUDC de NEDC, entre 800 s et 1200 s).
- Pour le WLTC :
  - Urbain (entre 0 s et 600 s),
  - Périurbain (entre 600 s et 1450 s),
  - Autoroute (entre 1450 s et 1800 s).

Les effecteurs complémentaires et les conditions de fonctionnement suivants sont considérés :

- Le premier consommateur concerne le confort thermique. Il a été choisi dans le cas d'usage de façon à régler la température de la cabine du véhicule à  $20^{\circ}\text{C}$ , pour différentes valeurs de la température extérieure ( $20^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$  et  $0^{\circ}\text{C}$ ) et une température initiale de la cabine à  $20^{\circ}\text{C}$ . Le confort thermique étant un consommateur cela peut créer un besoin d'énergie constant.
- Pour le deuxième consommateur, les auxiliaires électriques, la puissance est fixée dans l'intervalle  $[1 \text{ kW} ; 3 \text{ kW}]$  et elle représente des charges comme la climatisation (correspondant ici à la partie consommateur électrique), l'autoradio, etc.
- Pour satisfaire les missions des effecteurs confort thermique et auxiliaire électrique, les conditions de fonctionnement suivantes sont considérées  $[P_{aux}(\text{kW}), \Delta T_{cth}({}^{\circ}\text{C})]$ :

$$\begin{array}{lll} [1, 20] & [2, 20] & [3, 20] \\ [1, 10] & [2, 10] & [3, 10] \\ [1, 0] & [2, 0] & [3, 0] \end{array}$$

- Pour les analyses préliminaires, un cas nominal à  $[P_{aux} = 2\text{kW}, \Delta T_{cth} = 10{}^{\circ}\text{C}]$  est pris en considération, où  $P_{aux}$  correspond à la puissance des auxiliaires électriques (en kW) et  $\Delta T_{cth}$  à l'écart de température entre la cabine et l'extérieur (en degrés Celsius).

Une autre propriété à ajouter dans les cas d'usage correspond aux limites de fonctionnement des différents éléments. Par exemple, l'utilisation des batteries dans les véhicules est limitée par leur état de charge afin de protéger la batterie des problèmes détaillés dans le [Chapitre 2](#). Le cas général est donc de conserver l'état de charge de la batterie entre 30% et 80%. Cela guide le choix du paramétrage nominal (55%) et implique de conserver l'état de charge au même ordre de grandeur que l'état de charge initial. Pour différentes valeurs de l'état de charge initial (40%, 55% et 70%), les simulations seront répétées pour toutes les conditions de fonctionnement  $[P_{aux} = 2\text{kW}, \Delta T_{cth} = 10{}^{\circ}\text{C}]$  précisées ci-dessus et pour les différentes stratégies explorées dans le [Chapitre 4](#).

De plus, les limitations décidées par les constructeurs (comme la limitation de la vitesse maximale en conduite électrique seule) seront prises en compte pour les cas d'usage pour une validation rigoureuse de la méthodologie. Cette propriété est essentielle pour la validation des modèles car les critères donnés par les constructeurs [\[130, 131\]](#) seront comparés avec les

résultats des simulations afin d'avoir un critère de comparaison suffisamment proche du niveau de performance énoncé par les constructeurs automobiles.

Dans le chapitre précédent, des stratégies de gestion d'énergie par modélisation fonctionnelle ont été illustrées dans l'objectif de l'amélioration de la consommation de carburant par répartition d'énergie [53]. Pour l'évaluation de ce critère, les cycles NEDC et WLTC (Figure 2.18) seront utilisés afin de définir les consignes de vitesse des véhicules. Les états de charge des batteries des véhicules seront limités entre 30% et 80%. En revanche, le réservoir de carburant sera considéré comme étant pleins.

### 5.1.1 Définition de la gamme et l'architecture d'un VEH

Les différentes architectures et gammes des VEHs ont été détaillées dans le [Chapitre 2](#). A partir de ces données, deux véhicules sont choisis pour l'évaluation et la validation de la méthodologie, et la formulation du problème d'optimisation présentées dans les [Chapitres 3](#) et [4](#) : « Toyota Prius 4 » et « Volvo V60 Twin Engine » [130, 131].

Ainsi, un VEH avec une architecture de type « Complexe VEH » (cette architecture a été précisée dans le [Chapitre 2](#)) et un autre VEH avec une architecture rechargeable seront étudiés. Les raisons guidant ces choix sont :

1. L'importance de la « *gestion des ressources* » (définie au [Chapitre 4](#)). Pour les architectures de type « Série VEHs », la répartition d'énergie entre différents chaînes de traction peut être considérée moins importante car la traction du véhicule est assurée seulement par la machine électrique et la fonction du moteur thermique est de recharger la batterie.
2. La différence de capacité des batteries. Les Plug-in VEHs ont une batterie de capacité plus importante que les autres types de VEHs car il est possible de les charger par le réseau électrique, en conséquence l'autonomie électrique est très importante. D'autre part, les VEHs qui n'ont pas cette fonctionnalité de recharge par le réseau électrique, proposent une recharge juste par le moteur thermique ou le freinage régénératif.

Ces propriétés ont mené les travaux à privilégier la gestion d'énergie par le partage de puissance en prenant en compte les différents types de véhicules. La stratégie de la gestion d'énergie peut différer par la variation de la capacité de batterie, cela est aussi un aspect important pour l'optimisation énergétique globale des VEHs. Dans la [Tableau 5.1](#), les propriétés utilisées dans ces travaux sont illustrées en retenant seulement les données accessibles publiquement. Le paramétrage du modèle fonctionnel peut être fait par ces données, mais pour le paramétrage du modèle multi-physiques, des estimations et des valeurs heuristiques seront utilisées.

TABLEAU 5.1 – Paramètres des VEHs choisis [130], [131]

Véhicule	VEH – 1 (Toyota Prius)	VEH – 2 (Volvo V60)
<b>Propriétés et Critères</b>		
<b>Moteurs</b>		
Puissance maximale du moteur thermique (kW à tr/mn)	72 à 5200	162 à 4000
Couple maximal du moteur thermique (Nm à tr/mn)	142 à 3600	440 à 1500
Puissance maximale de la machine électrique (kW)	53	50
Couple maximal de la machine électrique (Nm)	163	200
Puissance combinée (hybride) (kW)	90	162
<b>Stockages</b>		
Capacité de réservoir de carburant (l)	43	45
Capacité de la batterie (Ah - kWh)	6,5 - 1,3 (NiMH)	28 - 11,2 (Li-ion)
Tension nominale de la batterie (V)	202	400
<b>Mécaniques</b>		
Masse à vide (kg)	1400	1905
SCx	0,576	0,661
Rayon de la roue (mm)	312,42	334,01
<b>Performances</b>		
Accélération de 0 à 100 km/h (s)	10,6	6,0
Vitesse maximale (Electrique/Hybride) (km/h)	110 / 180	125 / 230
Autonomie électrique (km)	4	50
Consommation de carburant (l/100km)	3,3	1,8

## 5.2 Modélisation et simulation du VEH

Afin de créer les modèles des VEHs pour les simulations, les outils PhiSim (pour le modèle multi-physiques) et PhiEMI (pour le modèle fonctionnel) sont utilisés. Pour les modèles fonctionnels, le choix des éléments est formé avec l'architecture donnée. Le contexte de la modélisation fonctionnelle est similaire pour tous les véhicules hybrides. Ce contexte

est illustré en Figure 5.1.

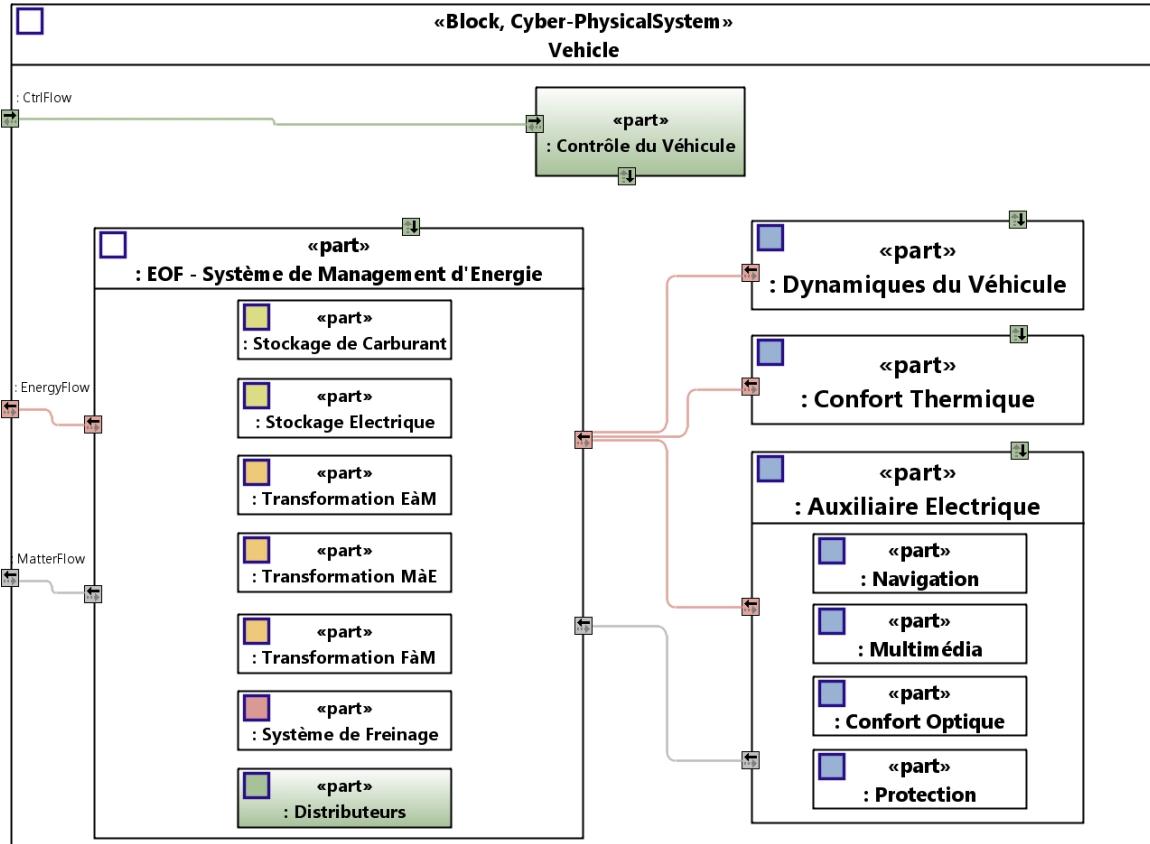


FIGURE 5.1 – Modèle fonctionnel de contexte du VEH.

La direction des flux est choisie dans le même sens que le besoin d'énergie ou de matière. Les significations et les représentations des éléments sont :

- **Stockage de Carburant** : Réservoir de carburant,
- **Stockage Electrique** : Batterie et convertisseur,
- **Transformateur E-à-M** : Transformation d'énergie électrique à énergie mécanique ; elle représente la chaîne de traction électrique qui contient l'onduleur, la machine électrique et le réducteur,
- **Transformateur M-à-E** : Transformation d'énergie mécanique à énergie électrique ; elle représente le groupe générateur qui contient le convertisseur AC/DC, la machine électrique (alternateur) et le réducteur,
- **Transformateur F-à-M** : Transformation d'énergie de carburant (énergie thermique) à énergie mécanique ; elle représente la chaîne de traction thermique qui contient le moteur thermique et la boîte de vitesse avec leur pilotage,
- **Système de Freinage** : sa fonctionnalité correspond à un comportement de source de puissance mécanique,
- **Distributeurs** : Ce sont les éléments qui permettent l'allocation du besoin et de la

fourniture d'énergie et de matière. Ils représentent la transmission mécanique ou les convertisseurs,

- Dynamiques du Véhicule : Elles représentent le modèle du véhicule qui a été introduit dans le [Chapitre 2](#). C'est l'**effecteur** principal du système, le calcul de besoin d'énergie est initialisé par cet élément,
- Confort Thermique : Il représente le confort thermique dans la cabine du véhicule comme un consommateur d'énergie mécanique (l'aspect thermique est négligé, c'est-à-dire que cet élément est assimilé à un consommateur purement mécanique, comme le compresseur par exemple). C'est le deuxième **effecteur** lié au distributeur mécanique : mouvement et confort thermique du système (cet effecteur est détaillé dans les prochaines sections de ce chapitre),
- Auxiliaires Electriques : Il représente tous les consommateurs d'énergie électrique dans un véhicule (climatisation, navigation, etc.). C'est le troisième **effecteur** du véhicule.

### 5.2.1 Modèles fonctionnel et multi-physiques

Les éléments introduits dans le contexte fonctionnel du véhicule seront connectés avec l'architecture fonctionnelle. Les modèles construits dans l'environnement Matlab/Simulink avec l'aide des outils PhiSim et PhiEMI sont présentés par la suite :

#### 5.2.1.1 Modèle fonctionnel du VEH-1

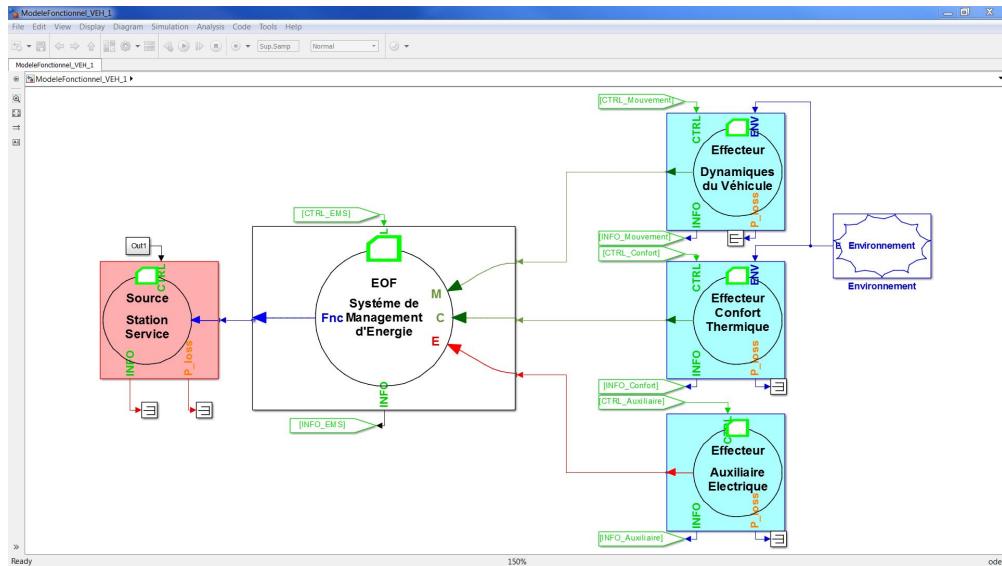


FIGURE 5.2 – Modèle fonctionnel du VEH - 1.

Dans la [Figure 5.2](#), le modèle du VEH - 1 contient la source du véhicule (la station-service), les effecteurs du véhicule (Dynamiques du Véhicule, Confort Thermique et Auxiliaires Electriques) représentant les missions à satisfaire et un élément EOF (Ensemble Organico-

Fonctionnel) assurant la gestion d'énergie du système. Cet EOF contient les éléments restants du véhicule montrés dans la [Figure 5.1](#).

Selon l'architecture de la chaîne de traction d'un VEH, le modèle peut utiliser tous les éléments fonctionnels définis au [Chapitre 3](#) ou seulement certains d'entre eux. Par exemple, un véhicule conventionnel fonctionnellement est un EOF qui transforme l'énergie de carburant en énergie mécanique, ainsi la représentation peut être faite avec les éléments source, transformateur et effecteur. Mais dans le cadre de ces travaux, afin d'avoir un comportement plus précis, les éléments comme le stockage et les distributeurs sont ajoutés et les mesures et références calculées dans ces éléments sont prises en considération pour l'évaluation des performances du véhicule. La représentation fonctionnelle de l'EOF du VEH - 1 est illustrée dans la [Figure 5.3](#).

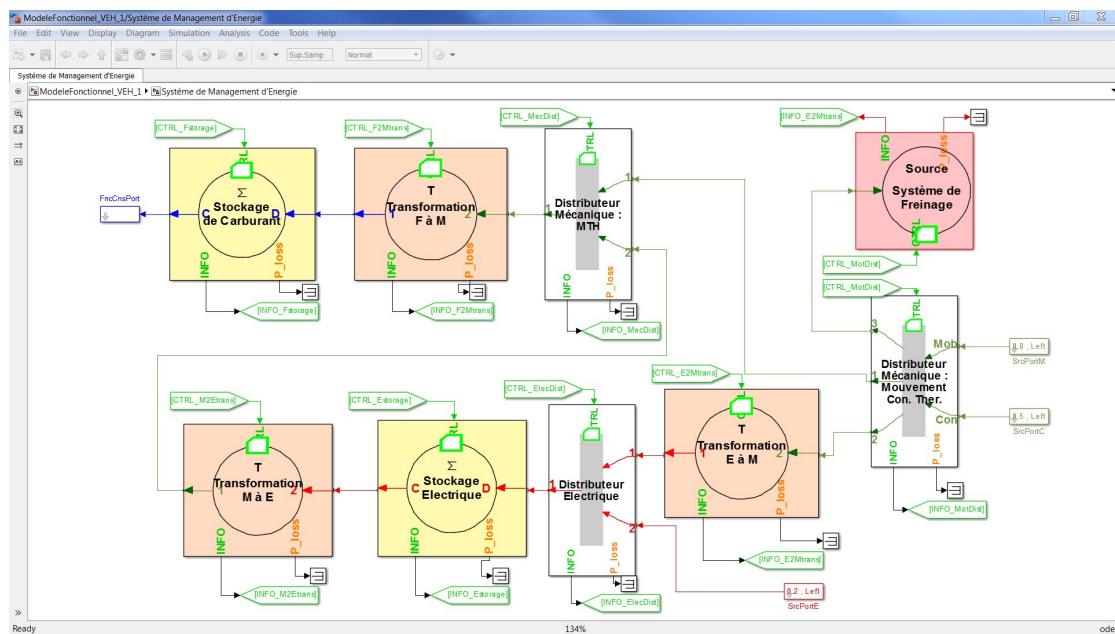


FIGURE 5.3 – Architecture de l'EOF du VEH - 1.

La prochaine étape est le paramétrage du système. Les paramètres utilisés pour tous les éléments du modèle fonctionnel du VEH - 1 sont choisis dans le [Tableau 5.1](#). Ces paramètres sont appliqués dans les modèles en ajoutant le poids du conducteur à la masse du véhicule (80 kg). Pour le paramétrage, les acceptances sont calculées par rapport aux puissances maximales de sortie des machines électrique et thermique. Les rendements des éléments fonctionnels (regroupant plusieurs éléments multiphysiques) sont estimés avec l'aide des données récupérées à partir des informations des constructeurs. L'élément Système de Freinage est pris en compte comme une source mécanique pour le système, si besoin il peut être utilisé comme une source négative. Suite aux essais du simulateur des VEHs, le besoin de puissance négative est assuré par l'élément transformateur Electrique à Mécanique (E-à-M) dans l'objectif de charger la batterie (freinage régénératif), donc le système de freinage par friction n'est pas utilisé dans cette étude pour les cycles choisis (NEDC et WLTC).

### 5.2.1.2 Modèle multi-physiques du VEH - 1

Afin de pouvoir faire la comparaison entre les résultats obtenus avec les différents modèles, et de pouvoir assurer l'interconnexion qui va suivre la modélisation des véhicules, le modèle multi-physiques est conçu avec l'architecture fonctionnelle. En remplaçant les éléments fonctionnels existants par les groupes de composants physiques/technologiques du véhicule, on obtient le modèle représenté à la (Figure 5.4).

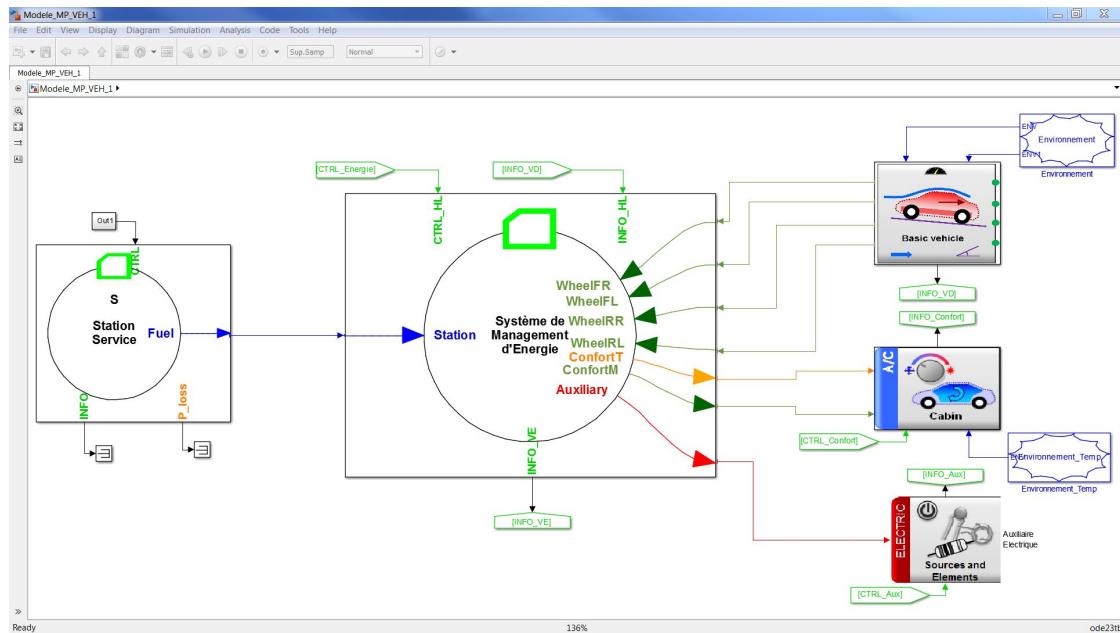


FIGURE 5.4 – Modèle multi-physiques du VEH - 1.

Ici, la différence est la nature des flux (par exemple : rouge – flux électrique, orange – flux thermique et vert – flux mécanique) et les effecteurs sont remplacés par les dynamiques du véhicule (sans le calcul de besoin de puissance) avec quatre roues connectées au système de gestion d'énergie, ainsi que par le conditionnement thermique de la cabine avec un lien avec le moteur thermique. Par ailleurs, l'auxiliaire électrique est remplacé par une charge électrique afin de simplifier le modèle. Le système de gestion d'énergie du modèle multi-physiques est illustré en Figure 5.5.

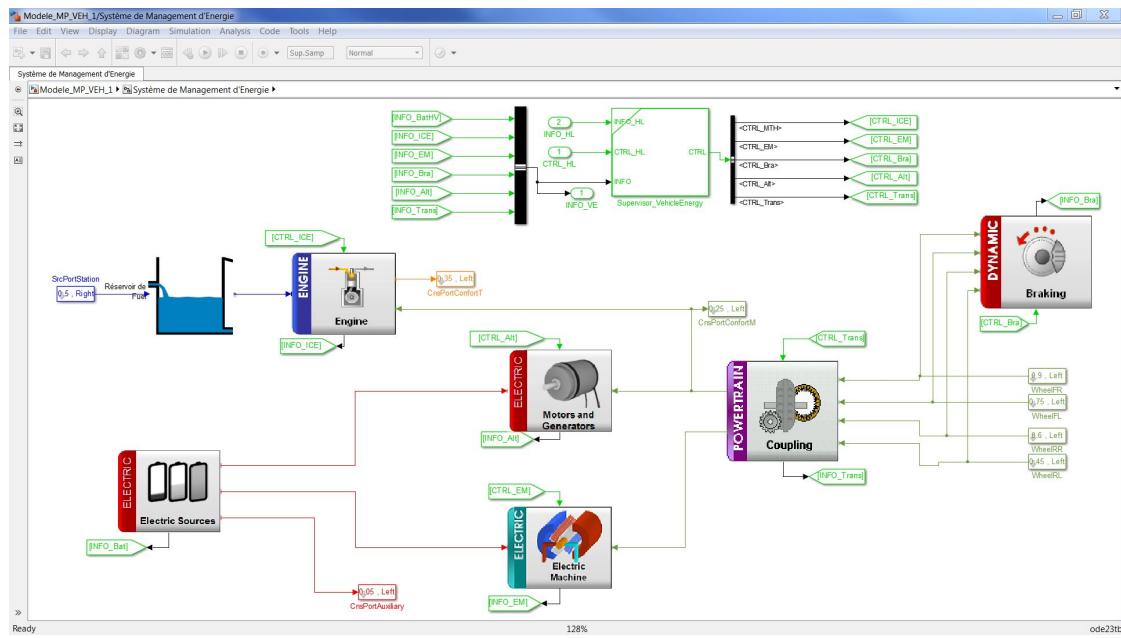
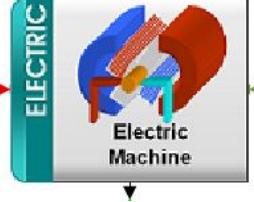
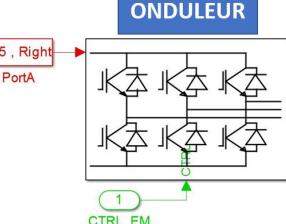
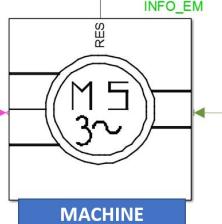
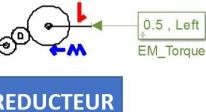
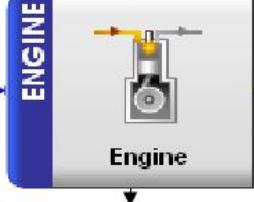
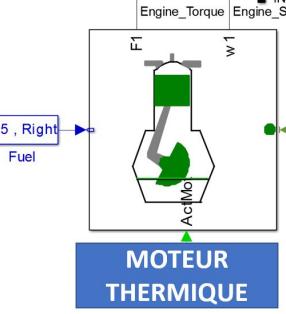
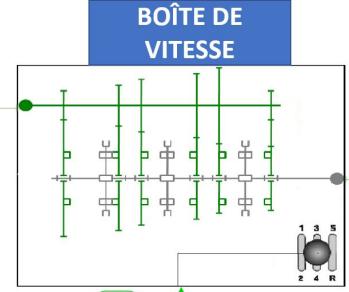
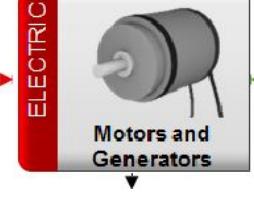
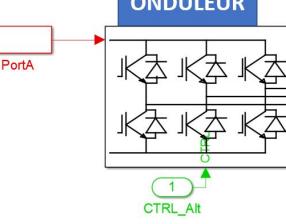
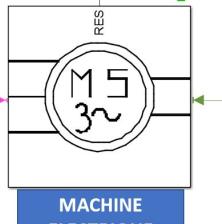
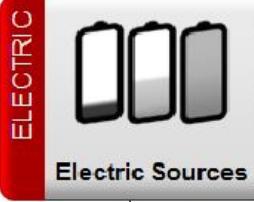
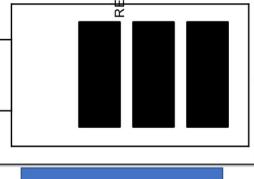
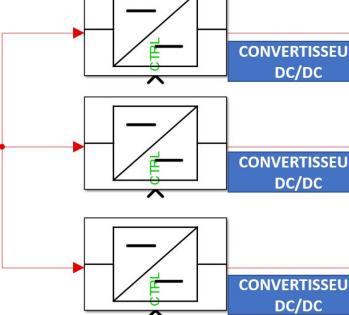
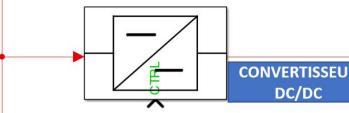
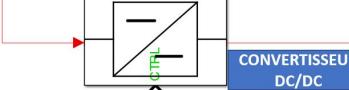
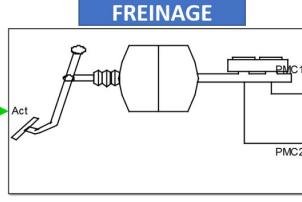
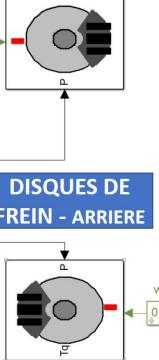


FIGURE 5.5 – Architecture multi-physics du système de management d'énergie du VEH - 1.

Les groupes de composants sont des sous-systèmes qui contiennent les composants concernés. Les groupes de composants type sont donnés dans le Tableau 5.2 pour une analyse plus approfondie :

TABLEAU 5.2 – Représentations des groupes de composants du modèle multi-physiques.

Groupe	Composants
	<p><b>ONDULEUR</b></p>  <p>PortA → 0.5 , Right</p> <p>CTRL_EM</p> <p><b>MACHINE ELECTRIQUE</b></p>  <p>INFO_EM</p> <p><b>REDUCTEUR</b></p>  <p>EM_Torque → 0.5 , Left</p>
	<p><b>MOTEUR THERMIQUE</b></p>  <p>Fuel → 0.5 , Right</p> <p>INFO_ICE</p> <p>Engine_Speed</p> <p><b>BOÎTE DE VITESSE</b></p>  <p>intvar_right → 0.2 , Right</p> <p>CTRL_ICE1</p>
	<p><b>ONDULEUR</b></p>  <p>PortA → 0.5 , Right</p> <p>CTRL_Alt</p> <p><b>MACHINE ELECTRIQUE</b></p>  <p>INFO_Alt</p> <p><b>REDUCTEUR</b></p>  <p>Alt_Torque → 0.5 , Left</p>
	<p><b>BATTERIE</b></p>  <p>INFO_Bat → 0.4 , Left</p> <p>INFO_Bat → 0.5 , Left</p> <p>INFO_Bat → 0.2 , Left</p> <p>CONVERTISSEUR DC/DC</p>  <p>NodePort2 → 0.8 , Left</p> <p>CONVERTISSEUR DC/DC</p>  <p>NodePort → 0.5 , Left</p> <p>CONVERTISSEUR DC/DC</p>  <p>NodePort1 → 0.2 , Left</p>
	<p><b>PEDALE DE FREINAGE</b></p>  <p>wheelFRL → 0.4 , Left</p> <p>wheelRRL → 0.8 , Left</p> <p><b>DISQUES DE FREIN - AVANT</b></p>  <p>wheelFL → 0.2 , Left</p> <p><b>DISQUES DE FREIN - ARRIÈRE</b></p>  <p>wheelRL → 0.6 , Left</p>

### 5.2.1.3 Modèle fonctionnel du VEH - 2

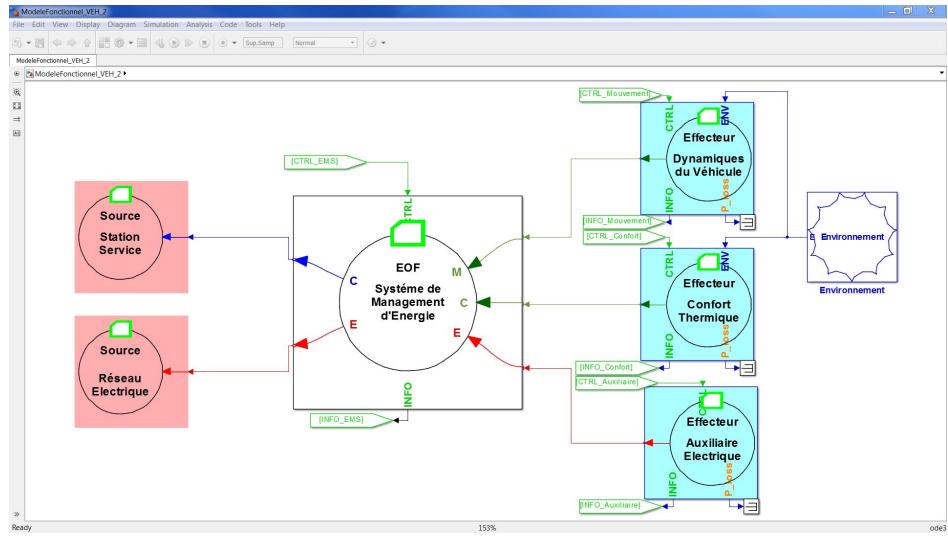


FIGURE 5.6 – Modèle fonctionnel du VEH - 2.

Dans la Figure 5.6, le modèle fonctionnel du VEH - 2 est illustré. La différence entre le modèle du VEH - 1 et le modèle du VEH - 2 est la capacité à utiliser le réseau électrique pour recharger la batterie du véhicule. De plus, les architectures des chaînes de traction sont différentes. En VEH - 1, le stockage électrique contient les batteries du système. En revanche, en VEH - 2, la batterie basse tension, qui est d'usage pour alimenter les auxiliaires électriques, est séparée et ajoutée dans l'élément effecteur d'auxiliaire électrique. L'architecture de VEH - 2 avec cette fonctionnalité est montrée dans la Figure 5.7.

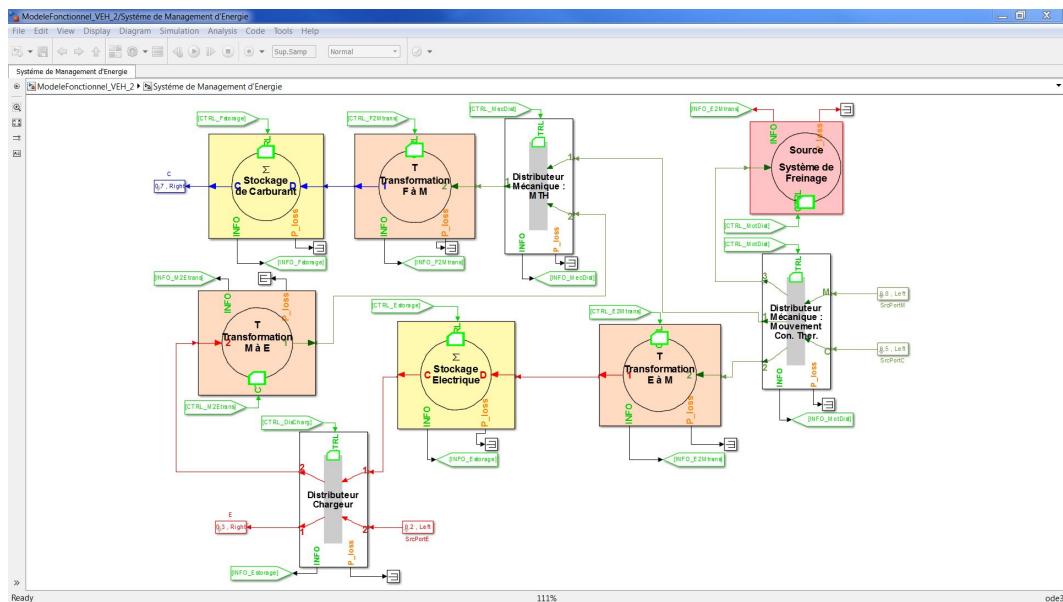


FIGURE 5.7 – Modèle Fonctionnel du VEH - 2.

Une autre différence entre les VEH - 1 et VEH - 2 est leur paramétrage. Comme le VEH - 2 possède la fonctionnalité de pouvoir être chargé par le réseau électrique, la capacité de

sa batterie est plus importante que celle du VEH - 1. De plus, les limitations des puissances maximales des moteurs sont différentes. Enfin, le carburant utilisé par le VEH - 2 est du gasoil à la place de l'essence utilisée pour le VEH - 1.

Néanmoins, ayant le mode de conduite électrique avec une batterie de capacité plus importante que celle du VEH - 1, ce modèle de PHEV peut réaliser un cycle NEDC (distance parcourue environ 11 km) ou un cycle WLTC (distance parcourue environ 23 km) avec son autonomie électrique de 50 km sans besoin de recharger la batterie. En revanche, le VEH - 1 a une batterie de capacité plus faible et présente une autonomie électrique de 4 km. Cela signifie que le VEH - 1 devrait utiliser le carburant même pour un cycle de conduite de faible distance à parcourir. Cette différence entre les deux véhicules a mené les travaux de thèse à utiliser le VEH - 1 car l'application pour l'optimisation énergétique devient plus exigeante pour minimiser la consommation de carburant.

### 5.2.2 Comparaison des résultats, validation du modèle et de l'architecture du VEH

Avec les modèles de VEH-1 construits, des analyses préliminaires sont effectuées afin de valider le modèle fonctionnel, le fonctionnement correct de l'architecture de la chaîne de traction et le paramétrage des composants.

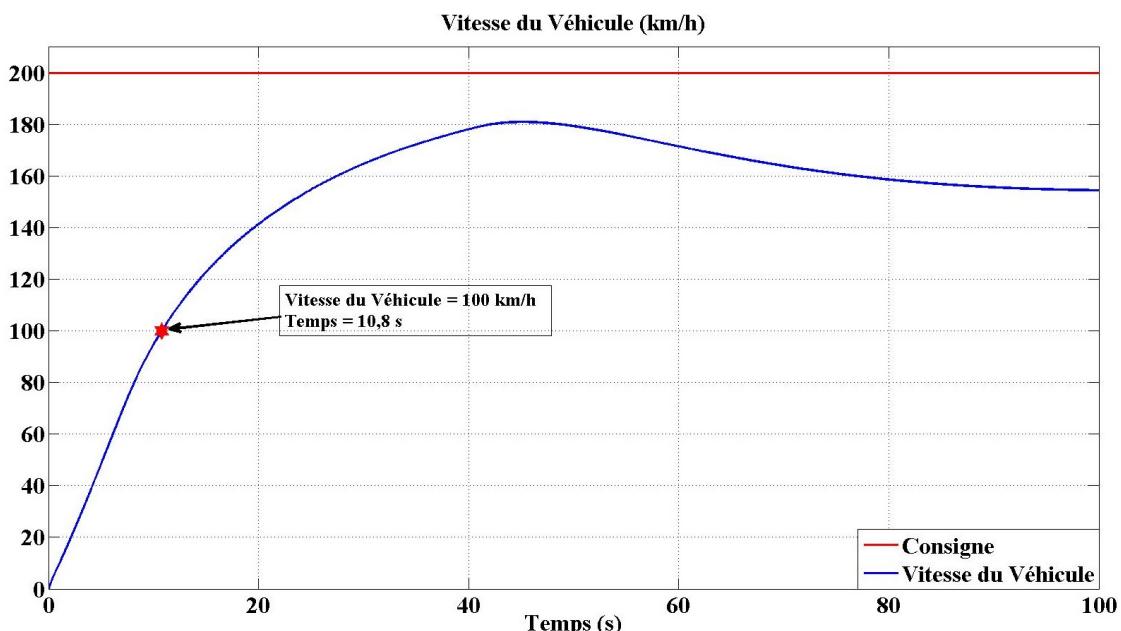


FIGURE 5.8 – Résultats de simulation pour les performances préliminaires du véhicule.

Dans une première étape, le comportement des éléments du modèle fonctionnel est vérifié. Pour les besoins de validation du modèle, la Figure 5.8 montre les résultats de simulation pour une accélération maximale (dans cet essai, la consigne issue de l'appui sur la pédale est considérée comme la consigne de vitesse et le résultat est obtenu pour une consigne de vitesse de 200 km/h). Ce tracé permet d'obtenir la vitesse maximale et le temps pour atteindre une

vitesse de 100 km/h.

Les résultats ci-dessus sont obtenus pour une consigne de vitesse de 200 km/h se traduisant en pratique par une accélération maximale. A partir de ces résultats, on peut faire les remarques suivantes :

- la vitesse maximale du véhicule (180 km/h) est compatible avec les données fournies par le constructeur automobile,
- le temps d'accélération du véhicule pour atteindre 100 km/h est de 10,8 s comme illustrée par le tracé de la [Figure 5.8](#),
- la puissance combinée du véhicule est limitée et quand le  $SOC_e$  atteint sa limite minimale, (entre 40 s et 60 s), la conduite en traction électrique est désactivée et la puissance pour le mouvement du véhicule est fournie par la chaîne de traction thermique.

Au regard de ces performances, le paramétrage du modèle est validé (cet paramétrage peut être validé, car ici, les acceptances et disponibilités ainsi que l'utilisation des chaînes de traction combinées sont prises en considération) même si un seul essai peut sembler restrictif pour une validation complète. Afin de calculer les critères d'évaluation d'un niveau de performance du véhicule (consommation de carburant, variation de l'état de charge du stockage électrique,  $SOC_e$ , pour estimer la consommation de carburant corrigée (l'illustration du calcul de ce critère est donnée dans la suite) et le nombre de cycles allumages/arrêts du moteur thermique), il est possible réaliser des essais sur les cycles NEDC et WLTC avec les stratégies de la gestion d'énergie proposées dans le [Chapitre 4](#).

A partir des données acquises, la consommation de carburant pour 100 km,  $Conso_f$ , est calculée grâce à la relation suivante :

$$Conso_f = \frac{100\Delta SOC_{carburant}}{\Delta x} V_{réservoir} \quad (5.1)$$

où  $\Delta SOC_{carburant}$  est la différence de l'état de charge du réservoir de carburant initial et final,  $\Delta x$  est la distance parcourue et  $V_{réservoir}$  est le volume du réservoir de carburant.

La variation de l'état de charge de la batterie  $\Delta SOC_e$  est calculée comme suit :

$$\Delta SOC_e = SOC_{e,init} - SOC_{e,final} \quad (5.2)$$

A partir de la variation de  $SOC_e$ , et la variation de l'état de charge du stockage de carburant, la consommation de carburant corrigée,  $Conso_{cor}$ , peut être calculée selon la relation suivante :

$$\Delta SOC_f = \Delta SOC_e \frac{E_{B,max}}{E_{R,max}} \frac{1}{\eta_{mth}\eta_{alt}} \quad (5.3)$$

(Afin de convertir l'énergie utilisé du réservoir de carburant à l'énergie électrique, un rapport entre  $E_{B,max}$  et  $E_{R,max}$  est pris en compte).

où  $\Delta SOC_f$  est la variation à ajouter à  $\Delta SOC_{carburant}$  du réservoir de carburant pour pouvoir

recalculer la consommation de carburant,  $E_{B,max}$  est l'énergie maximale stockée en stockage électrique,  $E_{R,max}$  est l'énergie maximale stockée en réservoir de carburant,  $\eta_{mth}$  est le rendement de l'élément transformateur fuel à mécanique et  $\eta_{alt}$  est le rendement de l'élément transformateur mécanique à électrique.

$$Conso_{cor} = \frac{100(\Delta SOC_{carburant} + \Delta SOC_f)}{\Delta x} V_{réservoir} \quad (5.4)$$

Afin de calculer le nombre de cycles allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique, la puissance fournie par le moteur thermique sera prise en compte. Ainsi, lorsque la puissance de sortie de la chaîne de traction thermique devient différente de zéro, le nombre de cycle d'allumage est incrémenté.

Par ces critères, une analyse énergétique et une comparaison entre les stratégies du système est réalisable. Dans la [Section 5.3](#), deux stratégies de gestion d'énergie sont illustrées en prenant en compte les limitations des composants (par exemple conserver l'état de charge du stockage électrique entre 30% et 80% ou ne pas dépasser la puissance maximale du moteur thermique).

### 5.3 Comparaison des résultats et validation du modèle et de l'architecture du VEH

Pour obtenir un VEH avec une consommation de carburant minimale prenant en compte les autres critères (la consommation de carburant corrigée et le nombre de cycle allumage/arrêt du moteur thermique), l'analyse énergétique joue un rôle essentiel. Cette analyse énergétique est réalisable par la modélisation fonctionnelle, où les limitations des groupes des composants (dimensionnement) et la stratégie d'énergie peuvent être testées et validées. Dans le contexte de cette thèse, deux types de stratégies d'énergie ont été testés : une stratégie fondée sur des règles et priorisation et une stratégie de gestion d'énergie fondée sur PFC déclinée selon deux types de fonctionnements : fonctionnement « boost » et fonctionnement « partage des besoins par priorisation ».

Ces stratégies utilisent les éléments de répartition (les distributeurs) du modèle fonctionnel afin de faire la distribution d'énergie et d'obtenir une consommation minimale en fin de déplacement du véhicule. Les éléments distributeurs ont été illustrés dans le [Chapitre 3](#), ainsi que leur rôle et les informations qui les caractérisent. En utilisant ces informations, la répartition est faite par la stratégie choisie sans perte d'énergie dans cet élément. Les implémentations de ces stratégies dans les distributeurs ainsi que les résultats des simulations effectuées seront détaillées dans la suite. La validation de la stratégie de gestion d'énergie peut être faite avec le modèle fonctionnel seul (afin d'éviter des simulations longues et diminuer en conséquence le temps de validation dans les premières étapes de conception). Après cette validation, l'étape suivante du processus de conception est d'utiliser les informations fournies par le modèle fonctionnel (par exemple les références de puissance pour chaque

source) pour la conception de l'architecture de commande du modèle multi-physiques qui est plus complexe.

Afin d'utiliser ces informations, une transformation entre les domaines fonctionnel et physique est nécessaire. Dans le [Chapitre 4](#), une approche pour résoudre ce problème a été proposée dans le cas d'un véhicule électrique. Dans le cas du VEH, les références de puissance sont transformées en références de physique avec l'aide d'une interface unique pour chaque élément fonctionnel. Ces interfaces sont connectées aux groupes de composants du modèle multi-physiques. Grâce à ce lien, les modèles fonctionnel et multi-physiques sont en mesure d'échanger les valeurs de puissance ou de références physiques nécessaires, ainsi que les valeurs mesurées/estimées.

### 5.3.1 Interconnexion des modèles fonctionnel et multi-physiques

Les architectures des systèmes décrits par les modèles fonctionnels et multi-physiques sont similaires dans les représentations des [Figure 5.3](#) et [Figure 5.5](#). Ainsi, en cas de changement au niveau multi-physiques (par exemple un élément technologique), le modèle fonctionnel doit être adapté [106, 107]. Par l'interconnexion :

- le besoin calculé est propagé et transformé en une référence physique correspondant au groupe des composants réalisant la fonction associée,
- la réponse du groupe de composants (mesure ou estimation) est prise en compte selon les limitations physiques et la puissance fournie est donnée par cette réponse.

De plus, la disponibilité et l'acceptance ainsi que les rendements sont calculés ou estimés à partir des réponses obtenues. Le modèle complet du système de gestion d'énergie est illustré en [Figure 5.9](#).

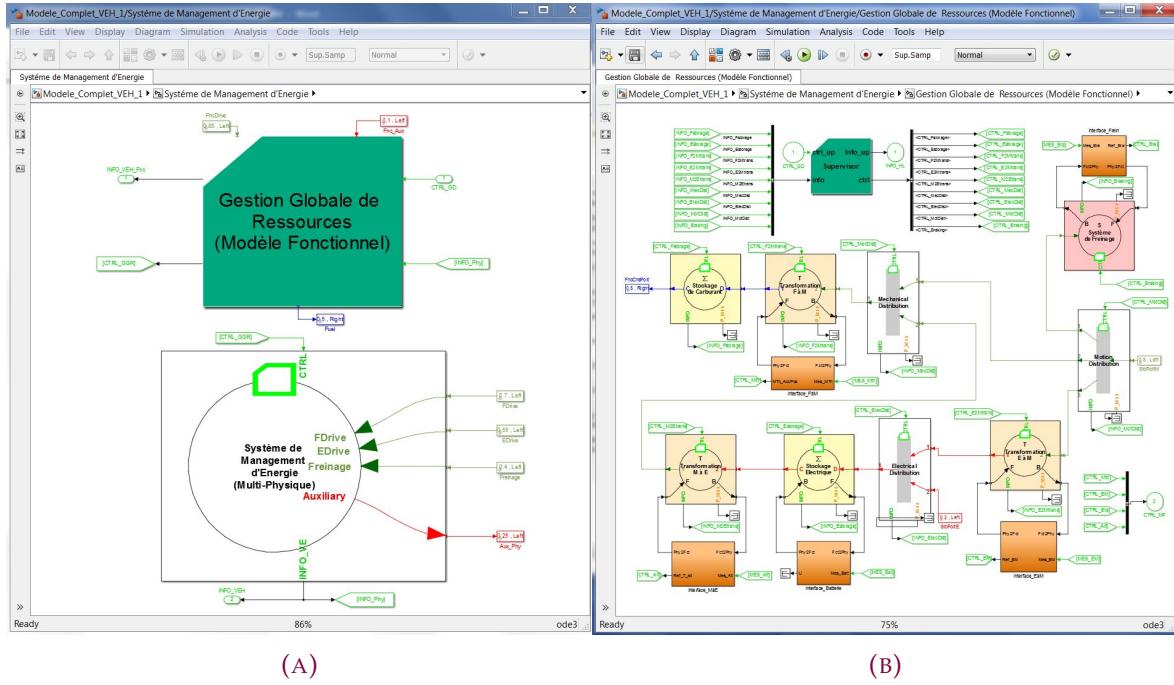


FIGURE 5.9 – (a) Les modèles connectés, (b) le modèle fonctionnel avec les interfaces d'interconnexion.

### 5.3.1.1 Interconnexion entre l'élément transformateur F-à-M et la chaîne de traction thermique

Afin de faire l'interconnexion entre les domaines fonctionnel et multi-physique, il faut dans premier temps définir les informations échangées. Ces informations contiennent le besoin (puissance, énergie, ...), la puissance fournie, la disponibilité, l'acceptance (notion définie au [Chapitre 3](#); cet indicateur correspond à la puissance maximale d'entrée et de sortie) et les propriétés d'élément permettant de faire une répartition de puissance convenable (rendements, état de charge etc.). Comme le besoin est calculé par les effecteurs et transféré aux éléments par les distributeurs, cette information est un signal fonctionnel qui peut définir les références physiques. Au contraire, la puissance fournie est une valeur qui est obtenue depuis les composants physiques selon leurs limitations. Cela mène l'interconnexion à échanger les informations entre l'élément fonctionnel et le groupe des composants physiques. La [Figure 5.10](#), donne une illustration de l'interface d'interconnexion de l'élément transformateur F-à-M et de la chaîne de traction thermique avec les relations de conversions correspondantes.

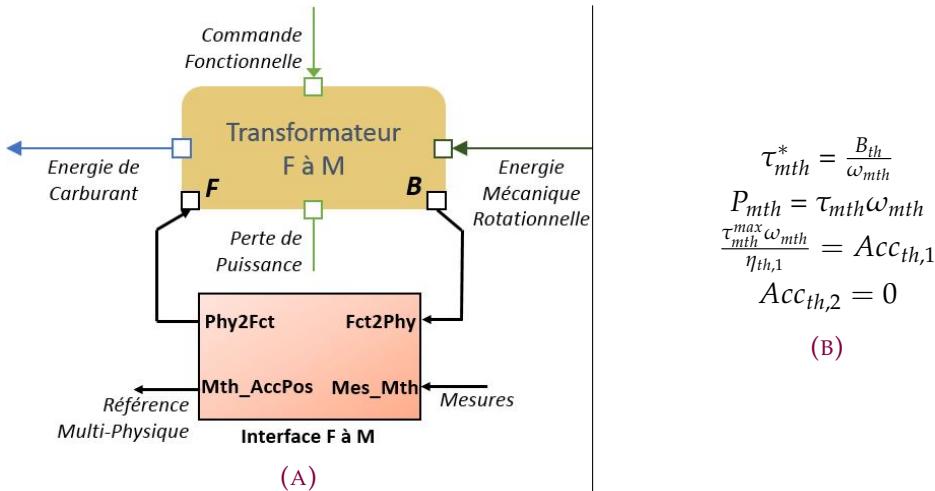


FIGURE 5.10 – (a) Interface d'interconnexion entre l'élément transformateur F-à-M et chaîne de traction thermique et (b) ses relations de conversion.

$B_{th}$  est le besoin transmis à l'élément transformateur F-à-M,  $\omega_{mth}$  est la vitesse angulaire estimée du moteur thermique,  $P_{mth}$  est la puissance de sortie,  $\tau_{mth}$  est le couple de sortie,  $\tau_{mth}^*$  est la référence de couple,  $\tau_{mth}^{max}$  est le couple maximal de sortie de la chaîne de traction thermique,  $Acc_{th,1}$  est l'acceptance du port source et  $Acc_{th,2}$  est l'acceptance du port consommateur de l'élément transformateur F-à-M. Les informations de rendement ( $\eta_{th,1}$ ) sont récupérées du modèle multi-physiques et appliquées au modèle fonctionnel pour la prise en compte dans le calcul de consommation de carburant. Les valeurs maximale et minimale de ces paramètres peuvent être obtenues auprès du fournisseur (ici  $\tau_{mth}^{max}$ ).

### 5.3.1.2 Interconnexion entre l'élément transformateur E-à-M et la chaîne de traction électrique

Cette interconnexion est similaire à celle entre l'élément transformateur F-à-M et la chaîne de traction thermique. Comme les échanges de flux sont presque les mêmes (puissance pour domaine fonctionnel et couple-vitesse pour domaine physique), les relations utiles restent sur la même forme. La seule différence à ajouter pour cette interconnexion est l'acceptance du port consommateur. Afin de garder la capacité de freinage régénératif, cette acceptance ne reste pas limitée à 0. Les relations et la représentation de cette interconnexion sont illustrées dans la Figure 5.11.

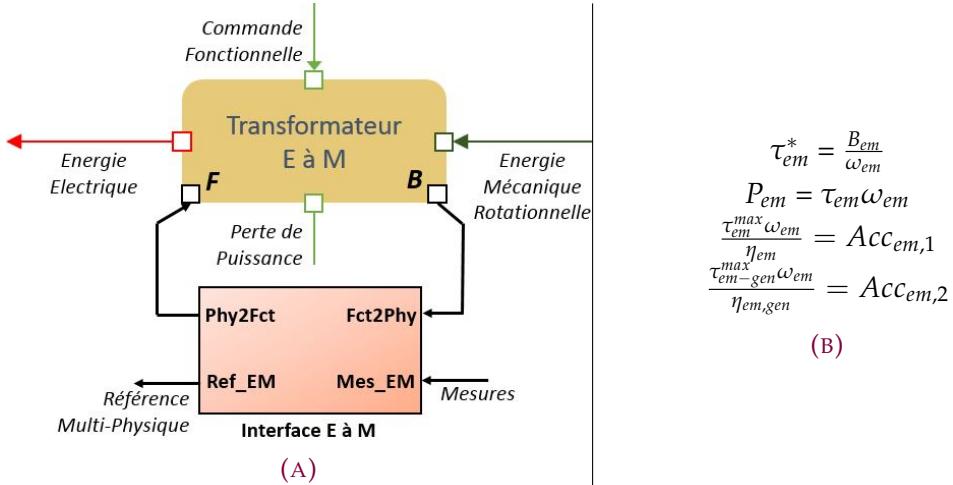


FIGURE 5.11 – (a) Interface d'interconnexion entre l'élément transformateur E-à-M et chaîne de traction thermique et (b) ses relations de conversion.

$B_{em}$  est le besoin transmis à l'élément transformateur E-à-M,  $\omega_{em}$  est la vitesse angulaire estimée de la machine électrique de traction,  $P_{em}$  est la puissance de sortie,  $\tau_{em}$  est le couple de sortie,  $\tau_{em}^*$  est la référence de couple,  $\tau_{em}^{max}$  est le couple maximal de sortie de la chaîne de traction électrique,  $\tau_{em,gen}^{max}$  est le couple minimal de sortie de la chaîne de traction électrique (couple maximal dans le mode génératrice),  $Acc_{em,1}$  est l'acceptance du port source et  $Acc_{em,2}$  est l'acceptance du port consommateur de l'élément transformateur E-à-M. Les rendements ( $\eta_{em}$ , rendement du mode de fonctionnement moteur, et  $\eta_{em,gen}$ , rendement du mode de fonctionnement génératrice) sont récupérés du modèle multi-physiques et appliqués au modèle fonctionnel pour la prise en compte dans le calcul de la consommation de carburant. Les valeurs maximale et minimale de ces paramètres peuvent être obtenues auprès du fournisseur (ici  $\tau_{em,gen}^{max}$ ,  $\tau_{em}^{max}$ ).

### 5.3.1.3 Interconnexion entre l'élément transformateur M-à-E et le groupe alternateur

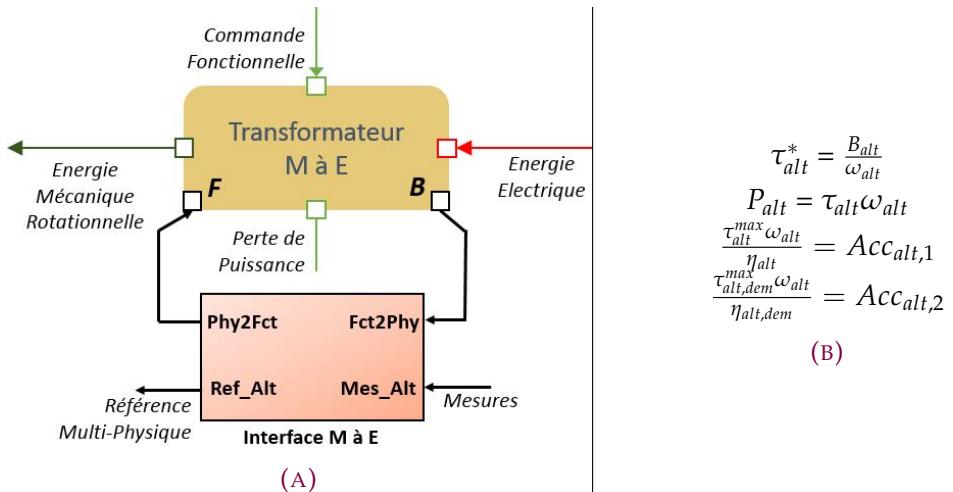


FIGURE 5.12 – (a) Interface d'interconnexion entre l'élément transformateur M-à-E et groupe alternateur et (b) ses relations de conversion.

$B_{alt}$  est le besoin transmis à l'élément transformateur M-à-E,  $\omega_{alt}$  est la vitesse angulaire estimée d'alternateur,  $P_{alt}$  est la puissance de sortie,  $\tau_{alt}$  est le couple de sortie,  $\tau_{alt}^*$  est la référence de couple,  $\tau_{alt}^{max}$  est le couple maximal de sortie du groupe alternateur,  $\tau_{alt,dem}^{max}$  est le couple minimal de sortie de la groupe alternateur (couple maximale de mode démarreur),  $Acc_{alt,1}$  est l'acceptance du port source et  $Acc_{alt,2}$  est l'acceptance du port consommateur de l'élément transformateur M-à-E. Les rendements ( $\eta_{alt}$ , rendement de mode alternateur, et  $\eta_{alt,dem}$ , rendement en mode démarreur) sont récupérés du modèle multi-physiques et appliqués au modèle fonctionnel pour la prise en compte dans le calcul de consommation de carburant. Les valeurs maximale et minimale de ces paramètres peuvent être obtenues auprès du fournisseur (ici  $\tau_{alt}^{max}$ ,  $\tau_{alt,dem}^{max}$ ).

Les propriétés de cette interconnexion restent les mêmes que celles de l'interconnexion entre l'élément transformateur de E-à-M et la chaîne de traction électrique. Sa représentation et ses relations de conversion sont montrées dans la Figure 5.12.

#### 5.3.1.4 Interconnexion entre l'élément stockage électrique et le groupe batterie

Dans le cas de l'élément de stockage électrique (contenant non seulement la batterie mais aussi les interfaces de puissance nécessaires), un changement de nature des flux échangés entre les niveaux de représentation (dans ce cas, entre les niveaux fonctionnels et multi-physiques) n'est pas nécessaire. L'adaptation des mesures et paramètres du modèle multi-physiques est réalisée sans changement de nature au niveau fonctionnel. Ici, les informations à passer sont la disponibilité ou l'acceptance avec l'état de charge de la batterie, ainsi que l'énergie maximale de la batterie. C'est-à-dire que le modèle multi-physiques remplace le système opérant du modèle fonctionnel. Sa représentation est illustrée dans la Figure 5.13.

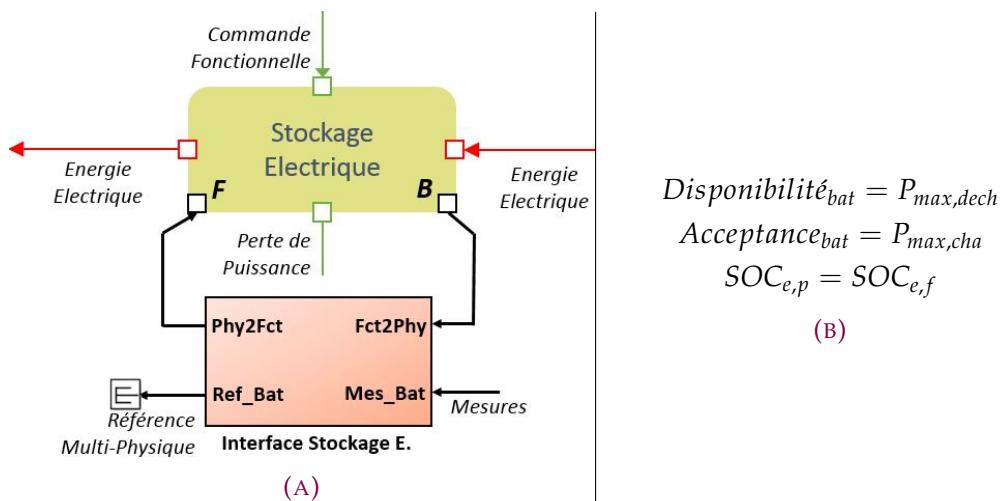


FIGURE 5.13 – (a) Interface d'interconnexion entre stockage électrique et groupe batterie; (b) relations de conversion.

$P_{max,dech}$  est la puissance maximale de décharge de batterie et  $P_{max,cha}$  est la puissance maximale de charge de batterie (déterminées au moyen d'une relation entre les  $SOC_e$ ).  $SOC_{e,p}$  et

$SOC_{e,f}$  sont respectivement les états de charge des modèles multi-physiques et fonctionnel.

### 5.3.1.5 Interconnexion entre l'élément système de freinage et le groupe de freinage

Le système de freinage a un fonctionnement de source de puissance négative. Par conséquent, son acceptance de porte source est égale à 0. En revanche, son acceptance de port consommateur négative dépend de la vitesse du véhicule, du couple de freinage maximal, du rayon de la roue et du nombre de roues. Les acceptances ne changent pas avec l'interconnexion et restent les mêmes pour les deux domaines. La représentation de cette interconnexion est détaillée dans la Figure 5.14.

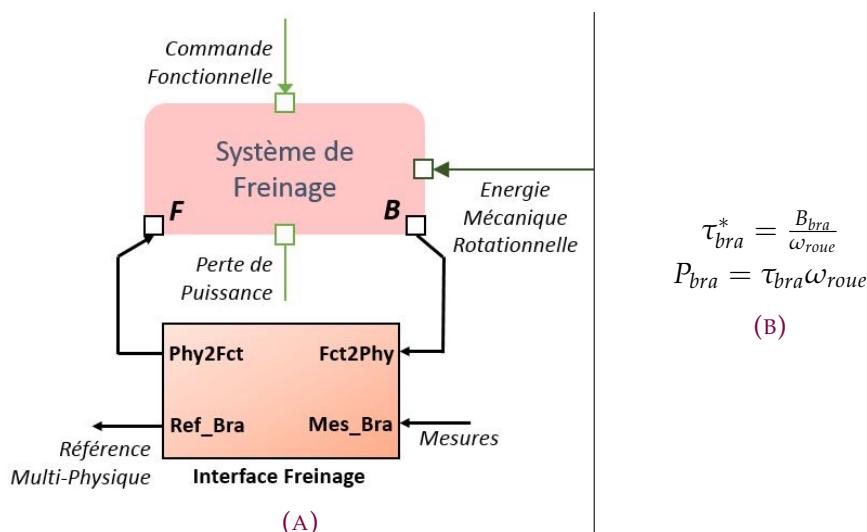


FIGURE 5.14 – (a) Interface d'interconnexion entre système de freinage et groupe de freinage ; (b) relations de conversion.

$B_{bra}$  est le besoin transmis au système de freinage,  $\omega_{roue}$  est la vitesse angulaire estimée des roues,  $P_{bra}$  est la puissance de sortie,  $\tau_{bra}$  est le couple de sortie,  $\tau_{bra}^*$  est la référence de couple de groupe de freinage.

### 5.3.2 Gestion d'énergie avec la stratégie fondée sur des règles

Pour améliorer la consommation de fuel, une répartition avec une stratégie fondée sur des règles, implémentées dans les distributeurs du modèle, est principalement utilisée. Ces règles sont implémentées dans les distributeurs du modèle ainsi que les propriétés physiques comme par exemple, typiquement la constante de temps de l'élément transformateur F-à-M peut être considérée comme égale à la moitié de celle de l'élément transformateur E-à-M ou encore la régulation du  $SOC_e$  à son état initial, cela signifie que le véhicule est utilisé en mode *charge sustaining* (maintien de la charge) (Section 5.1). Les simulations sont répétées avec la même stratégie de commande pour :

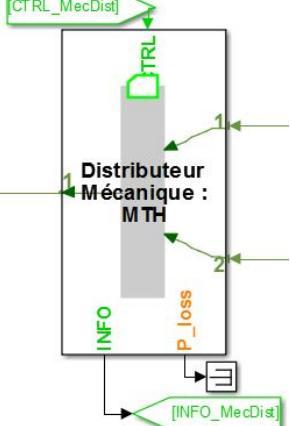
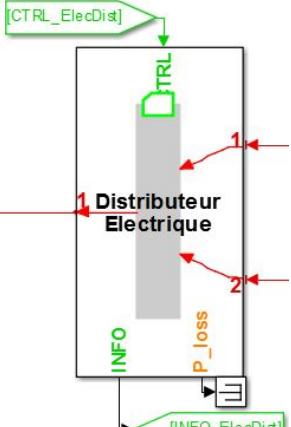
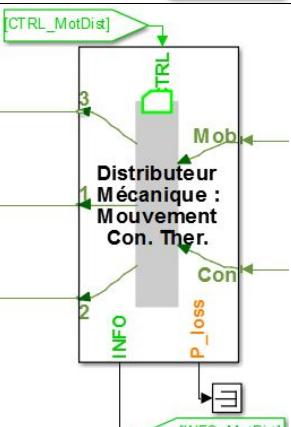
- toutes les valeurs d'état de charge du stockage électrique,

- toutes les conditions de fonctionnement (définies par la puissance des auxiliaires électriques,  $P_{aux} = [1 \text{ kW}, 2 \text{ kW} \text{ et } 3 \text{ kW}]$ , et l'écart de température entre extérieur et la cabine du véhicule,  $\Delta T_{cth} = [0^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C} \text{ et } 20^\circ\text{C}]$ ).

De plus, la vitesse maximale de conduite électrique (110 km/h) est fixée par le contrôleur du modèle fonctionnel. Pour cette approche, les répartitions du besoin et de la puissance fournie sont effectuées par les distributeurs en utilisant les priorités retenues. Ces priorités par rapport aux distributeurs sont détaillées dans le [Tableau 5.3](#).

Dans ce cas, le Distributeur Mécanique de la chaîne de traction thermique transmet l'énergie mécanique fournie par l'élément transformateur F-à-M vers l'effecteur de mouvement ou l'élément transformateur M-à-E. Par ailleurs, le Distributeur Electrique transmet l'énergie électrique fournie par le stockage électrique aux auxiliaires électriques ou mouvement (conduite électrique). Finalement, le Distributeur Mécanique de mouvement et confort thermique transmet les besoins de mouvement et confort thermique aux chaînes de traction électrique et thermique et au système de freinage. Il fait également la répartition de l'énergie fournie entre les effecteurs de mouvement et de confort thermique.

TABLEAU 5.3 – Priorités d'allocation des besoins et de puissances fournies dans les distributeurs.

Distributeur	Image	Priorité
Distributeur Mécanique de la chaîne de traction thermique		Fourniture : Mouvement (1) Chargement de la batterie (2)
Distributeur Electrique		Fourniture : Auxiliaire électrique (1) Conduite électrique (2)
Distributeur Mécanique de : mouvement et confort thermique		Besoin : Chaîne de Traction Electrique (1) Chaîne de Traction Thermique (2) Système de Freinage (3) Fourniture : Mouvement (1) Confort thermique (2)

Afin de procéder à une première évaluation, une simulation est effectuée pour des conditions de fonctionnement [ $P_{aux} = 2kW$ ,  $\Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] et avec un  $SOC_e$  initial de 55%. Les résultats obtenus en simulation sur un cycle NEDC utilisant la stratégie fondée sur des règles de répartition d'énergie sont illustrés par les tracés de la Figure 5.15.

### 5.3.2.1 Cas d'un profil de conduite NEDC [ $P_{aux} = 2kW$ , $\Delta T_{cth} = 10^{\circ}C$ ] avec la stratégie fondée sur des règles

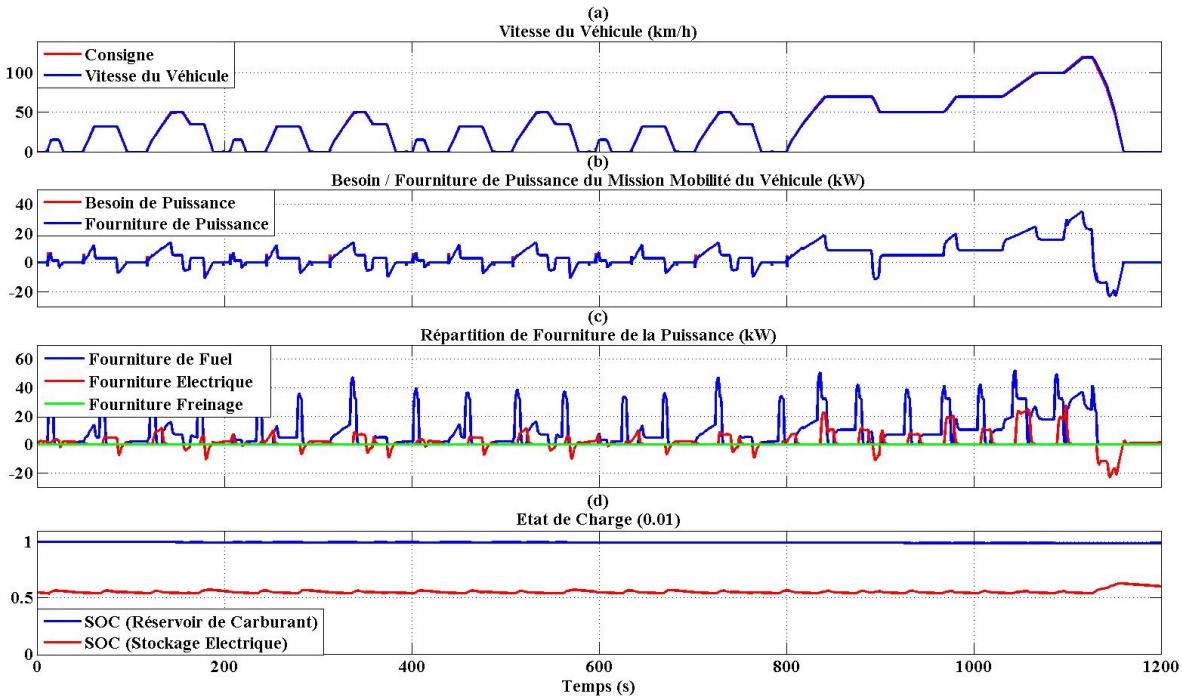


FIGURE 5.15 – Résultats de simulation pour le cycle NEDC avec la stratégie fondée sur des règles.

A partir de ces résultats, on peut effectuer les remarques suivantes :

- Dès le départ du cycle, la stratégie de répartition de puissance entre les sources conduit à une demande à la chaîne de traction thermique régulière. Lorsque le SOCe atteint le niveau limite 55%, le distributeur réagit pour satisfaire le besoin nécessaire à la mission du véhicule et au stockage électrique. Cela mène à l'augmentation de la demande de la puissance nécessaire à la chaîne de traction thermique. Quand le stockage électrique permet d'utiliser la chaîne de traction électrique pour le déplacement, il est utilisé en priorité (quand le  $SOC_e$  est supérieur à 55%) (Figure 5.15 .(c)).
- Le niveau du SOCe augmente avec le freinage régénératif, pour ce fonctionnement la chaîne de traction électrique est utilisée (Figure 5.15 .(d)). Une autre raison de cette augmentation est l'élément transformateur M-à-E. Pour des valeurs pic, typiquement supérieures à 35 kW, la fourniture de la puissance de la chaîne de traction thermique est utilisée pour charger le stockage électrique car la chaîne de traction électrique ne peut assurer le freinage régénératif à ce niveau de puissance. Pour mémoire cette architecture contient au moins deux machines électriques.
- La consommation de carburant, la variation  $\Delta SOC_e$  qui conduit à la consommation de carburant corrigée et le nombre de cycles allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique pour les segments urbain, autoroute et pour l'ensemble du cycle sont illustrés dans le Tableau 5.4.

TABLEAU 5.4 – Indicateurs de performance pour la stratégie fondée sur des règles (NEDC).

Critère	NEDC (Urbain)	NEDC (Autoroute)	NEDC (Ensemble)
$Conso_f$	6,6071 l / 100 km	4,2372 l / 100 km	5,1110 l / 100 km
$\Delta SOC_e$	-0,0162	-0,0362	-0,0525
$n_{mth}$	20	7	27
$Conso_{cor}$	6,7191 l / 100 km	4,3834 l / 100 km	5,2446 l / 100 km

Il est important de noter que l'utilisation de la chaîne de traction électrique n'est pas toujours la meilleure solution pour minimiser la consommation de carburant. Le fonctionnement du VEH avec l'architecture série peut mener le système à un rendement global inférieur à celui d'une architecture parallèle, mais cela dépend aussi de la commande de la machine thermique et de sa zone de fonctionnement. Dans le modèle fonctionnel, les rendements des éléments de transformation sont constants. Cela signifie que charger la batterie par la chaîne de traction thermique n'est pas une solution efficace.

### 5.3.2.2 Cas d'un profil de conduite WLTC [ $P_{aux} = 2kW$ , $\Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] avec la stratégie fondée sur des règles

Pour un résultat plus détaillé, le modèle est évalué avec le même paramétrage et la même stratégie de la gestion d'énergie pour un cycle du WLTC. Les résultats sont illustrés par les tracés de la Figure 5.16.

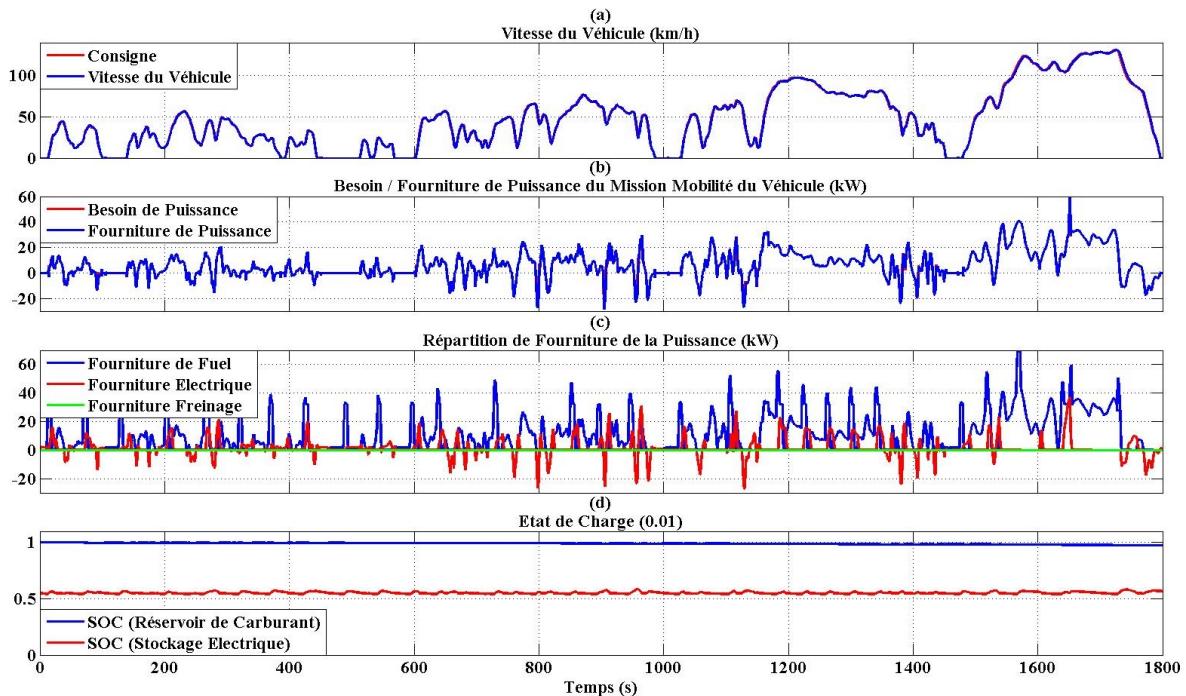


FIGURE 5.16 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC avec la stratégie fondée sur des règles.

Des résultats pour le cas d'usage du WLTC sont donnés dans la Figure 5.16. A partir de

ces résultats, les remarques suivantes peuvent être faites :

- La puissance nécessaire pour ce cycle a des transitions plus fortes que celles du cycle NEDC, ainsi l'utilisation de la chaîne de traction électrique au départ du cycle s'arrête quand le SOCe atteint sa limite inférieure. Puis quand l'état de charge le permet, la chaîne de traction électrique est réutilisée (Figure 5.16 .(c)),
- Le freinage régénératif est utilisé pour récupérer l'énergie et la transformer en énergie électrique (Figure 5.16 .(c) et Figure 5.16 .(d)),
- Les consommations de carburant, le  $\Delta SOC_e$ , la consommation de carburant corrigée et le nombre de cycles allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique pour les segments urbain, périurbain, autoroute et l'ensemble du cycle sont illustrés dans le Tableau 5.5.

TABLEAU 5.5 – Indicateurs de performance pour la stratégie fondée sur des règles (WLTC).

Critère	WLTC (Urbain)	WLTC (Périurbain)	WLTC (Autoroute)	WLTC (Ensemble)
$Conso_f$	6,6508 l / 100 km	4,0781 l / 100 km	4,5165 l / 100 km	4,5758 l / 100 km
$\Delta SOC_e$	-0,0142	0,0165	-0,0182	-0,0159
$n_{mth}$	21	26	5	52
$Conso_{cor}$	6,7795 l / 100 km	4,0392 l / 100 km	4,5782 l / 100 km	4,5949 l / 100 km

Le nombre de cycle d'allumage / d'arrêt n'intervient pas sur le niveau de consommation de carburant, c'est un critère de confort.

Grâce à ces résultats, il est possible de noter que les indicateurs de performances varient selon le cycle et de même pour chaque segment des cycles concernés. Pour le cycle WLTC, le nombre de cycles allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique est supérieur à celui du cycle NEDC, mais la consommation de carburant est plus faible. La variation de  $SOC_e$  diffère selon les conditions de conduite, pour les cycles WLTC et NEDC elle est négative. Cela conduit à une consommation de carburant corrigée plus élevée que la consommation de carburant estimée. En revanche, pour le type de conduite périurbain du cycle WLTC, la variation de  $SOC_e$  est positive, cela mène à une consommation corrigée plus faible. On peut noter que la batterie est chargée avec une énergie supérieure à celle récupérée par le freinage régénératif. On peut donc conclure qu'un niveau d'énergie complémentaire est apporté par la chaîne de traction thermique. Pour la stratégie fondée sur des règles, deux autres aspects à mettre en évidence concernent :

- pour le critère sur la consommation corrigée cette stratégie est plus performante pour le cycle WLTC que pour le cycle NEDC,
- en revanche, le nombre de cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique n'est pas fiable pour la comparaison entre le cycle NEDC et le cycle WLTC, car leurs distances parcourus sont différents (11 km et 27 cycles allumage/arrêt pour le cycle NEDC et 23 km et 52 cycles allumage/arrêt pour WLTC). Mais, les performances obtenues avec cette stratégie semblent être similaires pour les deux cycles.

Ainsi, afin de conclure sur le choix de cette stratégie, en prenant en compte le modèle conducteur (type de conduite ou type de cycle ou type de segment) une analyse plus détaillée avec les conditions données précédemment et les différents états initiaux sera effectuée dans la [Section 5.4](#).

### 5.3.3 Stratégie de gestion d'énergie fondée sur PFC (Commande Prédictive Fonctionnelle, en Anglais : Predictive Functional Control)

Dans cette partie, afin de faire l'allocation de la puissance fournie et la répartition des besoins, l'approche PFC introduite dans le [Chapitre 4](#) est intégrée au modèle du véhicule VEH - 1, dans l'élément Distributeur Mécanique de mouvement et confort thermique. Pour l'étude, cette approche n'a pas été utilisée pour les autres distributeurs, car seul ce distributeur représente un sous-système multi-sources/multi-consommateurs. Il est donc le seul compatible pour l'utilisation de la stratégie de gestion d'énergie fondée sur PFC proposée dans le [Chapitre 4](#). Les autres distributeurs utilisent la stratégie de répartition fondée sur des règles, détaillée dans la [Section 5.3.2](#).

#### 5.3.3.1 Choix d'horizon de prédition et la pondération $\alpha$

Au préalable des simulations pour les conditions de fonctionnement nominales (fixées à [ $P_{aux} = 2kW$ ,  $\Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ]), une analyse est effectuée concernant le choix des paramètres de réglage suivants :

- l'horizon de prédition  $h$ . Cette valeur a été introduite en [Section 4.2.2.2](#) pour la gestion d'énergie multi-sources/mono-consommateur. Elle correspond à l'horizon de prédition pour la puissance maximale disponible de la chaîne de traction électrique.
- les paramètres  $\alpha_i$ . Ces pondérations ont été introduites en [Section 4.2.2.1](#) pour la gestion d'énergie mono-source/multi-consommateurs. Elles gèrent la répartition de la puissance fournie entre les différents consommateurs.

##### 5.3.3.1.1 Choix de l'horizon de prédition $h$ pour l'estimation de la puissance maximale

L'influence de l'horizon de prédition est testée pour différentes valeurs pour le même modèle (VEH - 1) et pour les deux cycles de conduite. La [Figure 5.17](#) montre les résultats obtenus pour cinq horizons de prédition (1 s, 2 s, 3 s, 4 s et 5 s) de ces simulations.

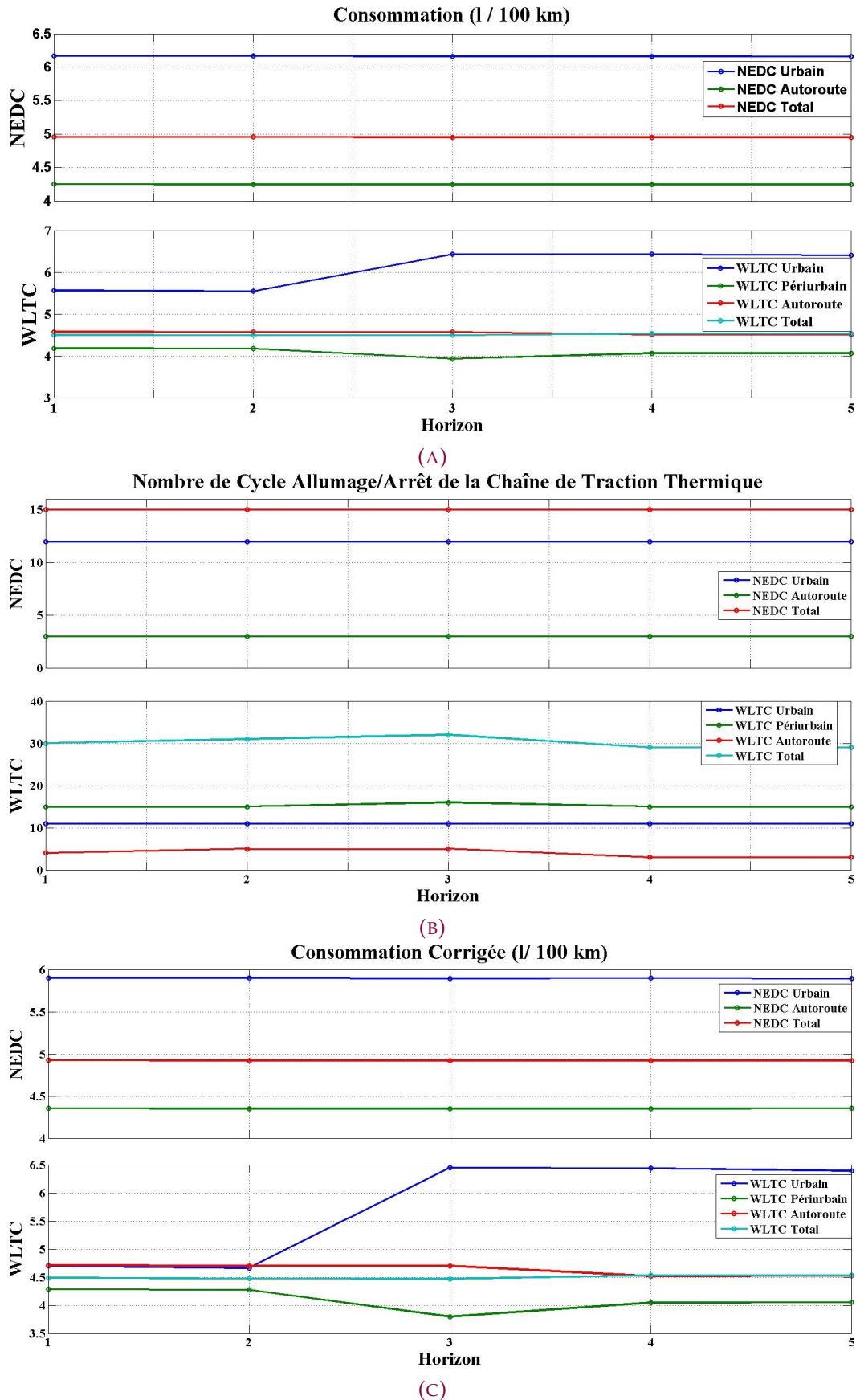


FIGURE 5.17 – Comparaison des horizons pour les critères du véhicule : (a) Consommation de carburant, (b) Nombre de cycle allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique, (c) Consommation de carburant corrigée.

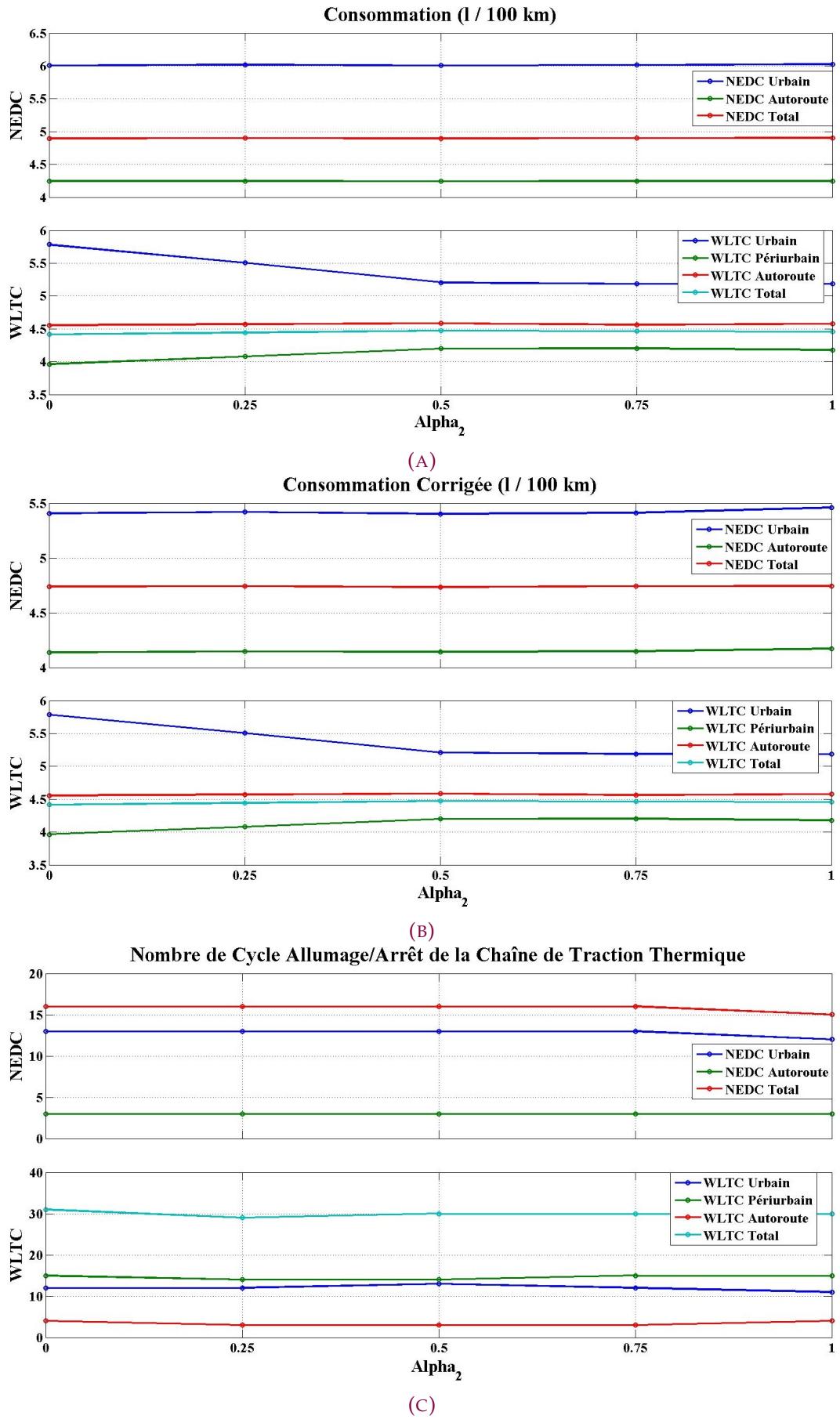
- A l'égard de la consommation de carburant ([Figure 5.17\(a\)](#)) :
  - pour l'ensemble du cycle NEDC, les écarts de consommation sont très faibles et négligeables.
  - pour le segment de cycle WLTC-urbain, des horizons de 1 s et 2 s semblent diminuer la consommation avec un niveau de performance de 5,5 l/100 km ( 15% de moins que les autres horizons).
  - pour le segment WLTC-périurbain le meilleur choix semble être 3 s pour une consommation de 3,9 l/100 km ( 7% moins que les autres).
  - de plus, pour l'ensemble du cycle WLTC, la différence est faible pour faire un choix (même si l'horizon augmente, la consommation de carburant ne semble que très légèrement augmenter).
- Par rapport au nombre de cycles allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique ([Figure 5.17\(b\)](#)) :
  - le changement de l'horizon de prédition n'a pas d'effet considérable sur les résultats pour l'ensemble de cycle NEDC et ses segments,
  - pour l'ensemble du cycle WLTC, avec un horizon de 3 s le nombre de cycles allumage/arrêt est plus élevé avec un résultat supérieur à 30 cycles ( 10% de plus qu'avec les autres horizons),
  - pour les autres horizons la différence de performance entre les différents résultats ( 6%) est faible et il est difficile d'en déduire un choix optimal (le nombre de cycles se situe entre 28 et 30 cycles),
  - si le segment du cycle WLTC - Autoroute est pris en considération, le nombre de cycles augmente de 5 en plus pour les horizons de 2 s et 3 s comparativement aux autres horizons.
- concernant la consommation corrigée de carburant ([Figure 5.17\(c\)](#)), estimée par la variation sur l'état de charge SOCe, pour le cycle NEDC, la différence est négligeable. En revanche, pour le cycle WLTC, les résultats sont semblables à la consommation de carburant donnée en [Figure 5.17\(a\)](#). Ceci signifie que pour le segment WLTC-urbain, les meilleurs choix de l'horizon sont 1 s et 2 s.

A partir de ces remarques sur les différents horizons de prédition, pour le cycle NEDC la différence de performance est relativement faible. En revanche, pour le cycle WLTC, le meilleur choix de l'horizon correspond à un horizon de 1 s. Aussi, ce choix peut être adopté pour le cycle NEDC pour avoir la même performance que le cycle WLTC.

#### 5.3.3.1.2 Choix des pondérations $\alpha_i$ pour la répartition de la puissance fournie

Concernant la gestion d'énergie (puissance ou énergie fournies) dans le cas d'une structure mono-source/multi-consommateurs, il reste à définir le choix des paramètres  $\alpha_i$  de répartition de la puissance fournie afin d'analyser la stratégie proposée. Cela permettra de comparer

cette stratégie et la stratégie fondée sur des règles. Pour l'horizon de prédiction choisi précédemment, la pondération  $\alpha_1$  de répartition de la puissance fournie à l'effecteur du mouvement du véhicule est considérée constante et égale à 1. Des comparaisons ont été effectuées pour quatre valeurs de  $\alpha_2$  : [0, 25; 0, 5; 0, 75; 1] la pondération pour la répartition de la puissance fournie à l'effecteur du confort thermique. Les résultats obtenus sont illustrés par les tracés de la Figure 5.18.



**FIGURE 5.18 – Comparaison des valeurs de  $\alpha_2$  pour les critères du véhicule (a) Consommation de carburant, (b) Nombre de cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique et (c) Consommation de carburant corrigée.**

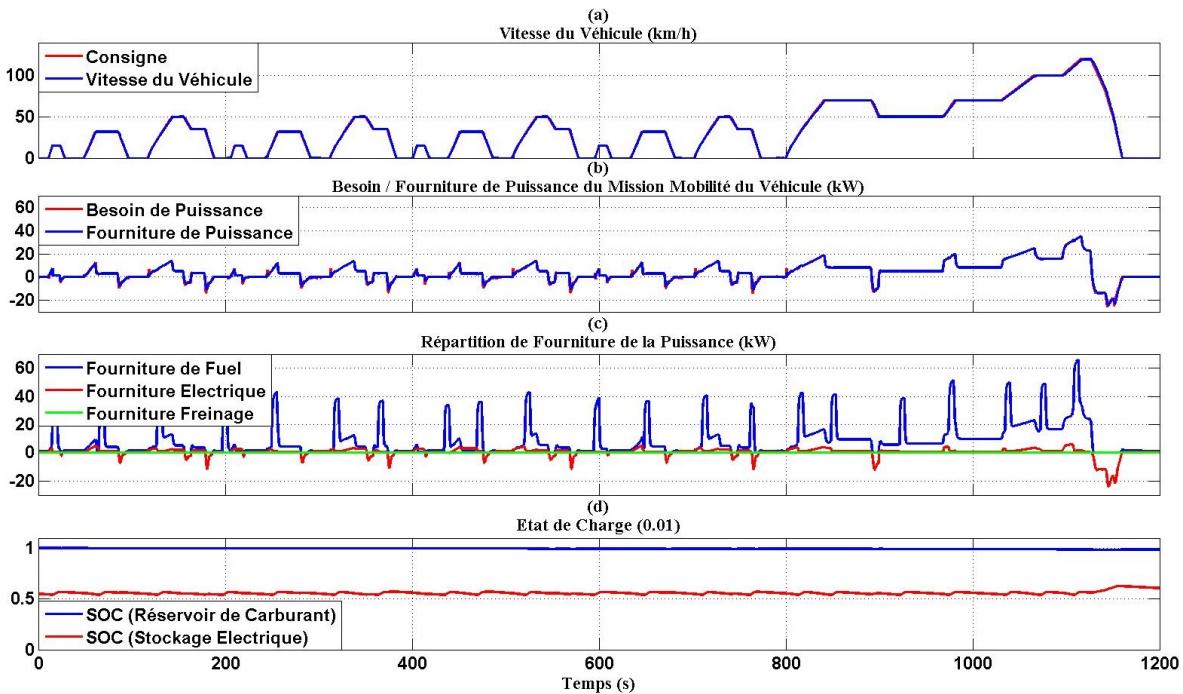
Ces résultats attirent les remarques suivantes :

- Si la consommation de carburant est prise en considération ([Figure 5.18\(a\)](#)) :
  - pour le cycle NEDC, l'augmentation de  $\alpha_2$  induit une légère augmentation de consommation pour une conduite de type urbaine. En revanche, pour une conduite sur parcours autoroutier le résultat ne change pas pour les différentes valeurs des  $\alpha_2$  et pour l'ensemble du cycle on note une légère augmentation de la consommation.
  - pour le cycle WLTC, le meilleur résultat est obtenu pour  $\alpha_2 > 0,5$ , où la consommation pour le type de conduite urbain diminue de 0,5 l/100 km mais il augmente pour le type périurbain de 0,25 l/100 km.
- Pour le nombre de cycles d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique ([Figure 5.18\(b\)](#)) :
  - concernant le cycle NEDC, le résultat le plus approprié (nombre minimal) est obtenu pour  $\alpha_2 = 1$  avec une valeur de 15 cycles pour l'ensemble du cycle NEDC et 12 cycles pour la conduite type urbain. Pour les autres valeurs de  $\alpha_2$ , ces valeurs sont de 16 et 14 cycles respectivement.
  - pour le cycle WLTC, le nombre de cycles d'allumage/arrêt ne change pas considérablement.
- Enfin, pour la consommation de carburant corrigée ([Figure 5.18\(c\)](#)) :
  - les courbes sont semblables à la consommation de carburant, dans le cas du cycle NEDC, la différence des résultats pour l'ensemble de valeurs de  $\alpha_2$  est négligeable.
  - pour le cycle WLTC, pour les valeurs  $\alpha_2 > 0,5$ , cet indicateur de performance diminue d'une façon semblable à la consommation de carburant ([Figure 5.18\(a\)](#)).

Au regard de ce qui a été noté précédemment, afin d'avoir un bon compromis sur la valeur de  $\alpha_2$ , les valeurs obtenues pour les différents critères guident le choix vers un intervalle 0,75 et 1. Il a été adopté  $\alpha_2 = 0,875$  pour obtenir un bon compromis entre les différents critères.

Avec les choix effectués, un horizon de prédiction de 1 s et de pondération sur les répartitions d'énergie entre les consommateurs  $\alpha_2 = 0,875$ , il est possible d'aborder l'analyse du comportement du véhicule pour les conditions de fonctionnement nominales [ $P_{aux} = 2kW$ ,  $\Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] pour déterminer le niveau de performance.

### 5.3.3.2 Cas d'un profil de conduite NEDC [ $P_{aux} = 2kW$ , $\Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] avec la stratégie fondée sur PFC fonctionnement en « partage des besoins par priorisation »



**FIGURE 5.19 –** Résultats de simulation pour le cycle NEDC avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation ».

En utilisant les paramètres obtenus par la stratégie de gestion d'énergie introduite au Chapitre 4, les résultats sont résumés dans le Tableau 5.6 et les observations suivantes peuvent être faites au regard d' étant résultats de simulation du VEH pour le cycle NEDC :

- Contrairement aux résultats de simulations obtenus avec la stratégie fondée sur PFC avec le fonctionnement « partage des besoins par priorisation » proposée, la traction électrique est utilisée pour des fonctionnements à des puissances plus faibles mais plus souvent (Figure 5.19 .(c)). Même l'existence d'un point où la puissance maximale est très légèrement dépassée, mais cela ne modifie pas les résultats ni les conclusions.
- Concernant la consommation de carburant, la performance de l'approche proposée est meilleure pour une conduite de type urbain mais elle consomme davantage que celle obtenue avec les autres stratégies dans le cas d'une conduite autoroutière. Ainsi, cela mène à une consommation totale inférieure à celle de la stratégie fondée sur des règles.
- Sur l'ensemble du cycle NEDC, la variation  $\Delta SOC_e$  est très proche de zéro, mais elle est négative. Ainsi, l'utilisation d'énergie électrique pour la traction est assurée et le coût des missions du véhicule à prendre en compte correspond à l'énergie fournie par la chaîne de traction thermique et l'énergie récupérée en fin de ce cycle.
- Concernant le nombre de cycles allumage/arrêts de la chaîne de traction thermique, les performances obtenues avec la stratégie de gestion d'énergie proposée ci-dessus sont

plus faibles que celles obtenues avec la stratégie fondée sur des règles. Ce critère doit être pris en considération pour le choix final de la stratégie adoptée.

TABLEAU 5.6 – Indicateurs de performance avec la stratégie fondée sur PFC fonctionnement en « partage des besoins par priorisation » (cycle NEDC).

Critère	NEDC (Urbain)	NEDC (Autoroute)	NEDC (Ensemble)
$Conso_f$	6,5176 l / 100 km	4,2518 l / 100 km	5,0872 l / 100 km
$\Delta SOC_e$	-0,0037	-0,0522	-0,0559
$n_{mth}$	12	2	14
$Conso_{cor}$	6,5432 l / 100 km	4,4626 l / 100 km	5,2297 l / 100 km

### 5.3.3.3 Cas d'un profil de conduite WLTC [ $P_{aux} = 2kW$ , $\Delta T_{cth} = 10^\circ C$ ] avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation »

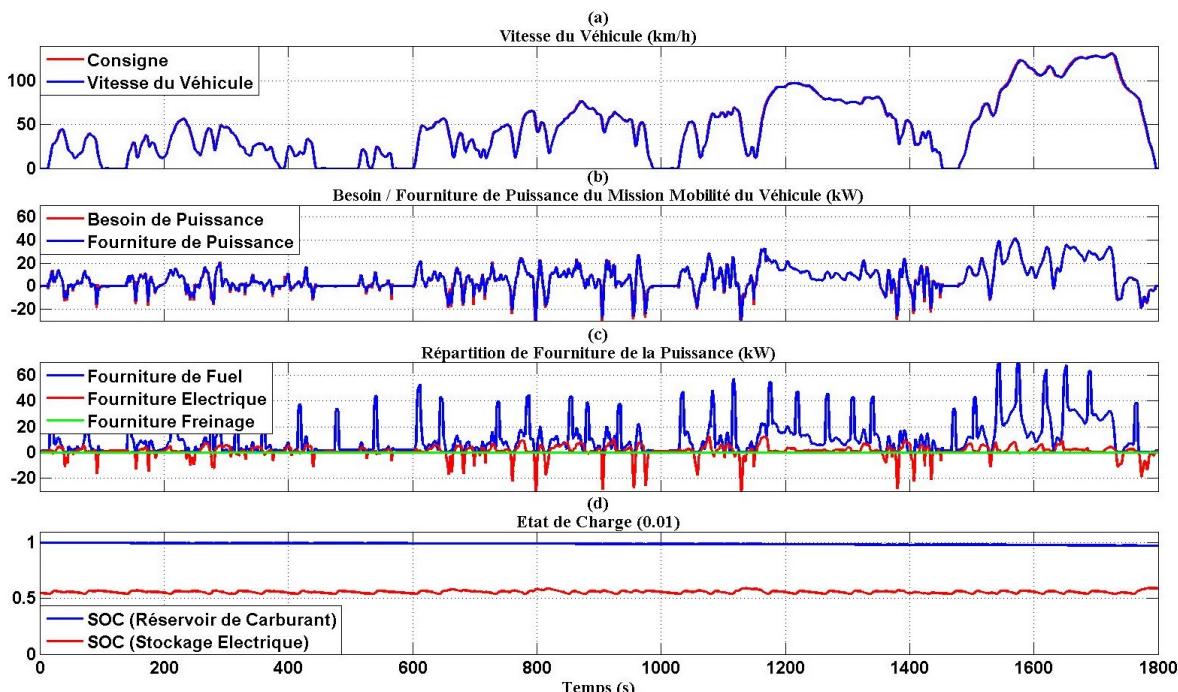


FIGURE 5.20 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation ».

Cet essai attire les commentaires suivants :

- comme dans le cas du cycle NEDC, la traction électrique est utilisée plus souvent qu'avec la stratégie fondée sur des règles (Figure 5.20(c)).
- la consommation de carburant (Tableau 5.7) est plus importante par rapport à la stratégie fondée sur des règles quelque soit le segment du profil (WLTC) sauf le type de conduite urbain.
- la variation de l'état de charge  $\Delta SOC_e$  sur l'ensemble du cycle WLTC n'est pas négligeable et supérieure à celle obtenue avec la stratégie fondée sur des règles.

- le nombre de cycles allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique est moins important que celui obtenu avec la stratégie fondée sur des règles.
- pour l'ensemble du cycle WLTC et les indicateurs de performance, la stratégie fondée sur des règles semble d'être un meilleur choix que la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation ».

**TABLEAU 5.7 –** Indicateurs de performance avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation » (cycle WLTC).

Critère	WLTC (Urbain)	WLTC (Périurbain)	WLTC (Autoroute)	WLTC (Ensemble)
$Conso_f$	6,4278 l / 100 km	4,1338 l / 100 km	4,6091 l / 100 km	4,6075 l / 100 km
$\Delta SOC_e$	0,0052	-0,0026	-0,0420	-0,0393
$n_{mth}$	12	20	4	36
$Conso_{cor}$	6,3804 l / 100 km	4,1399 l / 100 km	4,7519 l / 100 km	4,6550 l / 100 km

Pour cette simulation, la stratégie de gestion d'énergie de type PFC fonctionnement en « partage des besoins par priorisation » (côté sources) peut être choisi selon deux fonctionnements possibles :

- fonctionnement « partage de besoins par priorisation avec la prédiction de puissance maximale disponible »,
- fonctionnement « boost ».

Les résultats illustrés par les enregistrements donnés sur la Figure 5.19 et la Figure 5.20, sont obtenus en simulation avec le fonctionnement de répartition des besoins. Dans le cas du cycle WLTC, la consommation est supérieure à celle obtenue avec la stratégie fondée sur des règles.

A titre comparatif, ces résultats sont complétés avec ceux obtenus avec le fonctionnement « boost », montrés en Figure 5.21 et Tableau 5.8.

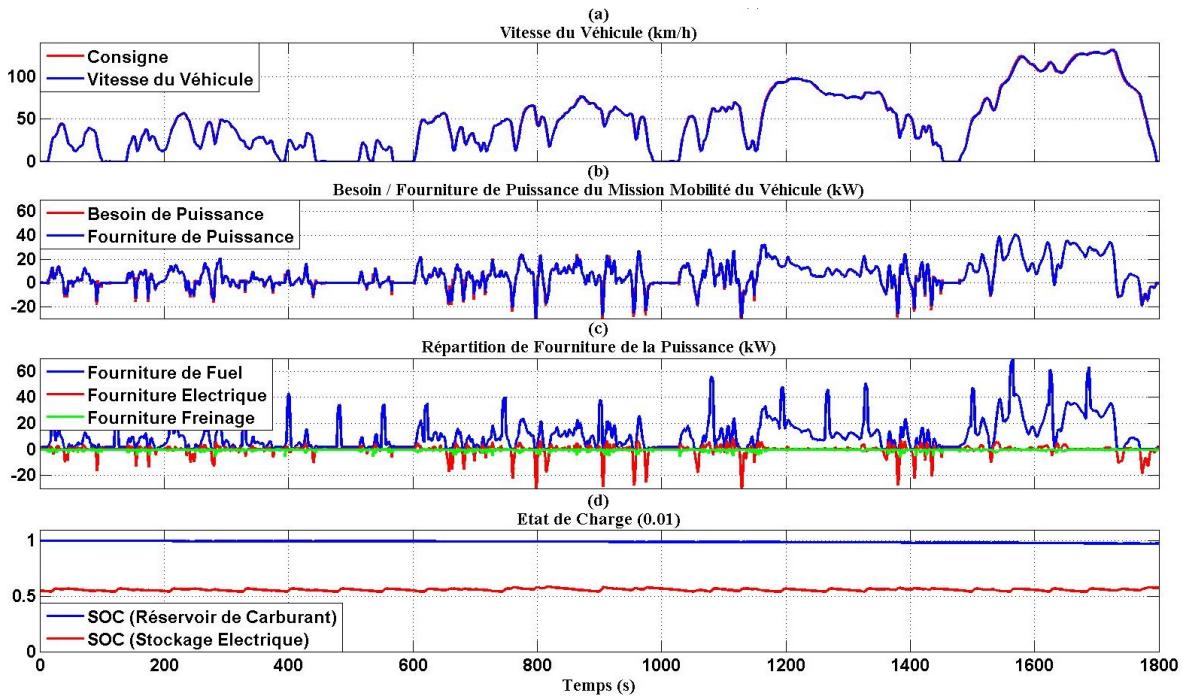


FIGURE 5.21 – Résultats de simulation en cycle du WLTC obtenus à partir de la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement « boost ».

Ces résultats, obtenus avec le fonctionnement « boost », attirent les commentaires suivants :

- le comportement et la répartition du besoin (puissance/énergie) sont différents pour les deux types de stratégies proposées. En fonctionnement de « partage des besoins par priorisation », l'énergie électrique pour la traction est plus importante que celle nécessaire avec le fonctionnement « boost » (Figure 5.20 .(c) et Figure 5.21 .(c)).
- la consommation de carburant est plus faible que celle obtenue avec le fonctionnement de « partage des besoins par priorisation » (sauf sur le segment urbain) et la stratégie fondée sur des règles (sauf sur le segment périurbain).
- le nombre de cycles d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique est également moins important que pour les autres approches proposées.

TABLEAU 5.8 – Indicateurs de performance pour la stratégie fondée sur la PFC, fonctionnement « boost » (WLTC).

Critère	WLTC (Urbain)	WLTC (Périurbain)	WLTC (Autoroute)	WLTC (Ensemble)
<i>Conso<sub>f</sub></i>	6,4059 l / 100 km	4,1056 l / 100 km	4,4667 l / 100 km	4,5396 l / 100 km
$\Delta SOC_e$	-0,0018	-0,0132	-0,0091	-0,0240
<i>n<sub>mth</sub></i>	11	15	4	30
<i>Conso<sub>cor</sub></i>	6,4218 l / 100 km	4,1366 l / 100 km	4,4975 l / 100 km	4,5685 l / 100 km

Ces résultats permettent d'effectuer une analyse préliminaire pour le choix de la stratégie de gestion d'énergie d'un VEH en comparant les indicateurs de performances selon les

différentes stratégies et selon pour une condition de fonctionnement nominale.

Afin de pouvoir faire une comparaison plus détaillée incluant différentes conditions de fonctionnement et des variations des états initiaux, les indicateurs de performances sont calculés et présentés en [Section 5.4](#).

## 5.4 Comparaison des résultats

Afin de pouvoir comparer les stratégies de gestion d'énergie proposées, des simulations avec différentes missions des consommateurs du véhicule et différentes conditions de fonctionnement ont été effectuées dans la suite. Un autre point à prendre en compte est l'état initial du stockage électrique ( $SOC_{e,init}$ ). Les résultats obtenus sont montrés dans l'[Annexe C](#) :

- Stratégie – 1 correspond à la stratégie fondée sur des règles qui fait la répartition selon la priorité du consommateur ou de la source.
- Stratégie – 2 correspond à la stratégie de gestion d'énergie par la PFC, fonctionnement en « partage des besoins par priorisation ».
- Stratégie – 3 correspond à la stratégie de gestion d'énergie par la PFC, fonctionnement « boost ».

La synthèse comparative de ces résultats de simulation, incluant les différents indicateurs de la performance est représentée graphiquement par la [Figure 5.22](#).

L'objectif essentiel de ces stratégies de gestion d'énergie est de minimiser : la consommation de carburant, la variation de l'état de charge du stockage électrique pour l'estimation de la consommation corrigée et aussi le nombre de cycles d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique. Les résultats de cette comparaison et le choix de la stratégie amèneront à faire certains compromis entre les critères.

La comparaison est effectuée pour différents cas :

- profil du cycle de conduite (NEDC, WLTC),
- selon les segments dans les cycles.

Dans un premier temps, la consommation de carburant est prise en considération et la comparaison est effectuée pour un état initial  $SOC_e$  à 55%.

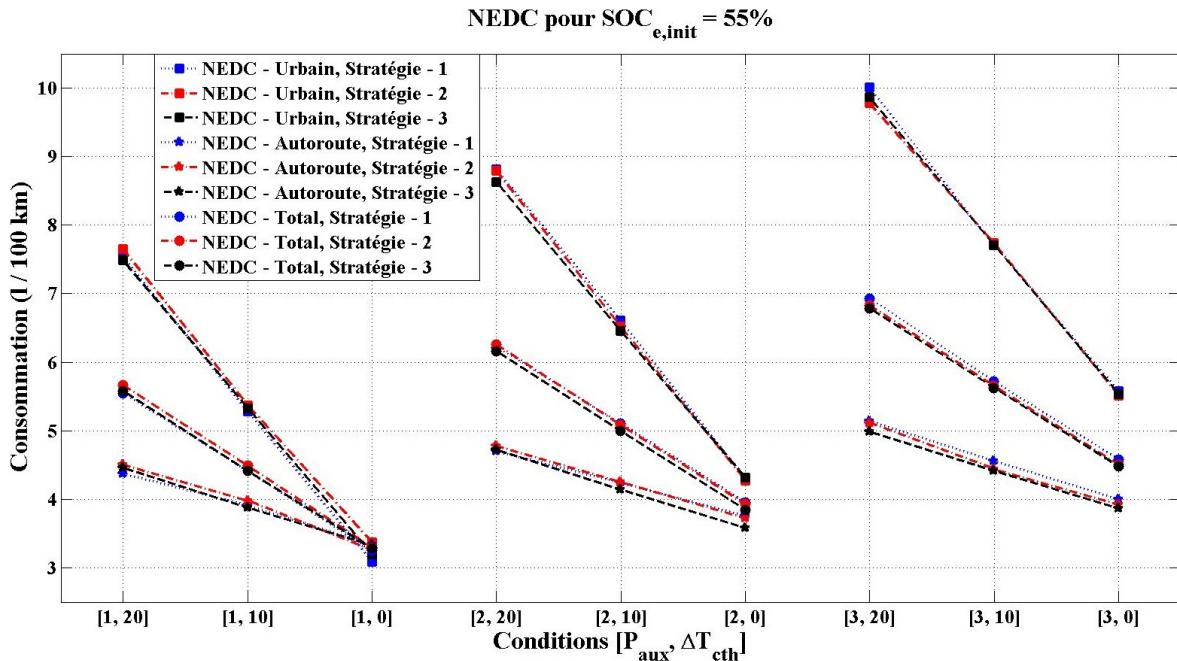
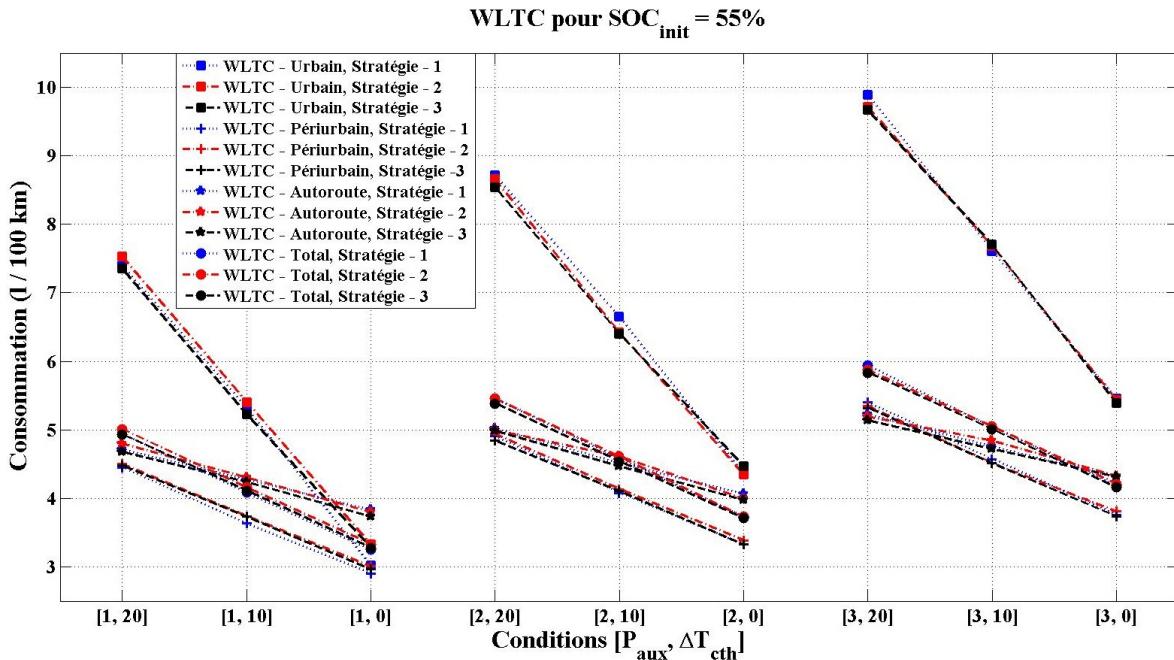


FIGURE 5.22 – Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ .

Les résultats de consommation de carburant pour 100 km sont donnés sur la Figure 5.22. Cet indicateur de performance, calculée dans les conditions de fonctionnement et selon les types de segment (urbain, autoroute) introduits précédemment pour le cycle NEDC attire les remarques suivantes :

- Cas du **segment NEDC – Urbain** : si les conditions de fonctionnement correspondant à une puissance  $P_{aux} = 3$  kW (et pour tous les niveaux de température) sont prises en considération, la consommation est la plus faible avec la Stratégie – 2 avec une amélioration de 0,11 / 100 km (0,31 / 100 km pour la Stratégie – 3 et la Stratégie – 1). Pour les autres conditions de fonctionnement, la Stratégie – 3 semble être l'option qui minimise la consommation de carburant pour ce type de conduite avec des diminutions comprises dans l'intervalle 0,02 et 0,25 l / 100 km.
- Cas du **segment NEDC – Autoroute** : pour ce segment, la Stratégie – 2 donne le moins bon résultat avec la consommation la plus importante avec une augmentation entre 2,5% et 3% sauf pour les conditions de fonctionnement correspondant à  $P_{aux} = 3$  kW. Pour les conditions de fonctionnement avec  $P_{aux} = 2$  kW et 3 kW, la Stratégie – 3 est la stratégie la plus efficace afin de minimiser la consommation de carburant. Concernant les conditions de fonctionnement avec  $P_{aux} = 1$  kW, la Stratégie – 1 est une option à considérer car elle conduit à des consommations inférieures à 0,15 l / 100 km de moins que la Stratégie – 2 et 0,11 / 100 km de moins que la Stratégie – 3 de carburant.
- Cas de l'**ensemble du cycle NEDC** : l'utilisation de la Stratégie – 3 diminue la consommation (entre 0,21 / 100 km et 0,05 l / 100 km) sauf pour la condition de fonctionnement avec  $P_{aux} = 1$  kW où la meilleure option est la Stratégie – 1, mais l'écart avec la Stratégie – 3 est très faible (0,06%).

En conséquence, par rapport à la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  et au type de conduite, la meilleure stratégie qui minimise la consommation semble être la Stratégie - 3. Eventuellement, en se restreignant à certaines conditions bien définies et types de segment, ce choix peut également porter sur Stratégie – 2 et Stratégie – 1.



**FIGURE 5.23** – Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ .

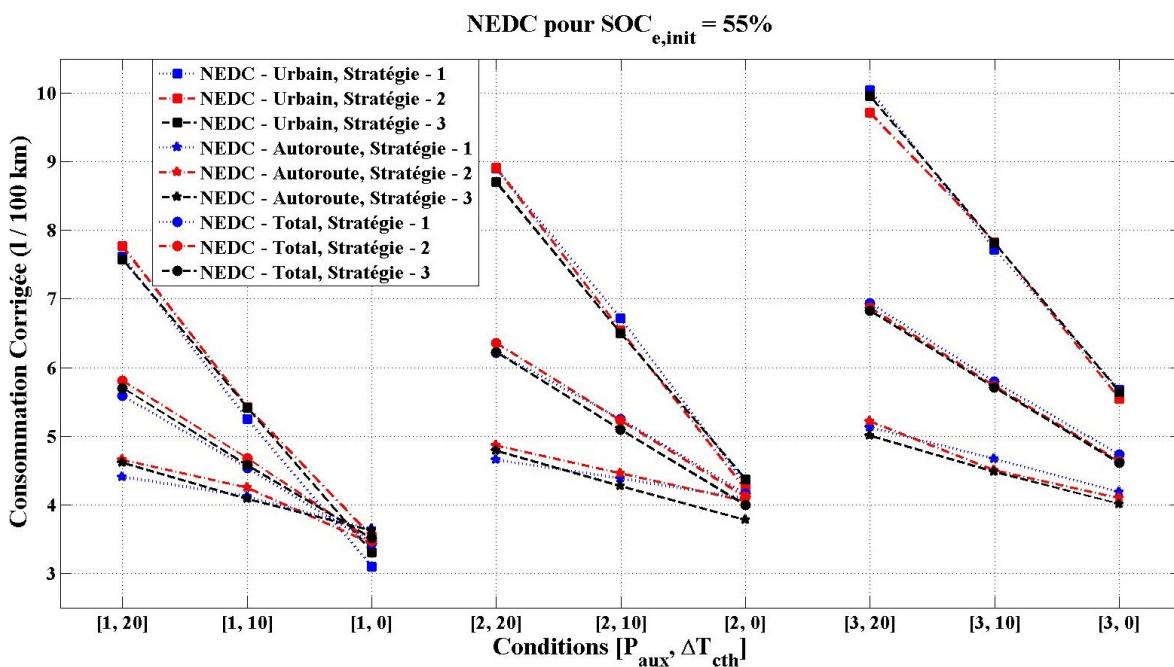
Les résultats de la comparaison donnés sur la [Figure 5.23](#) de la consommation de carburant pour le cycle WLTC sont semblables à ceux de la [Figure 5.22](#) (cycle NEDC). Les observations suivantes peuvent être faites selon les différents segments de ce cycle :

- Cas du **segment WLTC – Urbain** : la Stratégie – 3 semble être la meilleure option afin de minimiser la consommation de carburant. Cependant pour les conditions de fonctionnement correspondant à un écart de température  $\Delta T_{cth} = 0$ , et  $P_{aux} = 2$  kW la Stratégie – 2 a une meilleure performance avec une différence de consommation de 0,25 l / 100 km.
- Cas du **segment WLTC – Périurbain** : exceptée pour la condition de fonctionnement avec  $P_{aux} = 1$  kW, concernant ce segment de conduite, de même que pour le segment urbain, la Stratégie – 3 est celui qui réduit le plus la consommation de carburant avec un gain compris entre 1,2% et 2,5%.
- Cas du **segment WLTC – Autoroute** : exceptée pour les conditions de fonctionnement avec  $P_{aux} = 1$  kW où la Stratégie – 1 minimise la consommation, comme pour les segments antérieurs, la Stratégie – 3 est la stratégie à choisir afin d'obtenir la consommation de carburant la plus faible.
- Cas de l'**ensemble du cycle WLTC** : sur l'ensemble de ce cycle, comme les segments antérieurs, la Stratégie – 3 semble être le meilleur choix pour toutes les conditions de

fonctionnement (sauf éventuellement pour la condition de fonctionnement  $P_{aux} = 1 \text{ kW}$  où la Stratégie - 1 donne un meilleur niveau de performance).

Des résultats de simulation complémentaires, comprenant la consommation de carburant, permettant de comparer les stratégies de gestion d'énergie pour différents états initiaux de  $SOC_e$ , sont donnés en [Annexe C](#). Ces résultats peuvent guider le choix de la stratégie de gestion d'énergie, car la stratégie mise en place peut modifier la consommation de carburant selon l'état initial de  $SOC_e$ . Néanmoins, les résultats de simulation montrent que le niveau de performance global est similaire pour toutes les stratégies pour les différents états initiaux du système, même si les indicateurs de performances diffèrent selon les cas. Cela peut aussi dépendre aux limitations et exigences définis par le concepteur.

Néanmoins, afin de retenir la stratégie offrant la meilleure efficacité, la consommation de carburant ne doit pas être le seul critère à prendre en compte. Pour affiner les analyses des performances du véhicule de façon plus précise, les autres critères à considérer (variation de l'état de charge pour l'estimation de la consommation corrigée et nombre du cycles allumage/arrêt) sont présentés ci-après.



**FIGURE 5.24 –** Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ .

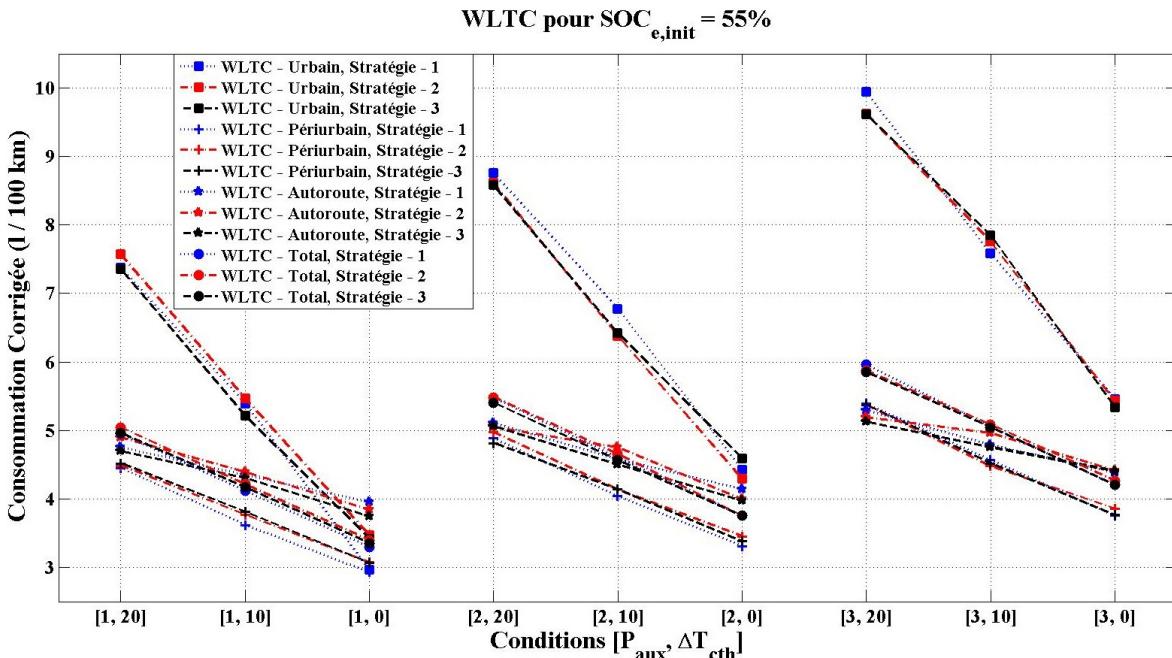
La variation de l'état de charge  $SOC_e$  est un autre critère à prendre en considération afin d'obtenir une estimation sur la consommation d'énergie réelle du véhicule (consommation corrigée). La correction permettant d'obtenir cette consommation est réalisée par la relation donnée précédemment ([Section 5.2.2](#), relation pour  $Conso_{cor}$ ). La [Figure 5.24](#) montre les consommations pour différentes conditions de fonctionnement dans le cas du cycle NEDC avec un état initial de  $SOC_e$  de 55%. Pour cet indicateur, la stratégie qui conserve l'état initial en fin de déplacement (c'est-à-dire n'augmente pas la consommation de carburant totale),

diffère selon le segment du cycle NEDC considéré. Les remarques suivantes peuvent être faites :

- Cas du **segment NEDC – Urbain** : dans ce segment, la consommation de carburant augmente légèrement due à la variation d'état de charge  $SOC_e$  pour toutes les stratégies. La Stratégie – 2 est la solution qui offre la consommation de carburant minimale. Le gain en consommations de carburant se situe dans un intervalle 0,01 l / 100 km et 0,15 l / 100 km. Cette valeur n'est pas négligeable pour une consommation de 3 l / 100 km (5%).
- Cas du **segment NEDC – Autoroute** : pour les conditions correspondant à un écart de température  $\Delta T_{cth} = 0$ , la Stratégie – 2 conserve le mieux l'état initial de  $SOC_e$ . On peut observer que la différence entre les consommations estimée et corrigée est très faible. Contrairement au segment urbain de ce cycle, pour les conditions de fonctionnement avec  $P_{aux} = 1 \text{ kW}$  et  $\Delta T_{cth} = 20^\circ\text{C}$ , la Stratégie – 1 conduit aux meilleurs résultats avec une augmentation plus faible de la consommation de carburant que celle obtenue avec les autres stratégies pour une valeur de 0,03 l / 100 km.
- Cas de l'**ensemble du cycle NEDC** : concernant l'ensemble du cycle NEDC, toutes les stratégies de gestion d'énergie augmentent la consommation de carburant pour presque toutes les conditions de fonctionnement. A noter qu'exceptée la condition de fonctionnement avec  $\Delta T_{cth} = 20^\circ\text{C}$ , la Stratégie – 3 est la plus performante vis-à-vis de la consommation de carburant.

Pour résumer, la Stratégie – 1 est l'option qui assure la meilleure conservation de l'état de charge initial du stockage électrique en fin des segments de conduite et aussi sur l'ensemble du cycle. Ce résultat est obtenu par la différence de consommation de carburant estimée et corrigée. Toutefois, la consommation de carburant est minimisée par la Stratégie – 3 et elle est suivie par la Stratégie – 2.

Pour compléter ces résultats, une analyse de l'indicateur de variation de l'état de charge sur le cycle WLTC est effectuée et les résultats obtenus sont illustrés sur la [Figure 5.25](#). D'une façon semblable au cas précédent, les simulations sont également effectuées avec un état de charge initial de 55%.



**FIGURE 5.25 –** Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ .

A partir de ces résultats, les réflexions suivantes peuvent être faites :

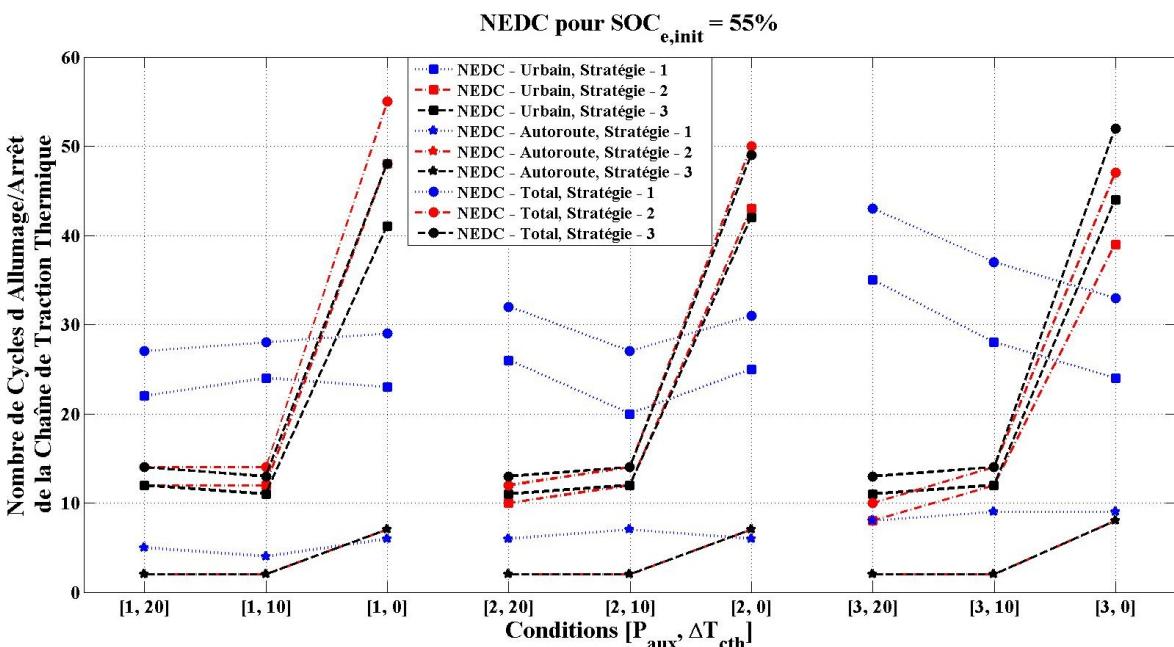
- Cas du **segment WLTC – Urbain** : concernant ce segment, avec les conditions de fonctionnement avec une écart de température  $\Delta T_{cth} = 20^\circ\text{C}$ , il résulte que la Stratégie – 2 conduit à une diminution de la consommation de carburant de 0,07 l / 100 km en moyenne. Pour les autres conditions de fonctionnement, sauf la condition avec  $P_{aux} = 3$  kW et  $\Delta T_{cth} = 10^\circ\text{C}$  où les Stratégies 2 et 3 augmentent la consommation de 0,12 l / 100 km et 0,15 l / 100 km respectivement, la stratégie la plus performante reste la Stratégie – 2 avec une diminution de la consommation comprise entre 1% et 3%. Même pour les conditions de fonctionnement avec  $P_{aux} = 1$  kW la Stratégie – 1 diminue très légèrement la consommation de carburant, ainsi la Stratégie – 2 semble d'être le meilleur choix pour ce type de segment.
- Cas du **segment WLTC – Périurbain** : les performances des stratégies ne changent pas la consommation de carburant estimée essentiellement. Néanmoins, pour la Stratégie – 1, une faible baisse de 0,5% peut être notée.
- Cas du **segment WLTC – Autoroute** :
  - la Stratégie – 3 semble d'être la plus performante pour toutes les conditions de fonctionnement; elle conduit à une augmentation de la consommation corrigée plus faible que celle obtenue avec les autres stratégies,
  - pour la condition de fonctionnement avec  $P_{aux} = 3$  kW et  $\Delta T_{cth} = 20^\circ\text{C}$ , la consommation de carburant diminue avec cette stratégie de 0,02 l / 100 km,
  - sauf pour les conditions de fonctionnement avec  $P_{aux} = 3$  kW et  $\Delta T_{cth} = 20^\circ\text{C}$  et  $P_{aux} = 2$  kW et  $\Delta T_{cth} = 0^\circ\text{C}$ , la Stratégie – 2 est la moins performante avec une

augmentation de la consommation de carburant entre 0,04 l / 100 km et 0,15 l / 100 km, lesquelles sont plus importantes que celle-ci obtenues avec la Stratégie – 1 ( 0,04 l / 100 km et 0,09 l / 100 km).

- Cas de l'**ensemble du cycle WLTC** : enfin, sur l'ensemble de ce cycle, la stratégie qui conduit au meilleur niveau de performance est la Stratégie – 1 avec une augmentation maximale très faible de 0,03 l / 100 km contrairement aux autres stratégies (0,05 l / 100 km pour la Stratégie – 2 et elle est 0,08 l / 100 km pour la Stratégie – 3).

Pour résumer ces observations, en considérant la variation de l'état de charge du stockage électrique pour l'estimation de la consommation de carburant corrigée, l'utilisation de la stratégie de gestion d'énergie avec la Stratégie – 1 conduit aux meilleurs résultats. Mais les différences observées sont relativement légères, ainsi le choix de la stratégie de gestion d'énergie est délicat à effectuer avec les seules données issues de la consommation corrigée par la variation de l'état de charge du stockage électrique.

Il reste enfin à considérer les résultats du nombre de cycles d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique pour compléter l'analyse sur les trois critères retenus. D'une façon semblable aux conditions de simulations effectuées précédemment, ce critère est également pris en compte pour un état de charge initial de 55%. Des résultats complémentaires avec des états initiaux (40% et 70%) sont donnés en [Annexe C](#).



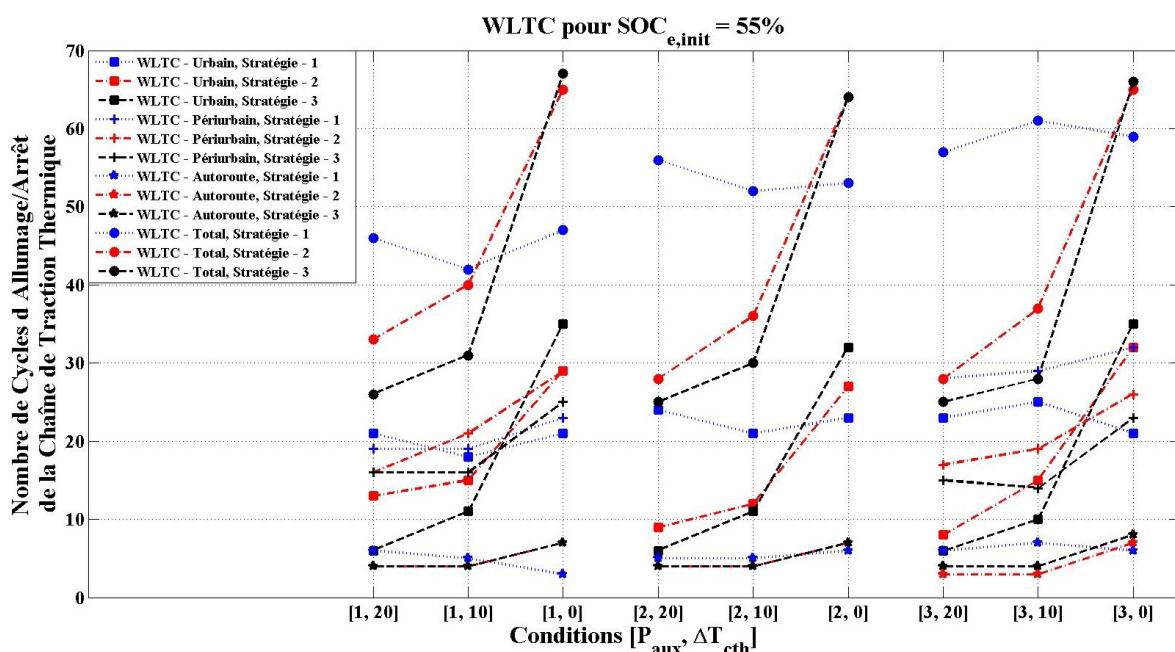
**FIGURE 5.26 –** Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ .

Le critère du nombre de cycles d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique est un critère important afin de réduire la consommation de carburant car le moteur thermique peut avoir un rendement très faible lors de l'allumage (cet impact n'est pas pris en compte par les résultats calculés ou obtenus). Un autre aspect à prendre en compte est le confort

mécanique du véhicule, car l'augmentation du nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique peut également diminuer ce confort. Pour les véhicules conventionnels cette mission (confort mécanique) peut se traduire par des niveaux vibratoires gênants. Ainsi, l'augmentation du nombre de cycles d'allumage/arrêt peut prendre une place importante pour le choix de la stratégie de gestion d'énergie.

- Cas du **segment NEDC – Urbain** : sur ce segment, excepté pour les cas correspondant à un écart de température  $\Delta T_{cth} = 0^\circ\text{C}$ , la Stratégie – 1 est celle qui présente la meilleure performance sur ce critère conduisant à un nombre de cycles inférieur de 25% et 50% à celui obtenu avec les autres stratégies. Pour les autres conditions de fonctionnement, les Stratégies 2 et 3 mènent à un nombre de cycles inférieur de 50% à celui obtenu avec la Stratégie – 1.
- Cas du **segment NEDC – Autoroute** : contrairement au segment urbain, pour les cas correspondant à  $\Delta T_{cth} = 0^\circ\text{C}$ , la Stratégie – 1 n'est pas toujours la stratégie qui conduit au plus faible nombre de cycle d'allumages/arrêt. Sur ce segment, comme le segment urbain de ce cycle, les Stratégies 2 et 3 donnent des résultats similaires.
- Cas de l'**ensemble du cycle NEDC** : en prenant en compte l'ensemble des conditions de fonctionnement, les Stratégies 2 et 3 donnent un nombre de cycle relativement faible ( 50% inférieur à celui obtenue avec la Stratégie – 1) sauf pour les conditions de fonctionnement avec  $\Delta T_{cth} = 0^\circ\text{C}$ , où le meilleur choix est la Stratégie – 1 (entre 30% et 45% de cycles en moins).

Il reste enfin à effectuer la comparaison de l'indicateur de performance du nombre de séquences d'allumage  $n_{mth}$  pour le cycle WLTC et ses segments associés. Les résultats de cette comparaison sont illustrés dans [Figure 5.27](#).



**FIGURE 5.27** – Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$ .

En partant de ces résultats, les commentaires suivants peuvent être effectués :

- Cas du **segment WLTC – Urbain** : pour les conditions correspondant à un écart de température  $\Delta T_{cth} = 0^\circ\text{C}$ , la Stratégie – 1 est celle qui diminue cet indicateur (avec une différence de 20%). En revanche, pour les autres conditions de fonctionnement, la Stratégie – 3 est celle qui conduit au meilleur niveau de performance.
- Cas du **segment WLTC – Périurbain** : concernant ce segment, toutes les stratégies conduisent sensiblement au même niveau de performance (avec des différences d'environ 5% et 10%).
- Cas du **segment WLTC – Autoroute** : comme dans le cas précédent, le niveau de performance est sensiblement le même pour toutes les stratégies.
- Cas de l'**ensemble du cycle WLTC** : sur l'ensemble de ce cycle, pareillement au segment urbain, les Stratégies – 2 et 3 sont celles qui minimisent ce critère. A noter éventuellement que pour les conditions de fonctionnement avec  $\Delta T_{cth} = 0^\circ\text{C}$ , il est préférable de choisir la Stratégie – 1 car les niveaux de performances de la Stratégie – 2 et 3 sont inférieurs (avec une augmentation comprise entre 6 et 32 cycles).

En prenant en compte tous les critères d'évaluation de la performance du véhicule, c'est-à-dire la consommation de carburant, la variation de l'état de charge SOCe pour la consommation de carburant corrigée et le nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique, la stratégie de gestion d'énergie peut se différencier selon les cycles de conduite et leurs segments constitutifs. Dans le **Tableau 5.9**, une comparaison des stratégies est proposée (pour chaque segment et condition de fonctionnement, un indicateur de performance est utilisé en incrémentant de 1 l'indicateur de la stratégie qui donne la meilleure performance pour le critère considéré).

**TABLEAU 5.9** – Comparaison des stratégies de gestion d'énergie selon les critères et segments de conduit.

Segment de conduit	Stratégie – 1	Stratégie – 2	Stratégie – 3
NEDC – Urbain	4	13	10
NEDC – Autoroute	7	10	10
NEDC – Ensemble	8	6	13
WLTC – Urbain	5	7	15
WLTC – Périurbain	9	6	12
WLTC – Autoroute	8	8	11
WLTC – Ensemble	11	4	12

La Stratégie – 3 semble être la plus performante sur la gestion d'énergie. Pour le segment de conduit urbain pour le cycle NEDC, la Stratégie – 2 peut aussi être prise en compte. Le choix de la stratégie sera ainsi un compromis entre les critères de performance du véhicule,

en prenant en compte les exigences définies par l'utilisateur. Donc ce choix peut différer entre les critères et les segments de conduite selon le conducteur.

Bien sûr, cette conclusion doit être modéré sur un cycle uniquement autoroutier car dans ce cas, le nombre de cycle d'allumage/d'arrêt est en théoriquement nul.

## 5.5 Conclusions partielles

Dans ce chapitre, les définitions des cas d'étude, la gamme et l'architecture d'un VEH, la modélisation et la simulation du VEH en prenant en compte ses modèles fonctionnels et multi-physiques ont été abordés. Des premières simulations ont permis d'aboutir à un ensemble de résultats afin de permettre une analyse comparative du niveau de performance obtenu selon la stratégie de gestion d'énergie proposée et cela pour différents états initiaux et des conditions variées.

Dans la première partie, les cas d'étude permettant de mener les simulations en détaillant les cycles de conduite NEDC et WLTC (et en prenant en compte aussi leur type de conduite : urbain et autoroute pour le cycle NEDC, urbain, périurbain et autoroute pour le cycle WLTC), afin de satisfaire la mission de mobilité, ont été introduits. Ces missions contiennent :

- le mouvement du véhicule avec sa dynamique afin d'évaluer le besoin de puissance nécessaire.
- les autres consommateurs, notamment le confort thermique et l'auxiliaire électriques, dont les cas d'étude définis sont :
  - la mission de l'effecteur confort thermique afin d'assurer une température de cabine du véhicule à 20°C pour des températures extérieures de 0°C, 10°C et 20°C.
  - la mission de l'Auxiliaire Electrique maintenant une consommation constante entre 1kW et 3kW pour fournir l'énergie nécessaire aux autres consommateurs d'énergie électrique du véhicule (par exemple la climatisation ou autoradio).

Dans cette section, pour les besoins de la définition des cas d'étude, la gamme et l'architecture de la chaîne de traction d'un VEH ont également été précisées.

Dans la deuxième section, le développement de la modélisation du VEH pour la simulation a été pris en considération. Les modèles fonctionnels de deux types de véhicules VEHs (incluant des architectures complexe et parallèle rechargeable) avec leurs paramétrages et les modèles multi-physiques du VEH choisi pour illustrer les cas d'étude ont été établis. Cette partie est conclue par une comparaison des premiers résultats avec les données obtenues au moyen d'informations données par le constructeur automobile. Les études effectuées en simulation ont permis de conclure sur la validité des modèles et leurs architectures. Les conditions de simulation ont été faites avec comme fil conducteur de conserver un état de charge du stockage électrique entre les débuts et la fin des cycles de conduite.

Dans la troisième section de ce chapitre, l'approche pour construire l'architecture de commande, et l'interconnexion entre les modèles fonctionnel et multi-physiques ont été détaillées pour chaque élément fonctionnel. Après cette interconnexion entre les différents niveaux de modélisation, l'architecture de commande est renforcée par la gestion d'énergie avec la stratégie fondée sur des règles, laquelle se forme par la priorisation et enfin par la gestion d'énergie fondée sur l'approche PFC avec les modes de fonctionnement « boost » et « partage des besoins par priorisation ».

Ces stratégies de gestion d'énergie abordées dans le [Chapitre 4](#), ont été implantées en utilisant le modèle validé au préalable. Enfin, les consommations de carburant ainsi que les critères, complémentaires portant sur la variation d'état de charge  $SOC_e$  et le nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique ont été utilisés afin d'évaluer le niveau de performance pour chaque stratégie.

Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre afin de faire une analyse détaillée et faciliter le choix entre les stratégies de gestion d'énergie proposées, des résultats obtenus au moyen de simulations additionnelles ont été présentés selon différents cas d'étude. Un ensemble de résultats pour les critères proposés et pour les deux cycles (NEDC et WLTC) ont été comparés. Une comparaison générale des stratégies selon les segments de conduite est faite en utilisant un indicateur global calculé selon le niveau de performance (selon chaque critère : consommation, consommation corrigée et nombre de cycles allumage/arrêt) obtenu par chaque stratégie. Excepté sur le segment urbain du cycle NEDC d'un point de vue général, la meilleure stratégie semble être celle faisant appel à une approche PFC *fonctionnement « boost »*. Cette stratégie est fondée sur la commande prédictive fonctionnelle (PFC) faisant appel à l'utilisation de la chaîne de traction électrique plus particulièrement lors des demandes importantes de transitoires de puissance. Dans certains cas, le choix peut être affiné avec des compromis sur certains critères afin d'aboutir à une meilleure performance.

# Conclusions et perspectives

## Conclusions

Les avancées technologiques et les changements de normes guident les besoins des industriels du secteur automobile. Ces besoins sont :

- la diminution du temps nécessaire à l'industrialisation en prenant en compte :
  - la création d'un lien entre la spécification et l'évaluation,
  - l'utilisation de méthodes de modélisation d'un niveau d'abstraction juste nécessaire,
- la développement d'une solution à l'optimisation et la gestion d'énergie pour être compatible avec les normes et capable de satisfaire les attentes des utilisateurs pour les véhicules électrifiés.

Afin de répondre aux besoins cités précédemment, les travaux de cette thèse sont orientés sur trois axes :

- état de l'art sur les formalismes de modélisation, les méthodes de gestion d'énergie et sur les composants d'un véhicule hybride,
- définition d'un formalisme énergétique modulaire (niveau fonctionnel), suivi par la construction d'une architecture de commande fondée sur le formalisme illustré,
- proposition et développement de trois stratégies de gestion des ressources et leur intégration dans le niveau de modélisation présenté.

Nous avons complété ces points par les travaux suivants :

- développement d'une librairie pour l'intégration dans un outil de simulation pour le formalisme défini,
- développement d'un démonstrateur d'un véhicule hybride pour la validation du formalisme et permettant ainsi une comparaison des performances entre les stratégies proposées.

Au niveau de l'état de l'art, après avoir étudié les formalismes de modélisation existants et les méthodes d'optimisation énergétique des véhicules hybrides, le système global a été pris en charge et une compréhension du modèle du véhicule et tous ses éléments constitutifs ont été créées. Ensuite, les architectures de la chaîne de traction d'un véhicule hybride (Séries, Parallèle, Série-Parallèle, Complexe etc.) ont été étudiées. De plus, une recherche de normes sur les cycles de conduite européens (les cycles NEDC et WLTC) utilisés pour l'évaluation des performances du véhicule ainsi que les missions du véhicule (déplacement, confort thermique et auxiliaires électrique) a été effectuée. Enfin, à ce niveau des travaux, les gammes de véhicules hybrides commercialisées en France ont été considérées. Les informations obtenues lors de ces recherches ont cadré la suite des travaux de thèse pour la modélisation et la gestion énergétique.

Concernant la définition d'un formalisme de modélisation au niveau fonctionnel, nous avons proposé trois niveaux de modélisation : *i*) modélisation télologique, *ii*) modélisation fonctionnelle et *iii*) modélisation multi-physique. Dans le cadre de cette thèse, l'importance a été donnée à la modélisation fonctionnelle. Ensuite, nous avons spécifié les ports (source et consommateur), les flux à échanger (énergie, matière et information) et enfin les sémantiques de la modélisation fonctionnelle avec cinq éléments de base : source, stockage, distributeur, transformateur et effecteur (les fonctions clés d'un système énergétique). Avec ces éléments de base, tous les systèmes énergétiques peuvent être modélisés. Cette approche a été illustré par un exemple de traitement des eaux d'un bâtiment et celui d'un véhicule hybride en utilisant les mêmes types d'éléments.

Les avantages du formalisme proposé sont :

- des éléments possèdent des relations caractéristiques relativement simples (par rapport au niveau multi-physique),
- le lien entre les éléments est créé par des ports source et consommateur, lesquelles ajoutent la possibilité de modularité,
- les comportements énergétiques sont pris en considération (comme le rendement par exemple),
- ce formalisme représente le système dans sa globalité (c'est-à-dire physique et contrôle),
- ce formalisme permet une évaluation rapide (par rapport au niveau multi-physique) afin de :
  - sélectionner les solutions d'architectures fonctionnelles,

- dimensionner les groupes de composants,
- proposer des stratégies de gestion des ressources.

Le formalisme défini a été implanté en standardisant les ports et flux échangés dans une librairie spécifique (PhiEMI) dans l'environnement Matlab/Simulink pour les simulations et la validation. Dans la modélisation fonctionnelle illustrée dans le cadre de la thèse, le rôle important des distributeurs est ainsi pris en compte. Ces éléments sont les uniques éléments n'ayant pas de perte ou de transformation d'énergie, ils sont utilisés pour connecter les multi-sources/multi-consommateurs. Le rôle du distributeur est de faire le lien entre ces sous-systèmes et de faire la répartition d'énergie fournie entre les consommateurs et d'assurer l'allocation de besoin entre les sources selon la stratégie implantée.

Suite aux définitions des éléments de base de la modélisation fonctionnelle, la définition de l'architecture de commande fondée sur le niveau fonctionnel d'un système multi-physique a été introduite. En utilisant le modèle fonctionnel développé pour la gestion des ressources en commande cascade, l'abstraction de ce modèle a été abordée. La problématique d'échange des flux (entre énergie pour le niveau fonctionnel et physique pour le niveau multi-physique) est résolue en l'illustrant pour u cas d'étude d'un véhicule électrique avec une interface d'interconnexion. De plus, la création et la paramétrisation d'un élément fonctionnel à partir d'un groupe de composants multi-physiques ont été abordées avec un exemple de la chaîne de traction thermique et l'élément transformateur F-à-M. Cela est nécessaire afin de créer et d'adapter le modèle fonctionnel au niveau multi-physique selon les changements de composant ou de paramétrisation pour l'utilisation de la gestion globale de ressources.

Puis, le formalisme du problème d'optimisation a été évoqué avec la gestion fonctionnelle des ressources (traitement fonctionnel) fondée sur l'approche PFC. Ici, nous avons divisé le problème de répartition d'énergie fournie et l'allocation de besoins d'un système multi-sources/multi-consommateurs en deux sous-systèmes : *i*) un sous-système de mono-source/multi-consommateurs et *ii*) un sous-système de multi-sources/mono-consommateurs. Avec cette division, une stratégie pour le premier cas fondée sur une approche PFC est proposée. Pour le deuxième cas, deux types de fonctionnements sont présentés : *i*) fonctionnement boost et *ii*) fonctionnement partage de besoins par priorisation.

Ces travaux ont été suivis par l'application à l'optimisation énergétique d'un VEH. Dans un premier temps, nous avons commencé par les définitions d'un cas d'étude contenant les missions, les conditions de fonctionnement et les indicateurs de performance. Les indicateurs de performance afin de pouvoir faire une analyse du véhicule sont : *i*) la consommation de carburant, *ii*) le nombre de cycles d'allumage/arrêt et *iii*) la consommation corrigée (qui est une fonction de la consommation de carburant et de la variation de l'état de charge du stockage électrique). Par la suite, nous avons présenté les modèles fonctionnel et multi-physique avec ses détails ainsi que leur paramétrage et la partie modélisation a été complétée par la comparaison des résultats et la validation du modèle et l'architecture du VEH choisi. Cela a été suivi par l'introduction des relations utilisées dans chaque interface d'interconnexion pour tous les éléments fonctionnels entre deux niveaux de modélisation.

Suite à l'interconnexion et à la validation des modèles, nous avons proposé trois stratégies de gestion d'énergie implantées dans le distributeur :

1. Gestion d'énergie fondée sur des règles (stratégie heuristique),
2. Gestion d'énergie fondée sur PFC fonctionnement boost,
3. Gestion d'énergie fondée sur PFC fonctionnement partage de besoins par priorisation.

Avec l'implantation de ces stratégies dans le modèle développé, une comparaison selon différentes conditions de fonctionnement et segments de conduite a été effectuée. Selon les résultats, la stratégie de gestion d'énergie fondée sur PFC avec la fonctionnement boost est le meilleur choix si les indicateurs de performance choisis sont pris en considération.

Ainsi, les contributions principales des travaux de cette thèse peuvent être résumées de la façon suivante :

- Création d'un lien avec une méthodologie de modélisation entre différents niveaux de modélisation : spécification (niveau téléologique) et évaluation (niveau multi-physique),
- définition d'un niveau de modélisation qui permet au concepteur d'avoir une première évaluation sans l'information des composants,
- diminution du temps de simulation pour les décisions avec des modèles du véhicule relativement simples,
- construction d'une architecture de commande en cascade pour faciliter la problématique de gestion de ressources,
- développement d'une librairie spécifique pour la modélisation fonctionnelle et d'un démonstrateur ainsi que trois stratégies de gestion d'énergie d'un véhicule hybride.

## Perspectives

Les finalités des travaux présentés dans ce mémoire ont amené à envisager de perspectives variées pour l'amélioration de la modélisation fonctionnelle, la généralisation de l'interconnexion, le développement des différentes stratégies de gestion de ressources ainsi que la validation du processus proposé en appliquant aux systèmes de types différents.

Les travaux futurs qu'on peut envisager pour faire suite à ces travaux sont :

- Niveau modélisation :
  - augmentation du niveau de complexité des composants du modèle multi-physiques,
  - caractéristique dynamique (autre que premier ordre) de différent éléments fonctionnels afin de se rapprocher des comportements physiques,
- définition et développement des interfaces d'interconnexion généralisés par rapport aux technologies (par exemple transformateur E-à-M et transformateur M-à-E qui peuvent avoir la même interface),
- Au niveau de la stratégie de gestion de ressources :

- la stratégie de gestion de l'énergie fondée sur des règles ou fondée sur PFC sera remplacée par une stratégie plus efficace, fondée sur l'optimisation. Le nouvel algorithme doit être intégré dans les éléments de distribution afin d'assurer une répartition optimale des besoins et des puissances fournies,
  - De plus, la robustesse du système de commande peut également être étudiée.
- Enfin, la méthodologie proposée peut s'appliquer éventuellement à différents types d'applications, comme les systèmes de refroidissement d'un véhicule.



# Bibliographie

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). « Energy Technology Perspectives 2017 - Executive Summary ». In : (2017). URL : <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy-technology-perspectives-2017---executive-summary.html>.
- [2] UNFCCC. « Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change & Call to Action ». In : (2015), p. 1. URL : <http://newsroom.unfccc.int/media/521376/paris-electro-mobility-declaration.pdf>.
- [3] Joshua D MILLER et Cristiano FAÇANHA. « The state of clean transport policy - A 2014 synthesis of vehicle and fuel policy developments ». In : *The ICCT Report* (2014), p. 73.
- [4] Dale HALL, Marissa MOULTAK et Nic LUTSEY. « Electric vehicle capitals of the world ». In : March (2017), p. 57.
- [5] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *EVI - Electric Vehicle Initiative*. URL : <https://www.iea.org/topics/transport/evi/> (visité le 21/03/2018).
- [6] AVERE-France - Association nationale pour le développement de la mobilité électrique. URL : <http://www.averé-france.org/> (visité le 21/03/2018).
- [7] WEVA - World Electric Vehicle Association. (Visité le 21/03/2018).
- [8] AVERE-FRANCE. *Prime à la conversion : mode d'emploi*. 2018. URL : [http://www.averé-france.org/Site/Article/?article\[\\\_\]id=6110](http://www.averé-france.org/Site/Article/?article[\_]id=6110) (visité le 21/03/2018).
- [9] ICCT (INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION). « 2017 Global update : Light-duty vehicle greenhouse gas and fuel economy standards ». In : (2017), p. 36. URL : [http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/2017-Global-LDV-Standards-Update\[\\\_\]ICCT-Report\[\\\_\]23062017\[\\\_\]vF.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/2017-Global-LDV-Standards-Update[\_]ICCT-Report[\_]23062017[\_]vF.pdf).
- [10] ICCT (INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION). « European Vehicle Market Statistics 2017/2018 ». In : (2017). ISSN : 07398859. DOI : [10.1016/j.retrec.2015.06.004](https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.06.004). URL : <http://eupocketbook.theicct.org>.
- [11] Zifei YANG. « Improving the conversions between the various passenger vehicle fuel economy/CO<sub>2</sub> emission standards around the world ». In : *The International Council on Clean Transportation (ICCT)* (2014), p. 1-7. ISSN : 14719185. URL : <http://www.theicct.org/blogs/staff/improving-conversions-between-passenger-vehicle-efficiency-standards>.
- [12] L NTZIACHRISTOS et al. « In-use vs. type-approval fuel consumption of current passenger cars in Europe ». In : *Energy Policy* 67 (2014), p. 403-411. ISSN : 0301-4215. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.013>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513012573>.

- [13] Joachim DEMUYNCK et al. « Recommendations for the new WLTP cycle based on an analysis of vehicle emission measurements on NEDC and CADC ». In : *Energy Policy* 49 (2012), p. 234-242. ISSN : 0301-4215. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.081>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512005101>.
- [14] UNECE. « Global technical regulation No. 15, Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure ». In : *Global Technical Regulation No 15 ECE/TRANS/180/Add.15.* (2014).
- [15] UNECE. « Agreement - Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts ». In : *Regulation No 83 E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.82/* (2015).
- [16] ICCT (INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION). « 2020–2030 CO<sub>2</sub> standards for new cars and light-commercial vehicles in the European Union ». In : October (2017), p. 1-19. URL : <http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\EU-CO2-stds\2020-30\brief\nov2016.pdf>.
- [17] J. BRUNET et al. « A hardware in the loop (HIL) model development and implementation methodology and support tools for testing and validating car engine electronic control unit (ECU) ». In : *International Conference on Simulation Based Engineering and Studies, TCN CAE.* 2005.
- [18] AFIS. *L'INGÉNIERIE SYSTÈME*. 2018. URL : <https://www.afis.fr/pages/accueil.aspx> (visité le 27/03/2018).
- [19] Mert MÖKÜCÜ. « Electric Vehicle Powertrain Design and Implementation ». MSc Thesis. ITU (Istanbul Technical University), 2013.
- [20] SHERPA ENGINEERING. *Control System Validation*. 2018. URL : <https://www.sherpa-eng.com/en/expertise/validation-des-systemes-de-controle-commande/> (visité le 26/03/2018).
- [21] Anu MARIA. « Introduction to modelling and simulation ». In : *Winter Simulation Conference* (1997), p. 7-13. DOI : [10.1109/WSC.1997.640371](https://doi.org/10.1109/WSC.1997.640371).
- [22] Steven P. HAVEMAN et G. Maarten BONNEMA. « Communication of simulation and modelling activities in early systems engineering ». In : *Procedia Computer Science* 44.C (2015), p. 305-314. ISSN : 18770509. DOI : [10.1016/j.procs.2015.03.021](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.021). URL : [http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.021](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.021).
- [23] Henry Martyn PAYNTER. *Analysis and Design of Engineering Systems*. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 1961, p. 303. URL : <http://dirac.ruc.dk/~heine/paynter/analysis\and\design\of\engineering\systems\henry\mf\paynter.pdf>.
- [24] Dean KARNOPOFF et Ronald ROSENBERG. *Introduction to Physical System Dynamics*. McGraw-Hill, 1983.
- [25] Mert MOKUKCU et al. « A New Concept of Functional Energetic Modelling and Simulation ». In : *9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*. Oulu, Finland, 2016, p. 536-541. ISBN : 9781509041190. DOI : [10.1109/EUROSIM.2016.34](https://doi.org/10.1109/EUROSIM.2016.34).
- [26] Jean BRUNET et al. *Procédé de Modélisation d'un Processus Physique*. 1994.
- [27] Alain BOUSCAYROL et al. « Macromodélisation pour les conversions électromécaniques : application à la commande des machines électriques ». In : *Rev. Int. GénieElectrique* 3.2 (2000), p. 257-282.

- [28] Florian DUPRIEZ-ROBIN et al. « Power modeling for the optimization of a marine hybrid propulsion ». In : *International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2009*. Monte-Carlo, Monaco, 2009.
- [29] Éric BIDEAUX et al. « System design using an inverse approach : Application to the hybrid vehicle powertrain ». In : *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), Lavoisier* 40.3 (2006), p. 269-290. DOI : [10.3166/jesa.40.269-290](https://doi.org/10.3166/jesa.40.269-290). URL : <https://jesa.revuesonline.com/article.jsp?articleId=8401>.
- [30] SHERPA ENGINEERING. *PhiSim for Simulink* ®. 2017.
- [31] J.-P. HAUTIER et J. FAUCHER. « Le graphe informationnel causal ». In : *Bulletin de l'Union des Physiciens* 90 (1996), p. 167-189.
- [32] Clément FAUVEL. « Approche modulaire de l'optimisation des flux de puissance multi-sources et multi-clients, à visé temps réel ». Français. Ecole des Mines de Nantes, 2015. DOI : [tel-01245429](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01245429).
- [33] W. LHOMME. « Gestion d'Energie de Véhicules Electriques Hybrides Basée sur la Représentation Energétique Macroscopique ». Thèse de doct. Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007, p. 198.
- [34] Y. CHENG et al. « Field weakening control of a PM electric variable transmission for HEV ». In : *Journal of Electrical Engineering and Technology* 8.5 (2013), p. 1096-1106.
- [35] D. CHRENKO et al. « Inversion-Based Control of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Using Energetic Macroscopic Representation ». In : *ASME. J. Fuel Cell Sci. Technol.* 6.2 (2009). DOI : [10.1115/1.2971133](https://doi.org/10.1115/1.2971133).
- [36] Keyu CHEN. « Common Energetic Macroscopic Representation and Unified Control Structure for Different Hybrid Electric Vehicles ». PhD. Université Lille 1, 2010.
- [37] C.C. CHAN et al. « Powering Sustainable Mobility : Roadmaps of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles ». In : *Proceedings of the IEEE* 97.4 (2009), p. 603-607.
- [38] Alain BOUSCAYROL et P. DELARUE. « Simplifications of the Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with an induction generator ». In : *International Journal of Renewable Energy Engineering* 4.2 (2002), p. 479-485.
- [39] Florian DUPRIEZ-ROBIN. « Dimensionnement d'une Propulsion Hybride de Voilier, basé sur la Modélisation par les Flux de Puissance ». PhD. Université de Nantes, 2010.
- [40] Sanjaka G. WIRASINGHA et Ali EMADI. « Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60.1 (2011), p. 111-122. ISSN : 0018-9545. DOI : [10.1109/TVT.2010.2090178](https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2090178).
- [41] F R SALMASI. « Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles : Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends ». In : *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 56.5 (2007), p. 2393-2404. ISSN : 0018-9545. DOI : [10.1109/TVT.2007.899933](https://doi.org/10.1109/TVT.2007.899933).
- [42] H BANVAIT, S ANWAR et Chen YAOBIN. « A rule-based energy management strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) ». In : *American Control Conference, 2009. ACC '09*. (2009), p. 3938-3943. ISSN : 07431619. DOI : [10.1109/ACC.2009.5160242](https://doi.org/10.1109/ACC.2009.5160242).
- [43] Hyeoun-dong LEE et al. « Torque control strategy for a Parallel-Hybrid vehicle using Fuzzy Logic ». In : *IEEE Industry Applications Magazine December* (2000), p. 33-38. DOI : [10.1109/87.897218](https://doi.org/10.1109/87.897218).
- [44] Abdoulaye PAM et al. « Rule-based Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Vehicle deduced from Dynamic Programming ». In : (2017).

- [45] Yanjun HUANG et al. « Model predictive control power management strategies for HEVs : A review ». In : *Journal of Power Sources* 341 (2017), p. 91-106. ISSN : 03787753. DOI : [10.1016/j.jpowsour.2016.11.106](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.11.106). URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.11.106>.
- [46] Antonio SCIARRETTA, Michael BACK et Lino GUZZELLA. « Optimal control of parallel hybrid electric vehicles ». In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12.3 (2004), p. 352-363. ISSN : 10636536. DOI : [10.1109/TCST.2004.824312](https://doi.org/10.1109/TCST.2004.824312).
- [47] G. PAGANELLI et al. « Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains ». In : *IEEE Vehicular Technology Conference* 4 (2002), p. 2076-2081. ISSN : 07400551. DOI : [10.1109/VTC.2002.1002989](https://doi.org/10.1109/VTC.2002.1002989).
- [48] J. T.B.A. KESSELS, M. W.T. KOOT et P. P.J. VAN DEN BOSCH. « Optimal adaptive solution to powersplit problem in vehicles with Integrated Starter/Generator ». In : *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2006* (2006). DOI : [10.1109/VPPC.2006.364362](https://doi.org/10.1109/VPPC.2006.364362).
- [49] Shuo ZHANG, Rui XIONG et Fengchun SUN. « Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system ». In : *Applied Energy* 185 (2017), p. 1654-1662. ISSN : 03062619. DOI : [10.1016/j.apenergy.2015.12.035](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.035). URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.035>.
- [50] Cristina VLAD. « Commande prédictive des systèmes hybrides et application à la commande de systèmes en électronique de puissance. » Thèse de doct. Supélec, 2013.
- [51] A. TAGHAVIPOUR et al. *Predictive power management strategy for a PHEV based on different levels of trip information*. T. 45. 30. IFAC, 2012, p. 326-333. ISBN : 9783902823168. DOI : [10.3182/20121023-3-FR-4025.00026](https://doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00026). URL : <http://dx.doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00026>.
- [52] Daliang SHEN, Valerie BENSCHE et Steffen MÜLLER. « Model predictive energy management for a range extender hybrid vehicle using map information ». In : *IFAC-PapersOnLine* 28.15 (2015), p. 263-270. ISSN : 24058963. DOI : [10.1016/j.ifacol.2015.10.038](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.038).
- [53] A. SCIARRETTA et L. GUZZELLA. « Control of hybrid electric vehicles ». In : *IEEE Control Systems* 27.2 (2007), p. 60-70. ISSN : 1066-033X. DOI : [10.1109/MCS.2007.338280](https://doi.org/10.1109/MCS.2007.338280). URL : [http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5488303/4140731/04140747.pdf?tp={\&}arnumber=4140747{\&}isnumber=4140731{\%}5Cnhttp://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{\\\_}all.jsp?arnumber=4140747{\&}tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5488303/4140731/04140747.pdf?tp={\&}arnumber=4140747{\&}isnumber=4140731{\%}5Cnhttp://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{\_}all.jsp?arnumber=4140747{\&}tag=1).
- [54] Y.-M. HSIEH et Y.-C. LIU. « Model predictive control strategy for plug-in hybrid electric vehicles ». In : *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2016* 2016.November (2017), p. 13-15. DOI : [10.1109/ICARCV.2016.7838781](https://doi.org/10.1109/ICARCV.2016.7838781).
- [55] Hoseinali BORHAN et al. « MPC-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle ». In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 20.3 (2012), p. 593-603. ISSN : 10636536. DOI : [10.1109/TCST.2011.2134852](https://doi.org/10.1109/TCST.2011.2134852).
- [56] R HABER, J A ROSSITER et K ZABET. « An alternative for PID control : Predictive Functional Control - a tutorial ». In : *2016 American Control Conference (ACC)*. 2016, p. 6935-6940. ISBN : VO -. DOI : [10.1109/ACC.2016.7526765](https://doi.org/10.1109/ACC.2016.7526765).
- [57] W YONGYU et S QU. « Predictive functional control of power kites for high altitude wind energy generation based on hybrid neural network ». In : *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. 2015, p. 7866-7870. ISBN : VO -. DOI : [10.1109/ChiCC.2015.7260889](https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260889).

- [58] X WANG, L LI et C YANG. « Hierarchical Control of Dry Clutch for Engine-Start Process in a Parallel Hybrid Electric Vehicle ». In : *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 2.2 (2016), p. 231-243. ISSN : VO - 2. DOI : [10.1109/TTE.2016.2535316](https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2535316).
- [59] Rui WANG et Srdjan M. LUKIC. « Dynamic Programming Technique in Hybrid Electric Vehicle Optimization ». In : *IEEE International Electric Vehicle Conference* (2012), p. 1-8. DOI : [10.1109/IEVC.2012.6183284](https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183284).
- [60] J. SCORDIA et al. « Global optimisation of energy management laws in hybrid vehicles using dynamic programming ». In : *Int. Journal of Vehicle Design* 39.4 (2005), p. 349-367. DOI : [10.1504/IJVD.2005.008467](https://doi.org/10.1504/IJVD.2005.008467).
- [61] Claudio CUBITO et al. « Design of the control strategy for a range extended hybrid vehicle by means of dynamic programming optimization ». In : *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings Iv* (2017), p. 1234-1241. DOI : [10.1109/IVS.2017.7995881](https://doi.org/10.1109/IVS.2017.7995881).
- [62] Thomas CORMEN et al. *Introduction à l'algorithmique*. 2e édition. Dunod, 2004, p. 1146. ISBN : 2100031287.
- [63] S BASHASH et H K FATHY. « Optimizing demand response of plug-in hybrid electric vehicles using quadratic programming ». In : *2013 American Control Conference*. 2013, p. 716-721. ISBN : 0743-1619 VO -. DOI : [10.1109/ACC.2013.6579920](https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6579920).
- [64] Zheng CHEN et al. « Energy management of a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming ». In : *Journal of Power Sources* 248 (2014), p. 416-426. ISSN : 03787753. DOI : [10.1016/j.jpowsour.2013.09.085](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.085). URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.085>.
- [65] Z CHEN et al. « Energy management for plug-in hybrid electric vehicles based on quadratic programming with optimized engine on-off sequence ». In : *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017, p. 7134-7139. ISBN : VO -. DOI : [10.1109/IECON.2017.8217248](https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217248).
- [66] S HAHN et al. « Extension of a linear optimal control strategy for HEV ». In : *2015 European Control Conference (ECC)*. 2015, p. 154-159. ISBN : VO -. DOI : [10.1109/ECC.2015.7330538](https://doi.org/10.1109/ECC.2015.7330538).
- [67] A PANDAY et H O BANSAL. « Optimal fuel control of series-parallel input split hybrid electric vehicle using genetic algorithm based control strategy ». In : *2015 International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE)*. 2015, p. 1-5. ISBN : VO -. DOI : [10.1109/EnergyEconomics.2015.7235069](https://doi.org/10.1109/EnergyEconomics.2015.7235069).
- [68] Y H CHENG, C M LAI et J TEH. « Optimization of Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Improved Genetic Algorithm ». In : *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2017, p. 1-4. ISBN : VO -. DOI : [10.1109/VPPC.2017.8330928](https://doi.org/10.1109/VPPC.2017.8330928).
- [69] Jean-Louis LE MOIGNE. *La théorie du système général, théorie de la modélisation*. Sous la dir. de jeanlouis le moigne-ae MCX. T. 54. 1994. ISBN : 2-13-038483-8. arXiv : [1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3). URL : [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle>No+Title{#}0](https://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle>No+Title{#}0).
- [70] D. KROB. « Eléments d'architecture des systèmes complexes ». In : *Gestion de la complexité et de l'information dans les grands systèmes critiques*. Sous la dir. d'A. APPRIOU. CNRS Editions, 2009, p. 179-207. ISBN : 978-2-271-06828-6.
- [71] J.M. PÉNALVA et E. PAGE. « SAGACE : la modélisation des systèmes dont la maîtrise est complexe. » In : *ILCE*. Montpellier, 1990.

- [72] Nam P SUH. « Axiomatic Design Theory for Systems ». In : *Research in Engineering Design* 10.4 (1998), p. 189-209. ISSN : 1435-6066. DOI : [10.1007/s001639870001](https://doi.org/10.1007/s001639870001). URL : <https://doi.org/10.1007/s001639870001>.
- [73] Clément FAUVEL et al. « A flexible design methodology to solve energy management problems ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 97.July 2017 (2018), p. 220-232. ISSN : 01420615. DOI : [10.1016/j.ijepes.2017.11.005](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.005). URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061517317076>.
- [74] Massimo GUARNIERI. « When cars went electric, part 1 ». In : *IEEE Industrial Electronics Magazine* 5.1 (2011), p. 61-62. ISSN : 19324529. DOI : [10.1109/MIE.2011.940248](https://doi.org/10.1109/MIE.2011.940248).
- [75] BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS NATIONAL INFORMATION CENTRE AND LIBRARY ARCHIVES. *Jedlik, Ányos István*. URL : [http://www.omikk.bme.hu/archivum/angol/htm/jedlik\\\_\\\_a.htm](http://www.omikk.bme.hu/archivum/angol/htm/jedlik\_\_a.htm) (visité le 23/10/2017).
- [76] ENGINEERING AND TECHNOLOGY HISTORY WIKI. *Archives : The Inventions of Thomas Davenport*. 2015. URL : [http://ethw.org/w/index.php?title=Archives:The\\\_\\\_Inventions\\\_\\\_of\\\_\\\_Thomas\\\_\\\_Davenport&oldid=113605](http://ethw.org/w/index.php?title=Archives:The\_\_Inventions\_\_of\_\_Thomas\_\_Davenport&oldid=113605) (visité le 23/10/2017).
- [77] H PIEPER. *Mixed Drive for Autovehicles*. 1909.
- [78] Massimo GUARNIERI. « Looking back to electric cars ». In : *3rd Region-8 IEEE HISTORY of Electro - Technology CONference : The Origins of Electrotechnologies, HISTELCON 2012 - Conference Proceedings*. 2012. ISBN : 9781467330794. DOI : [10.1109/HISTELCON.2012.6487583](https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2012.6487583).
- [79] WIKIMEDIA COMMONS. *Wikimedia Commons*. 2013. URL : [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Pieper\\\_\\\_petroleo-electrique\\\_\\\_1900.png&oldid=87604539](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Pieper\_\_petroleo-electrique\_\_1900.png&oldid=87604539) (visité le 23/10/2017).
- [80] WWW.HYBRID-VEHICLE.ORG. *Hybrid Vehicle History - more than a 100 years of evolution and refinement*. URL : <http://www.hybrid-vehicle.org/hybrid-vehicle-history.html> (visité le 23/10/2017).
- [81] Toyota Prius 1997-2014. 2014. URL : [https://www.autoevolution.com/cars/toyota-prius-1997.html#t\\_aeng\\\_\\\_toyota-prius-2000-15](https://www.autoevolution.com/cars/toyota-prius-1997.html#t_aeng\_\_toyota-prius-2000-15) (visité le 23/10/2017).
- [82] Nouvelle Prius Hybride Rechargeable. 2017. URL : <https://www.toyota.fr/new-cars/prius-plugin/index.json> (visité le 23/10/2017).
- [83] Ali EMADI et al. « Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54.3 (2005), p. 763-770. ISSN : 00189545. DOI : [10.1109/TVT.2005.847445](https://doi.org/10.1109/TVT.2005.847445).
- [84] M EHSANI, Gao YIMIN et J M MILLER. « Hybrid Electric Vehicles : Architecture and Motor Drives ». In : *Proceedings of the IEEE* 95.4 (2007), p. 719-728. ISSN : 00189219. DOI : [10.1109/jproc.2007.892492](https://doi.org/10.1109/jproc.2007.892492).
- [85] M. EHSANI, Y. GAO et A. EMADI. *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles*. 2nd. CRC Press, 2010, p. 558. ISBN : 9781420053982.
- [86] E.W.C. LO. « Review on the configurations of hybrid electric vehicles ». In : *2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)* (2009), p. 1-4. ISSN : 9881747139.
- [87] Omonowo D MOMOH et Michael O OMOIGUI. « An Overview of Hybrid Electric Vehicle Technology ». In : *Ieee* (2009), p. 1286-1292. ISSN : 0018-9219. DOI : [10.1109/VPPC.2009.5289703](https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289703).

- [88] C. C. CHAN. « The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles ». In : *Proceedings of the IEEE* 95.4 (2007), p. 704-718. ISSN : 00189219. DOI : [10.1109/JPROC.2007.892489](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489).
- [89] D. CABEZUELO et al. « Powertrain systems of electric, hybrid and fuel-cell vehicles : State of the technology ». In : *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Edinburgh, UK : IEEE, 2017, p. 1445-1450. ISBN : 978-1-5090-1412-5. DOI : [10.1109/ISIE.2017.8001458](https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001458). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/8001458/>.
- [90] C. C. CHAN, Alain BOUSCAYROL et Keyu CHEN. « Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles : Architectures and modeling ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 59.2 (2010), p. 589-598. ISSN : 00189545. DOI : [10.1109/TVT.2009.2033605](https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2033605).
- [91] Thomas REDDY. *Linden's Handbook of Batteries*. 4th. McGraw-Hill, 2010, p. 1200. ISBN : 9780071624190.
- [92] TOYOTA. *Battery (Nickel-metal Hydride/Lithium-ion)*. 2017. URL : <http://www.toyota-global.com/innovation/environmental\technology\file/hybrid/battery.html>.
- [93] Isidor BUCHMANN et Cadex Electronics INC. *How to prolong lithium based batteries ?* 2018. URL : <http://batteryuniversity.com/learn/article/how\_to\_prolong\_lithium\_based\_batteries> (visité le 08/01/2018).
- [94] Isidor BUCHMANN et Cadex Electronics INC. *What causes capacity loss ?* 2018. URL : <http://batteryuniversity.com/learn/article/capacity\_loss> (visité le 09/01/2018).
- [95] Isidor BUCHMANN et CADEX ELECTRONICS INC. *What causes batteries to fail ?* 2003. URL : [https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1201667](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1201667) (visité le 09/01/2018).
- [96] Isidor BUCHMANN et Cadex Electronics INC. *How does rising internal resistance affect performance ?* 2018. URL : [http://batteryuniversity.com/learn/article/rising\\_internal\\_resistance](http://batteryuniversity.com/learn/article/rising_internal_resistance) (visité le 09/01/2018).
- [97] Isidor BUCHMANN et Cadex Electronics INC. *What does elevated self discharge do ?* 2017. URL : <http://batteryuniversity.com/learn/article/elevating\_self\_discharge> (visité le 09/01/2018).
- [98] H. DOUGLAS et P. PILLAY. « Sizing ultracapacitors for hybrid electric vehicles ». In : *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)* 2005 (2005), p. 1599-1604. ISSN : 00063568. DOI : [10.1109/IECON.2005.1569143](https://doi.org/10.1109/IECON.2005.1569143).
- [99] Andrew BURKE. « Ultracapacitors : Why, how, and where is the technology ». In : *Journal of Power Sources* 91.1 (2000), p. 37-50. ISSN : 03787753. DOI : [10.1016/S0378-7753\(00\)00485-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00485-7). arXiv : [arXiv:1408.1149](https://arxiv.org/abs/1408.1149).
- [100] M ZERAOUlia, M E H BENBOUZID et D DIALLO. « Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems : A Comparative Study ». In : *IEEE Trans, Vehicular Technology* 55.6 (2006), p. 1756-1764. ISSN : 0018-9545. DOI : [10.1109/TVT.2006.878719](https://doi.org/10.1109/TVT.2006.878719).
- [101] Yingjie LI, Dheeraj BOBBA et Bulent SARLIOGLU. « Design and Optimization of a Novel Dual-Rotor Hybrid PM Machine for Traction Application ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65.2 (2017), p. 1762-1771. ISSN : 02780046. DOI : [10.1109/TIE.2017.2739686](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2739686).

- [102] Milomir SOJA et al. « Improving Efficiency of Power Electronics Converters ». In : *Electronics, Faculty of Electrical Engineering Banja Luka, Bosnia and Herzegovina* 14.2 (2010), p. 37-42. DOI : 10.7251/ELS. URL : [http://electronics.etfb.net/journal/Vol14No2/xPaper{\\\_}07.pdf](http://electronics.etfb.net/journal/Vol14No2/xPaper{\_}07.pdf).
- [103] J W KOLAR et al. « Extreme efficiency power electronics ». In : *Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2012 7th International Conference on* (2012), p. 1-22.
- [104] Philippe FIANI et al. « Modélisation pour la conception et l'évaluation de systèmes complexes ». In : *Revue Ingénieurs de l'Automobile* 841 (2016).
- [105] P FIANI et M MOKUKCU. « Représentation unifiée pour la conception, l'analyse et la simulation des systèmes complexes . Application aux véhicules hybrides. » In : *Proceedings of the Congrès Simulation : La simulation numérique au cœur de l'innovation automobile*. Paris, France, 2017, p. 1-8.
- [106] Mert MOKUKCU et al. « Control Architecture Modeling using Functional Energetic Method - Demonstration on a Hybrid Electric Vehicle ». In : *Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. T. 1. Icincio. Madrid, Spain, 2017, p. 45-53. ISBN : 978-989-758-263-9. DOI : 10.5220/0006413300450053. URL : <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006413300450053>.
- [107] Mert MÖKÜKCÜ et al. « Energy-based Functional Modelling for Control Architecture Design : an Application to Energy Management for a Hybrid Electric Vehicle ». In : *LNEE Springer Book* (2018), p. 1-24.
- [108] Omar MOUHIB et al. « Optimal control problem in bond graph formalism ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 17.1 (2009), p. 240-256. ISSN : 1569190X. DOI : 10.1016/j.simpat.2008.04.011. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2008.04.011>.
- [109] Étienne ARNAL, Cédric ANTHIERENS et Éric BIDEAUX. « Consideration of glare from daylight in the control of the luminous atmosphere in buildings ». In : *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM* (2011), p. 1070-1075. DOI : 10.1109/AIM.2011.6027070.
- [110] SHERPA ENGINEERING. *Phisim Brochure*. 2018. URL : [www.sherpa-eng.com](http://www.sherpa-eng.com) (visité le 01/01/2018).
- [111] M OTTER, H ELMQVIST et F E CELLIER. « Modeling of multibody systems with the object-oriented modeling language Dymola ». In : *Nonlinear Dynamics* 9.1-2 (1996), p. 91-112. ISSN : 0924-090X. DOI : 10.1007/BF01833295.
- [112] Wilfrid MARQUIS-FAVRE, Eric BIDEAUX et Serge SCAVARDA. « A planar mechanical library in the AMESim simulation software. Part II : Library composition and illustrative example ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 14.2 (2006), p. 95-111. ISSN : 1569190X. DOI : 10.1016/j.simpat.2005.02.007.
- [113] Didar ZOWGHI et Vincenzo GERVASI. « The Three Cs of Requirements : Consistency, Completeness, and Correctness ». In : *Proceedings of 8th International Workshop on Requirements Engineering : Foundation for Software Quality* March (2002), p. 155-164.
- [114] Clément FAUVEL, Fabien CLAVEAU et Philippe CHEVREL. « Energy management in multi-consumers multi-sources system : A practical framework ». In : *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 19 (2014), p. 2260-2266. ISSN : 14746670. DOI : <http://dx.doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02446>.
- [115] Ludwig VON BERTALANFFY. « General System Theory ». In : *Georg. Braziller New York* 1 (1968), p. 289. ISSN : ??? URL : <http://books.google.es/books?id=N6k2mILtPYIC>.

- [116] Darek ERIKSSON. « A principal exposition of Jean-Louis Le Moigne's systemic theory ». In : *Cybernetics and Human Knowing* 4.2-3 (1997), p. 33-77. URL : <http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.127.1115&rep=rep1&type=pdf>.
- [117] Howard T. ODUM. *Environment, Power and Society*. New York : Wiley, 1971.
- [118] Howard T. ODUM. *Ecological and General Systems : An Introduction to Systems Ecology*. Revised ed. Niwot, CO : University Press of Colorado, 1994.
- [119] Mark T. BROWN. « A picture is worth a thousand words : Energy systems language and simulation ». In : *Ecological Modelling* 178.1-2 (2004), p. 83-100. ISSN : 03043800. DOI : [10.1016/j.ecolmodel.2003.12.008](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.12.008).
- [120] Felicitas MENSING, Rochdi TRIGUI et Eric BIDEAUX. « Vehicle trajectory optimization for hybrid vehicles taking into account battery state-of-charge ». In : *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (2012), p. 950-955. DOI : [10.1109/VPPC.2012.6422774](https://doi.org/10.1109/VPPC.2012.6422774). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6422774>.
- [121] Gwenaëlle SOUFFRAN, Laurence MIEGEVILLE et Patrick GUERIN. « Simulation of real-world vehicle missions using a stochastic markov model for optimal powertrain sizing ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61.8 (2012), p. 3454-3465. ISSN : 00189545. DOI : [10.1109/TVT.2012.2206618](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2206618).
- [122] Daniela CHRENKO et al. « Novel Classification of Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles ». In : *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2015 - Proceedings* (2015). ISSN : 1938-8756. DOI : [10.1109/VPPC.2015.7352985](https://doi.org/10.1109/VPPC.2015.7352985).
- [123] Chirag DESAI et Sheldon S. WILLIAMSON. « Comparative study of hybrid electric vehicle control strategies for improved drivetrain efficiency analysis ». In : *Electrical Power & Energy Conference (EPEC)* (2009), p. 1-6. DOI : [10.1109/EPEC.2009.5420888](https://doi.org/10.1109/EPEC.2009.5420888). URL : [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5420888](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5420888).
- [124] Andreas A. MALIKOPOULOS. « Supervisory power management control algorithms for hybrid electric vehicles : A survey ». In : *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15.5 (2014), p. 1869-1885. ISSN : 15249050. DOI : [10.1109/TITS.2014.2309674](https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2309674).
- [125] S OVERINGTON et S RAJAKARUNA. « Review of PHEV and HEV operation and control research for future direction ». In : *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012 3rd IEEE International Symposium on* (2012), p. 385-392. DOI : [10.1109/pedg.2012.6254031](https://doi.org/10.1109/pedg.2012.6254031).
- [126] Alberto SANTUCCI, Aldo SORNIOTTI et Constantina LEKAKOU. « Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications ». In : *Journal of Power Sources* 258 (2014), p. 395-407. ISSN : 03787753. DOI : [10.1016/j.jpowsour.2014.01.118](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.118). URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.118>.
- [127] M. BICHI et al. « Stochastic model predictive control with driver behavior learning for improved powertrain control ». In : *49th IEEE Conference on Decision and Control* (2010), p. 6077-6082. ISSN : 0743-1546. DOI : [10.1109/CDC.2010.5717791](https://doi.org/10.1109/CDC.2010.5717791).
- [128] LA COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES. *Directive 93/116/CE de la Commission*. 1993.
- [129] LA COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES. *Directive du Conseil 91/441/CEE*. 1991.
- [130] TOYOTA FRANCE. *Brochure Nouvelle Prius*. 2018.
- [131] VOLVO CAR FRANCE SAS. *Brochure V60*. 2018.

- [132] AUTOMOBILE PROPRE. *Voitures Ecologiques*. 2018. URL : <http://www.automobile-propre.com/voitures> (visité le 12/01/2018).

# Gammes des véhicules

## Annexe A

TABLEAU A.1 – Gammes des VEHs commercialisés en France [132].

MARQUE	Modèle du Véhicule	Capacité de Batterie (kWh)	Volume de Réservoir de Fuel (l)	Masse (Vide - kg)	Puissance de Moteur Thermique/ Electrique / Hybride (kW)	Autonomie Electrique (km)	Architecture de la Chaîne de Traction	Accélération 0-100 km/h (s)	Vitesse Maximale (km/h)
Audi	A3 eTron	8,8	40	1615	110 / 75 / 150	50	Parallèle	4,9 / 7,6	130 / 222
	Q7 eTron	17,3	75	2520	190 / 94 / 275	56	Parallèle	6,5 / 6,2	135 / 230
BMW	225xe	5,7	36	1735	100 / 65 / 165	39 - 41	Plug-in	- / 6,7	125 / 202
	330e	5,7	41	1735	135 / 65 / 185	37 - 40	Plug-in	- / 6,1	120 / 225
Citroën	740e	7,4	46	2015	190 / 83 / 240	41 - 45	Plug-in	5,5 / 5,3	140 / 250
	X5 40E	9,2	85	2305	180 / 83 / 230	30	Plug-in	6,8	120 / 210
DS	i8	5,2	42	1485	170 / 96 / 260	37	Plug-in	4,4	120 / 250
	DS5 Hybride	-	60	1660	120 / 27 / 147	-	Série	8,6	120 / 211

TABLEAU A.1 – Gammes des VEHs commercialisés en France [132].

MARQUE	Modèle du Véhicule	Capacité de Batterie (kWh)	Volume de Réservoir de Fuel (l)	Masse (Vide - kg)	Puissance de Moteur Thermique/ Electrique / Hybride) (kW)	Autonomie Electrique (km)	Architecture de la Chaîne de Traction	Accélération 0-100 km/h (s)	Vitesse Maximale (é/h) (km/h)
Ford	Mondeo Hybride	1,4	51	1579	100 / - / 138	-	Parallèle	9,2	- / 187
Hyundai	Ioniq Hybride	8,9	43	1570	77 / 44,5 / 104	63	Plug-in	10,6	- / 178
Infiniti	Q50 Hybride	-	70	1840	225 / 50 / 268	-	Parallèle	5,4	- / 250
	Q70 Hybride	-	70	1894	225 / 50 / 268	-	Parallèle	5,3	- / 250
Kia	Niro Hybride	8,9	45	1500	77,2 / 32 / 103,6	58	Plug-in	11,5	- / 162
	Optima Hybride	9,79	55	1780	115 / 50 / 151	54	Plug-in	9,4	120 / 192
Land Rover	Range Rover Hyb.	13	90	2509	221 / 85 / 297	51	Plug-in	6,8	137 / 220
Lexus	CT NiMH 200h	45	1430	73 / 60 / 100	-	Combiné	10,3	45 / 180	
	GS 230V / 31kW 300h	66	1730	133 / 105 / 164	-	Combiné	9,0	- / 190	
	GS 288V / 39kW 450h	66	1820	215 / 147 / 254	-	Combiné	5,9	- / 250	
	IS 230V / 31kW 300h	66	1650	133 / 105 / 164	-	Combiné	8,3	- / 200	
	NX NiMH 300h	56	1820	114 / 105+50 / 145	-	Combiné	9,2	- / 180	
	RC 230V / 31kW 300h	66	1750	133 / 105 / 164	-	Combiné	8,6	- / 190	
	RX 288V / 450h	65	2120	193 / 123+50 / 230	-	Combiné	7,7	- / 200	
Mercedes	C350le	6,2	-	-	155 / 60 / 205	30	Plug-in	5,9	130 / 250
	E350e	6,4	-	-	155 / 60 / 205	30	Plug-in	6,2	/ 250
	GLC 350e	8,7	50	2600	155 / 85 / 235	34	Plug-in	5,9	- / 235

TABLEAU A.1 – Gammes des VEHs commercialisés en France [132].

MARQUE	Modèle du Véhicule	Capacité de Batterie (kWh)	Volume de Réservoir de Fuel (l)	Masse (Vide - kg)	Puissance de Moteur Thermique/ Électrique / Hybride) (kW)	Autonomie Électrique (km)	Architecture de la Chaîne de Traction	Accélération 0-100 km/h (é/h) (s)	Vitesse Maximale (é/h) (km/h)
	GLE 500e		80	2465	245 / 85 / 325	30	Plug-in	5,3	-/245
Mitsubishi	Outlander PHEV	12	45	1845	89 / 60+60 / 150	52	Plug-in	11	120/170
Peugeot	508 Hybrid4	-	72	1660	120 / 27 / 147	3	Parallèle	8,6	-/210
	3008 Hybrid4	-	56,5	1660	120 / 27 / 147	3	Parallèle	8,5	-/191
Porsche	Cayenne S Hybride	10,9	80	2350	245 / 70 / 306	18	Parallèle	5,9	125/243
	Panamera Hybride	9,4	80	2095	245 / 70 / 306	18	Parallèle	5,5	-/270
Toyota	Auris Hybride	1,31	45	1310	73 / 60 / 100	2	Séries - Parallèle	10,9	50/180
	CHR Hybride	1,31	43	1380	72 / 53 / 90	2	Séries - Parallèle	11	-/170
	Prius Hybride	8,8	43	1605	72 / 53 / 90	63	Plug-in	11,1	135/162
	RAV4 Hybride	1,59	56	1690	112 / 105+50 / 145	2-3	Séries - Parallèle	8,3	-/180
	Yaris Hybride	0,936	36	1090	54 / 45 / 74	2-3	Séries - Parallèle	11,8	-/165
Volkswagen	Golf GTE	8,7	40	1540	75 / 110 / 150	50	Plug-in	7,6	-/222
	Passat GTE	9,9	50	1647	85 / 115 / 160	50	Plug-in	7,4	-/225
	V60 Hybride	11,2	45	1905	162 / 50 / 162	50	Plug-in	6	120/230
Volvo	XC60 Hybride	10,4	50	2174	235 / 65 / 300	45	Plug-in	5,3	125/230
	XC90 Hybride	10,4	50	2384	235 / 65 / 300	45	Plug-in	5,6	125/230

TABLEAU A.1 – Gammes des VEHs commercialisés en France [132].

MARQUE	Modèle du Véhicule	Capacité de Batterie (kWh)	Volume de Réservoir de Fuel (l)	Masse (Vide - kg)	Puissance de Moteur Thermique / Electrique / Hybride) (kW)	Autonomie Electrique (km)	Architecture de la Chaîne de Traction	Accélération 0-100 km/h (é/h) (s)	Vitesse Maximale (é/h) (km/h)
	S90 Twin Engine	9,2	55	2077	235 / 65 / 300	35	Plug-in	4,8	125/250

## Annexe B

# Application de la commande prédictive à un véhicule électrique hybride

### B.1 Principe de la stratégie de commande prédictive

Les étapes de synthèse d'une loi de commande prédictive [50] peuvent être résumées de la façon suivante :

1. Développer un modèle de prédiction afin de prédire la sortie du système sur un horizon fini. Dans la commande prédictive classique, il s'agit d'un modèle linéaire à temps discret sous forme d'état qui caractérise le comportement dynamique du système à piloter.
2. Définir une fonction du coût intégrant les objectifs de commande.
3. Déterminer la séquence de commandes optimales qui minimise la fonction de coût sur un horizon fini sujet au modèle de prédiction utilisé et aux contraintes liées aux limitation des grandeurs physiques.
4. Appliquer le premier élément de la séquence de commandes au système.
5. Mettre à jour l'état du système et répéter les étapes 1-5 à la période d'échantillonnage suivante.

### B.2 Application de la stratégie de commande prédictive à un VEH

La commande d'un véhicule électrique hybride est réalisée en utilisant une structure de commande intégrant deux niveaux :

- le niveau « superviseur » : consiste d'un correcteur global qui calcule pour un cycle

donné les commandes optimales de couple transmises au moteur thermique, aux machines électriques et au système de freinage mécanique,

- le niveau « alimentation » : comprend plusieurs boucles de commande locale pour les composants du véhicule afin d'assurer que les couples déterminés au niveau supérieur soient fournis.

Dans cette étude, on s'intéresse qu'au niveau « superviseur ». Pour analyser le potentiel de la stratégie de commande prédictive à ce niveau, l'étude est simplifiée en considérant que la chaîne de traction du véhicule est composée de deux sources d'énergie : une source irréversible (le moteur thermique) et une source réversible (le moteur électrique).

Le comportement dynamique du véhicule électrique hybride est modélisé par la dynamique de la vitesse du véhicule (présentée dans la [Section 2.4.1](#)) et la dynamique de l'état de charge de la batterie.

En utilisant les [relations 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6](#), la dynamique de la vitesse du véhicule s'écrit :

$$\dot{\vartheta}(t) = \frac{F_m(t)}{mR_r} - \frac{1}{2m}\rho A_f C_a \left( \vartheta(t) - \vartheta_w(t) \right)^2 - g \sin \alpha - 0,01g \cos \alpha \left( 1 + \frac{\vartheta(t)}{160} \right) \quad (\text{B.1})$$

où  $F_m$  est la force totale composée de la force électrique  $F_e$  et de la force thermique  $F_{th}$ ,  $m$  est la masse du véhicule,  $R_r$  est le rayon de la roue,  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $\alpha$  est l'angle d'inclinaison de la route,  $\rho$  est la densité de l'air,  $A_f$  est la surface frontale du véhicule,  $C_a$  est le coefficient de traînée aérodynamique,  $\vartheta$  est la vitesse du véhicule et  $\vartheta_w$  est la vitesse du vent.

Dans la suite de l'étude, deux hypothèses sont considérées : l'inclinaison de la route est nulle ( $\alpha = 0$ ) et l'absence de vent ( $\vartheta_w = 0$ ). L'[équation B.1](#) devient :

$$\dot{\vartheta}(t) = \frac{\tau_e(t) + \tau_{th}(t)}{m} - \frac{1}{2m}\rho A_f C_a \vartheta^2(t) - 0,01g \left( 1 + \frac{\vartheta(t)}{160} \right) \quad (\text{B.2})$$

La deuxième dynamique considérée est celle de l'état de charge de la batterie :

$$SOC_e(t) = \frac{E_{bat}(t)}{E_{max}} = \frac{\int_0^t P_{bat}(t) dt}{U_{bat} Q_{bat}} = \frac{\int_0^t U_{bat} i_{bat}(t) dt}{U_{bat} Q_{bat}} = \frac{\int_0^t i_{bat}(t) dt}{Q_{bat}} \quad (\text{B.3})$$

$$SOC_e(t) = i_{bat}(t) = \frac{\tau_e(t)}{k_e}$$

où :  $SOC_e(t)$  est l'état de charge de la batterie,  $E_{bat}$  est l'énergie restante dans la batterie,  $E_{max}$  est la capacité d'énergie maximale ;  $P_{bat}(t)$ ,  $U_{bat}$ ,  $Q_{bat}$ ,  $i_{bat}(t)$  représentent, respectivement, la puissance, la tension, la capacité maximale de la batterie, le courant de la batterie, et  $k_e$  est la constante de transformation d'énergie électrique en énergie mécanique de la machine électrique.

La représentation d'état du système à temps continu est de la suivante :

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2m}\rho A_f C_a \vartheta^2(t) - 0,01g(1 + 625 \cdot 10^{-5}\vartheta(t)) + \frac{\tau_e(t) + \tau_{th}(t)}{m} \\ \frac{\tau_e(t)}{k_e} \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

avec :  $x(t) = [\vartheta(t) \quad SOC_e(t)]^T$  le vecteur d'état,  $u(t) = [\tau_{th}(t) \quad \tau_e(t)]^T$  le vecteur d'entrées de commande,  $\tau_{th}$  le couple du moteur thermique et  $\tau_e$  le couple de la machine électrique.

Ce modèle est non-linéaire en vitesse et la linéarisation du modèle autour d'une vitesse constante  $\bar{\vartheta}$  et un état de charge  $\overline{SOC_e}$  constant est effectuée par la suite afin d'appliquer la stratégie de la commande prédictive « classique », qui est fondée sur un modèle de prédiction linéaire.

Le modèle linéarisé à temps continu obtenu s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= A\tilde{x}(t) + B\tilde{u}(t) \\ \tilde{y}(t) &= C\tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

avec :  $\tilde{x}(t) = x(t) - \bar{x}$ ,  $\tilde{u}(t) = u(t) - \bar{u}$ ,  $\tilde{y}(t) = y(t) - \bar{y}$ .

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m}\rho A_f C_a \bar{\vartheta} - 0,625 \cdot 10^{-5}g & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & \frac{1}{k_e} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

où  $\tilde{x}(t)$ ,  $\tilde{u}(t)$ ,  $\tilde{y}(t)$  représentent les variations des variables d'état, de commande et de sortie au voisinage du point de fonctionnement choisi ( $\bar{x}$ ,  $\bar{u}$ ,  $\bar{y}$ ).

Le modèle de prédiction à temps discret utilisé dans la synthèse de la commande est obtenu par la discrétisation du modèle (B.5) avec la période d'échantillonnage  $T_e = 0,01s$ .

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= A_d \tilde{x}(k) + B_d \tilde{u}(k) \\ \tilde{y}(k) &= C_d \tilde{x}(k) \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

Ce modèle est ensuite augmenté par l'ajout d'un état supplémentaire  $\tilde{u}(k-1)$ , afin que l'entrée du modèle devient l'incrément de la commande,  $\Delta\tilde{u}(k)$ , avec  $\Delta\tilde{u}(k) = \tilde{u}(k) - \tilde{u}(k-1)$ . L'ajout de la commande précédente au vecteur d'état du modèle de prédiction permet de lisser les signaux de commande appliqués au véhicule et de limiter les variations des grandeurs de commande entre deux pas de calcul.

Par conséquent, le modèle de prédiction est le suivant :

$$\begin{aligned} \tilde{x}_a(k+1) &= A_a \tilde{x}_a(k) + B_a \Delta\tilde{u}(k) \\ \tilde{y}_a(k) &= C_a \tilde{x}_a(k) \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

avec :  $\tilde{x}_a(k) = \begin{bmatrix} \tilde{x}(k) \\ \tilde{u}(k-1) \end{bmatrix}$ ,  $A_a = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0 & I_2 \end{bmatrix}$ ,  $B_a = \begin{bmatrix} B_d \\ 1_2 \end{bmatrix}$ ,  $C_a = \begin{bmatrix} C_d & 0_2 \end{bmatrix}$ ,  $I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $1_2 = [1 \ 1]^T$  et  $0_2 = [0 \ 0]$ .

Le problème d'optimisation est formulé en utilisant une fonction de coût quadratique composé de l'erreur de suivi (la différence entre la sortie à piloter et la consigne) et la différence entre deux commandes successives :

$$\begin{aligned} \min_{\Delta\tilde{U}(k)} \quad & \sum_{i=N_1}^{N_2} \|(\tilde{y}_a(k+i) - y_{ref}(k+i))Q\|_2 + \sum_{i=1}^{N_u} \|\Delta\tilde{u}(k+i-1)R\|_2 \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{x}_a(k+1) = A_a\tilde{x}_a(k) + B_a\Delta\tilde{u}(k) \\ & \tilde{y}_a(k) = C_a\tilde{x}_a(k) \\ & \Delta\tilde{u}_{min} \leq \Delta\tilde{u}(k+i) \leq \Delta\tilde{u}_{max}, \quad 0 \leq i \leq N_u - 1 \\ & \tilde{u}_{min} \leq \tilde{u}(k+i) \leq \tilde{u}_{max}, \quad 0 \leq i \leq N_u - 1 \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

où  $N_1$  est l'horizon de prédiction inférieur,  $N_2$  est l'horizon de prédiction supérieur,  $N_u$  est l'horizon de prédiction de la commande avec  $N_u \leq N_b$ , ( $N_b = N_2 - N_1 + 1$ ) et  $\Delta u(k+i) = 0$  pour  $i \geq N_u$ .  $Q$ ,  $R$  sont des matrices de pondération des états prédits et des commandes futures et  $\Delta\tilde{U}(k) = [\Delta\tilde{u}(k) \ \dots \ \Delta\tilde{u}(k+N_u-1)]^T$  représente la séquence de commandes futures qui minimise la fonction de coût.

Par la suite le problème d'optimisation sous contraintes (relation B.9) est reformulé sous forme matricielle.

On note  $\tilde{X}_a(k)$  et  $\tilde{Y}_{ref}(k)$ , respectivement, le vecteur d'états prédits et la trajectoire à suivre sur l'horizon de prédiction :

$$\tilde{X}_a(k) = \begin{bmatrix} \tilde{x}_a(k+N_1) \\ \tilde{x}_a(k+N_1+1) \\ \vdots \\ \tilde{x}_a(k+N_2) \end{bmatrix}, \quad \tilde{Y}_{ref}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{ref}(k+N_1) \\ \tilde{y}_{ref}(k+N_1+1) \\ \vdots \\ \tilde{y}_{ref}(k+N_2) \end{bmatrix} \quad (\text{B.10})$$

En utilisant l'équation de sortie du modèle de prédiction eq. B.8, la fonction de coût à minimiser s'écrit :

$$J(k) = \tilde{X}_a^T(k)Q_1\tilde{X}_a(k) - 2\tilde{X}_a^T(k)Q_2\tilde{Y}_{ref}(k) + \tilde{Y}_{ref}^T(k)Q_3\tilde{Y}_{ref}(k) + \Delta\tilde{U}^T(k)R\Delta\tilde{U}(k) \quad (\text{B.11})$$

$$\text{où } Q_1 = \begin{bmatrix} C_a^TQC_a & 0 & 0 \\ 0 & C_a^TQC_a & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & C_a^TQC_a \end{bmatrix}; \quad Q_2 = \begin{bmatrix} C_a^TQ & 0 & 0 \\ 0 & C_a^TQ & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & C_a^TQ \end{bmatrix}; \quad Q_3 = \begin{bmatrix} Q & 0 & 0 \\ 0 & Q & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & Q \end{bmatrix};$$

$$\mathbb{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}.$$

L'équation de prédiction de l'état sur l'horizon  $N_b$  est déterminée à partir du ([modèle B.8](#)) :

$$\tilde{X}_a(k) = \Phi \tilde{x}_a(k) + \Psi \Delta \tilde{U}(k) \quad (\text{B.12})$$

$$\text{avec : } \Phi = \begin{bmatrix} A_a^{N_1} \\ A_a^{N_1+1} \\ A_a^{N_1+2} \\ \vdots \\ A_a^{N_2} \end{bmatrix} \text{ et } \Psi = \begin{bmatrix} A_a^{N_1-1} B_a & \dots & B_a & \dots & 0 \\ A_a^{N_1} B_a & A_a^{N_1-1} B_a & \dots & \dots & 0 \\ A_a^{N_1+1} B_a & A_a^{N_1} B_a & A_a^{N_1-1} B_a & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_a^{N_2-1} B_a & A_a^{N_2-2} B_a & \dots & \dots & B_a \end{bmatrix}.$$

Par conséquent, la forme matricielle de la fonction de coût quadratique est la suivante :

$$J(k) = \frac{1}{2} \Delta \tilde{U}^T(k) H \Delta \tilde{U}(k) + \tilde{x}_t^T(k) F \Delta \tilde{U}(k) + \tilde{x}_t^T(k) Y \tilde{x}_t(k) \quad (\text{B.13})$$

$$\text{où : } \tilde{x}_t(k) = \begin{bmatrix} \tilde{x}_a(k) \\ \tilde{Y}_{ref}(k) \end{bmatrix}, H = \Psi^T Q_1 \Psi + R, F = \begin{bmatrix} 2\Phi^T Q_1 \Psi \\ -2Q_2^T \Psi \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 2\Phi^T Q_1 \Phi & -2\Phi^T Q_2 \\ -2Q_2^T \Phi & 2Q_3 \end{bmatrix}.$$

Les contraintes sur l'incrément de commande, la commande et la sortie du système sont de mêmes mises sous forme matricielle et exprimées par des contraintes sur les variables de décision  $\Delta \tilde{u}(k+i)$ ,  $0 \leq i \leq N_u - 1$ .

## B.3 Contraintes pour l'incrément de la commande

$$\Delta \tilde{u}_{min} \leq \Delta \tilde{u}(k+i) \leq \Delta \tilde{u}_{max}, 0 \leq i \leq N_u - 1 \rightarrow \begin{bmatrix} I_{\Delta U} \\ I_{\Delta U} \end{bmatrix} \Delta \tilde{U}(k) \leq \begin{bmatrix} \Delta \tilde{U}_{max} \\ -\Delta \tilde{U}_{min} \end{bmatrix} \quad (\text{B.14})$$

avec :

$$\Delta \tilde{U}_{max} = \begin{bmatrix} \Delta \tilde{u}_{max} \\ \vdots \\ \Delta \tilde{u}_{max} \end{bmatrix}, \quad \Delta \tilde{u}_{min} = \begin{bmatrix} \Delta \tilde{u}_{min} \\ \vdots \\ \Delta \tilde{u}_{min} \end{bmatrix}, \quad I_{\Delta u} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.15})$$

## B.4 Contraintes pour la commande

En utilisant la relation  $\tilde{u}(k+i) = \tilde{u}(k+i-1) + \Delta \tilde{u}(k+i)$ ,  $0 \leq i \leq N_u - 1$ , la commande à l'instant  $k+i$  peut s'exprimer en fonction de la commande précédente et les incrément de

commande présent et passés :

$$\tilde{u}(k+i) = \tilde{u}(k-1) + \sum_{j=0}^i \Delta \tilde{u}(k+j), \quad 0 \leq i \leq N_u - 1 \quad (\text{B.16})$$

En notant  $\tilde{U}(k) = [\tilde{u}^T(k) \dots \tilde{u}^T(k+N_u-1)]^T$  la séquence de commande appliquée au système à piloter (dans ce cas, le véhicule hybride) et  $\tilde{u}(k-1) = [0_{2x2} \ I_2] \tilde{x}_a(k)$ , les contraintes sur la commande sont reformulées par des contraintes sur la séquence de commande à optimiser :

$$\tilde{u}_{min} \leq \tilde{u}(k+i) \leq \tilde{u}_{max}, 0 \leq i \leq N_u - 1 \rightarrow \begin{bmatrix} G_u \\ -G_u \end{bmatrix} \Delta \tilde{U}(k) \leq \begin{bmatrix} \tilde{U}_{max} \\ \tilde{U}_{min} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -E_u \\ E_u \end{bmatrix} \tilde{x}_a(k) \quad (\text{B.17})$$

$$\text{avec : } G_u = \begin{bmatrix} I_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & I_2 & \cdots & 0 \\ I_2 & \cdots & \ddots & I_2 \\ -I_2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & -I_2 & \ddots & 0 \\ -I_2 & -I_2 & \cdots & -I_m \end{bmatrix}; \tilde{U}_{max} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{max} \\ \vdots \\ \tilde{u}_{max} \end{bmatrix}; \tilde{U}_{min} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{min} \\ \vdots \\ \tilde{u}_{min} \end{bmatrix}; E_u = \begin{bmatrix} 0_{2x2} & I_2 \\ \vdots & \vdots \\ 0_{2x2} & I_2 \end{bmatrix}.$$

Enfin, l'ensemble des contraintes à respecter est donnée par les équations B.14, B.17 :

$$G \Delta \tilde{U}(k) \leq W + E \tilde{x}_a(k) \quad (\text{B.18})$$

$$\text{avec : } G = \begin{bmatrix} I_{\Delta U} \\ -I_{\Delta U} \\ G_u \\ -G_u \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} \Delta U_{max} \\ -\Delta U_{min} \\ U_{max} \\ -U_{min} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -E_u \\ E_u \end{bmatrix}.$$

Dans ce cas, la référence à suivre est imposée par le profil de vitesse du cycle de conduite et l'état de charge désirée à la fin de la mission,  $\tilde{y}_{ref} = [\tilde{\vartheta}_{ref}(k) \ S\tilde{O}C_{e,ref}(k)]^T$ .

Le problème d'optimisation (équation B.9) est reformulé en un problème de programmation quadratique :

$$\begin{array}{ll} \min_{\Delta \tilde{U}(k)} & \frac{1}{2} \Delta \tilde{U}^T(k) H \Delta \tilde{U}(k) + \tilde{x}_t^T(k) F \Delta \tilde{U}(k) \\ \text{sujet à :} & G \Delta \tilde{U}(k) \leq W + E \tilde{x}_a(k) \end{array} \quad (\text{B.19})$$

La stratégie de la commande prédictive est appliquée pour déterminer les consignes de couples au niveau « superviseur » du véhicule électrique hybride. Les commandes optimales sont déterminées en utilisant le profil de vitesse du cycle de conduite WLTC (présenté en Chapitre 2, Figure ??b) et la valeur constante de l'état de charge de 0,75 (batterie chargée à 75%). Pour cela, le point de fonctionnement choisit pour la linéarisation du modèle du véhicule correspond aux valeurs :  $\bar{\vartheta} = 50 \text{ km/h}$ ,  $\bar{SOC}_e = 0,5$ .

Le problème d'optimisation sous contraintes (B.19) est résolu à chaque pas avec les paramètres donnés dans le Tableau B.1. La résolution est faite avec la fonction « fmincon » de MATLAB/Simulink et les résultats de simulation sont illustrés dans la Figure B.1.

TABLEAU B.1 – Paramètres utilisés pour la commande prédictive dans un cas d'un VEH.

Paramètres	Valeurs
$T_e$	0,01
$N_1$	1
$N_2$	10
$N_u$	10
$Q$	1000
$R$	$\begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
$\tilde{U}_{min}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -100 \end{bmatrix}$
$\tilde{U}_{max}$	$\begin{bmatrix} 200 \\ 150 \end{bmatrix}$
$\Delta\tilde{U}_{min}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -50 \end{bmatrix}$
$\Delta\tilde{U}_{max}$	$\begin{bmatrix} 50 \\ 100 \end{bmatrix}$

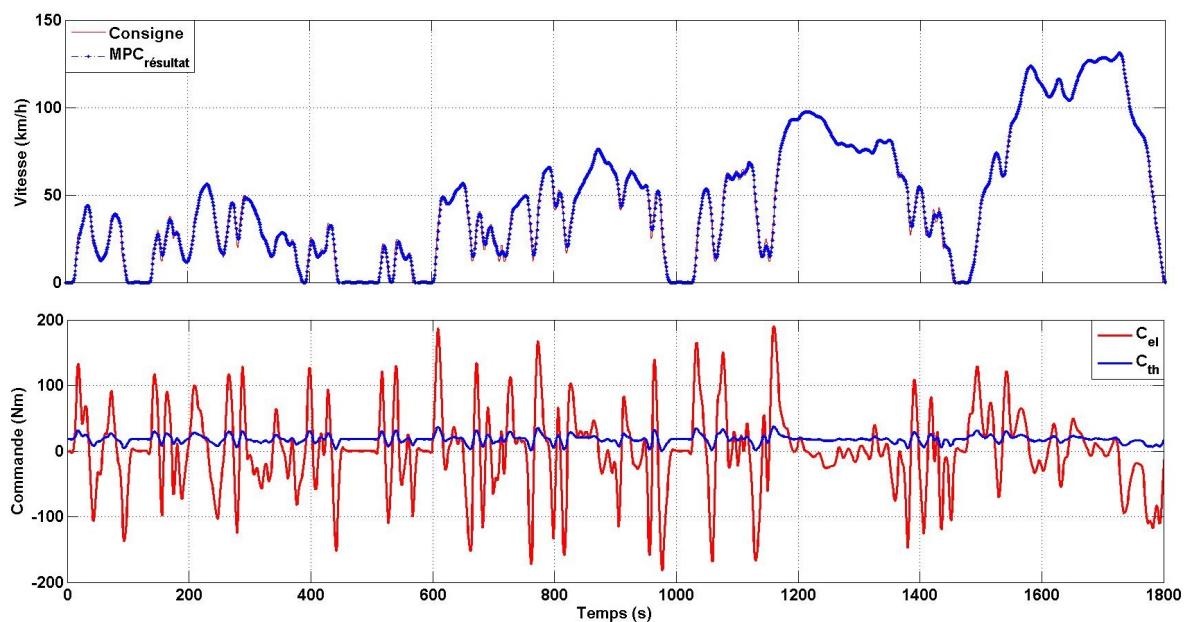


FIGURE B.1 – Vitesse et commandes en couple obtenus par application de la stratégie de la commande prédictive (WLTC).

Cet essai attire les commentaires suivants :

- le véhicule suit la référence de la vitesse (le cycle WLTC),

- la chaîne de traction électrique ( $C_{el}$ ) est utilisée plus souvent que la chaîne de traction thermique ( $C_{th}$ ),
- la référence de couple (la commande) respecte les contraintes données dans le **Tableau B.1**.

## Annexe C

# Résultats des simulations

### C.1 Tableaux des résultats

TABLEAU C.1 – Résultats de simulation pour le cycle NEDC urbain.

<b>Conditions</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 20]$	40%	<i>Conso</i>	7,5469	7,6511	7,4873
		$\Delta SOC_e$	-0,0101	-0,0178	-0,0134
		$n_{mth}$	22	12	12
		$Conso_{cor}$	7,6164	7,7743	7,5802
	55%	<i>Conso</i>	7,5469	7,6481	7,4873
		$\Delta SOC_e$	-0,0101	-0,0176	-0,0134
		$n_{mth}$	22	12	12
		$Conso_{cor}$	7,6164	7,7700	7,5802
	70%	<i>Conso</i>	7,5469	7,6489	7,4873
		$\Delta SOC_e$	-0,0101	-0,0178	-0,0134
		$n_{mth}$	22	12	12
		$Conso_{cor}$	7,6164	7,7717	7,5802
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 10]$	40%	<i>Conso</i>	5,2778	5,3541	5,3279
		$\Delta SOC_e$	0,0043	-0,0043	-0,0125
		$n_{mth}$	24	13	11
		$Conso_{cor}$	5,2478	5,3839	5,4144
	55%	<i>Conso</i>	5,2778	5,3745	5,3279
		$\Delta SOC_e$	0,0043	-0,0075	-0,0125
		$n_{mth}$	24	12	11
		$Conso_{cor}$	5,2478	5,4264	5,4144
	70%	<i>Conso</i>	5,2778	5,3751	5,3279
		$\Delta SOC_e$	0,0043	-0,0075	-0,0125
		$n_{mth}$	24	12	11
		$Conso_{cor}$	5,2478	5,4270	5,4144

TABLEAU C.1 – Résultats de simulation pour le cycle NEDC urbain.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 0]$	40%	Conso	3,0913	3,3712	3,1984
		$\Delta SOC_e$	-0,0012	-0,0242	-0,0159
		$n_{mth}$	23	49	41
		$Conso_{cor}$	3,0998	3,5391	3,3084
	55%	Conso	3,0913	3,3693	3,1984
		$\Delta SOC_e$	-0,0012	-0,0240	-0,0159
		$n_{mth}$	23	48	41
		$Conso_{cor}$	3,0998	3,5357	3,3084
	70%	Conso	3,0913	3,3697	3,1984
		$\Delta SOC_e$	-0,0012	-0,0240	-0,0159
		$n_{mth}$	23	50	41
		$Conso_{cor}$	3,0998	3,5361	3,3084
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 20]$	40%	Conso	8,8182	8,7941	8,6318
		$\Delta SOC_e$	-0,0119	-0,0173	-0,0102
		$n_{mth}$	26	11	11
		$Conso_{cor}$	8,9004	8,9134	8,7025
	55%	Conso	8,8182	8,7931	8,6318
		$\Delta SOC_e$	-0,0119	-0,0174	-0,0102
		$n_{mth}$	26	10	11
		$Conso_{cor}$	8,9004	8,9131	8,7025
	70%	Conso	8,8182	8,7939	8,6318
		$\Delta SOC_e$	-0,0119	-0,0172	-0,0102
		$n_{mth}$	26	11	11
		$Conso_{cor}$	8,9004	8,9130	8,7025
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 10]$	40%	Conso	6,6071	6,5213	6,4521
		$\Delta SOC_e$	-0,0162	-0,0042	-0,0066
		$n_{mth}$	20	12	12
		$Conso_{cor}$	6,7191	6,5500	6,4974
	55%	Conso	6,6071	6,5176	6,4521
		$\Delta SOC_e$	-0,0162	-0,0037	-0,0066
		$n_{mth}$	20	12	12
		$Conso_{cor}$	6,7191	6,5432	6,4974
	70%	Conso	6,6071	6,5381	6,4521
		$\Delta SOC_e$	-0,0162	-0,0062	-0,0066
		$n_{mth}$	20	13	12
		$Conso_{cor}$	6,7191	6,5811	6,4974
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 0]$	40%	Conso	4,2964	4,2792	4,3157
		$\Delta SOC_e$	-0,0001	0,0063	-0,0081
		$n_{mth}$	25	49	42
		$Conso_{cor}$	4,2972	4,2355	4,3715
	55%	Conso	4,2964	4,2751	4,3157
		$\Delta SOC_e$	-0,0001	0,0070	-0,0081
		$n_{mth}$	25	43	42
		$Conso_{cor}$	4,2972	4,2269	4,3715

TABLEAU C.1 – Résultats de simulation pour le cycle NEDC urbain.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 20]$	70%	<i>Conso</i>	4,2964	4,2798	4,3157
		$\Delta SOC_e$	-0,0001	0,0063	-0,0081
		$n_{mth}$	25	44	42
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,2972	4,2362	4,3715
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 10]$	40%	<i>Conso</i>	10,0066	9,7786	9,8636
		$\Delta SOC_e$	-0,0049	0,0101	-0,0141
		$n_{mth}$	35	8	11
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	10,0405	9,7091	9,9611
	55%	<i>Conso</i>	10,0066	9,7799	9,8636
		$\Delta SOC_e$	-0,0049	0,0101	-0,0141
		$n_{mth}$	35	8	11
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	10,0405	9,7105	9,9611
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 0]$	70%	<i>Conso</i>	10,0066	9,7631	9,8636
		$\Delta SOC_e$	-0,0049	0,0087	-0,0141
		$n_{mth}$	35	8	11
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	10,0405	9,7029	9,9611
	40%	<i>Conso</i>	7,7116	7,7390	7,7116
		$\Delta SOC_e$	-0,0014	-0,0140	-0,0152
		$n_{mth}$	28	13	12
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	7,7215	7,8360	7,8165
	55%	<i>Conso</i>	7,7116	7,7354	7,7116
		$\Delta SOC_e$	-0,0014	-0,0139	-0,0152
		$n_{mth}$	28	12	12
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	7,7215	7,8314	7,8165
	70%	<i>Conso</i>	7,7116	7,7357	7,7116
		$\Delta SOC_e$	-0,0014	-0,0140	-0,0152
		$n_{mth}$	28	11	12
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	7,7215	7,8325	7,8165

TABLEAU C.2 – Résultats de simulation pour le NEDC autoroute.

<b>Conditions</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 20]$	40%	<i>Conso</i>	4,3713	4,4991	4,4591
		$SOC_e$	-0,0085	-0,0386	-0,0370
		$n_{mth}$	5	2	2
		$Conso_{cor}$	4,4058	4,6549	4,6085
	55%	<i>Conso</i>	4,3713	4,5000	4,4591
		$SOC_e$	-0,0085	-0,0387	-0,0370
		$n_{mth}$	5	2	2
		$Conso_{cor}$	4,4058	4,6561	4,6085
	70%	<i>Conso</i>	4,3713	4,5004	4,4591
		$SOC_e$	-0,0085	-0,0389	-0,0370
		$n_{mth}$	5	2	2
		$Conso_{cor}$	4,4058	4,6571	4,6085
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 10]$	40%	<i>Conso</i>	3,9104	3,9941	3,8774
		$SOC_e$	-0,0524	-0,0705	-0,0514
		$n_{mth}$	4	2	2
		$Conso_{cor}$	4,1218	4,2787	4,0850
	55%	<i>Conso</i>	3,9104	3,9788	3,8774
		$SOC_e$	-0,0524	-0,0670	-0,0514
		$n_{mth}$	4	2	2
		$Conso_{cor}$	4,1218	4,2489	4,0850
	70%	<i>Conso</i>	3,9104	3,8780	3,8774
		$SOC_e$	-0,0524	-0,0420	-0,0514
		$n_{mth}$	4	2	2
		$Conso_{cor}$	4,1218	4,0476	4,0850
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 0]$	40%	<i>Conso</i>	3,3422	3,2490	3,3315
		$SOC_e$	-0,0745	-0,0444	-0,0735
		$n_{mth}$	6	7	7
		$Conso_{cor}$	3,6428	3,4283	3,6280
	55%	<i>Conso</i>	3,3422	3,2536	3,3315
		$SOC_e$	-0,0745	-0,0456	-0,0735
		$n_{mth}$	6	7	7
		$Conso_{cor}$	3,6428	3,4376	3,6280
	70%	<i>Conso</i>	3,3422	3,3248	3,3315
		$SOC_e$	-0,0745	-0,0649	-0,0735
		$n_{mth}$	6	6	7
		$Conso_{cor}$	3,6428	3,5867	3,6280
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 20]$	40%	<i>Conso</i>	4,7020	4,7743	4,7184
		$SOC_e$	0,0125	-0,0220	-0,0166
		$n_{mth}$	6	2	2
		$Conso_{cor}$	4,6518	4,8630	4,7853
	55%	<i>Conso</i>	4,7020	4,7741	4,7184
		$SOC_e$	0,0125	-0,0219	-0,0166
		$n_{mth}$	6	2	2
		$Conso_{cor}$	4,6518	4,8626	4,7853
	70%	<i>Conso</i>	4,7020	4,7723	4,7184
		$SOC_e$	0,0125	-0,0215	-0,0166
		$n_{mth}$	6	2	2
		$Conso_{cor}$	4,6518	4,8590	4,7853

TABLEAU C.2 – Résultats de simulation pour le NEDC autoroute.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 10]$	40%	<i>Conso</i>	4,2372	4,2495	4,1399
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0362	-0,0516	-0,0318
		<i>n<sub>mth</sub></i>	7	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,3834	4,4576	4,2684
	55%	<i>Conso</i>	4,2372	4,2518	4,1399
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0362	-0,0522	-0,0318
		<i>n<sub>mth</sub></i>	7	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,3834	4,4626	4,2684
	70%	<i>Conso</i>	4,2372	4,2428	4,1399
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0362	-0,0497	-0,0318
		<i>n<sub>mth</sub></i>	7	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,3834	4,4435	4,2684
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 0]$	40%	<i>Conso</i>	3,7584	3,7259	3,5768
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0814	-0,0800	-0,0493
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	7	7
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,0867	4,0487	3,7756
	55%	<i>Conso</i>	3,7584	3,7275	3,5768
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0814	-0,0802	-0,0493
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	7	7
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,0867	4,0513	3,7756
	70%	<i>Conso</i>	3,7584	3,7246	3,5768
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0814	-0,0797	-0,0493
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	7	7
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,0867	4,0460	3,7756
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 20]$	40%	<i>Conso</i>	5,1383	5,1170	4,9891
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0030	-0,0273	-0,0042
		<i>n<sub>mth</sub></i>	8	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,1261	5,2269	5,0059
	55%	<i>Conso</i>	5,1383	5,1110	4,9891
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0030	-0,0259	-0,0042
		<i>n<sub>mth</sub></i>	8	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,1261	5,2154	5,0059
	70%	<i>Conso</i>	5,1383	5,1496	4,9891
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0030	-0,0324	-0,0042
		<i>n<sub>mth</sub></i>	8	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,1261	5,2803	5,0059
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 10]$	40%	<i>Conso</i>	4,5528	4,4422	4,4113
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0292	-0,0155	-0,0184
		<i>n<sub>mth</sub></i>	9	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,6705	4,5048	4,4857
	55%	<i>Conso</i>	4,5528	4,4385	4,4113
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0292	-0,0146	-0,0184
		<i>n<sub>mth</sub></i>	9	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,6705	4,4973	4,4857
	70%	<i>Conso</i>	4,5528	4,4415	4,4113
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0292	-0,0154	-0,0184
		<i>n<sub>mth</sub></i>	9	2	2
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,6705	4,5037	4,4857

TABLEAU C.2 – Résultats de simulation pour le NEDC autoroute.

Condition	$SOC_{e,init}$	Critères	Stratégie - 1	Stratégie - 2	Stratégie - 3
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 0]$	40%	$Conso$	4,0015	3,9947	3,8667
		$SOC_e$	-0,0445	-0,0613	-0,0365
		$n_{mth}$	9	7	8
		$Conso_{cor}$	4,1810	4,2422	4,0141
	55%	$Conso$	4,0015	3,9176	3,8667
		$SOC_e$	-0,0445	-0,0445	-0,0365
		$n_{mth}$	9	8	8
		$Conso_{cor}$	4,1810	4,0972	4,0141
	70%	$Conso$	4,0015	3,9179	3,8667
		$SOC_e$	-0,0445	-0,0436	-0,0365
		$n_{mth}$	9	7	8
		$Conso_{cor}$	4,1810	4,0937	4,0141

TABLEAU C.3 – Résultats de simulation pour l'ensemble du cycle NEDC.

Conditions	$SOC_{e,init}$	Critères	Stratégie - 1	Stratégie - 2	Stratégie - 3
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 20]$	40%	$Conso$	5,5422	5,6612	5,5750
		$SOC_e$	-0,0186	-0,0565	-0,0505
		$n_{mth}$	27	14	14
		$Conso_{cor}$	5,5895	5,8050	5,7036
	55%	$Conso$	5,5422	5,6606	5,5750
		$SOC_e$	-0,0186	-0,0564	-0,0505
		$n_{mth}$	27	14	14
		$Conso_{cor}$	5,5895	5,8042	5,7036
	70%	$Conso$	5,5422	5,6612	5,5750
		$SOC_e$	-0,0186	-0,0566	-0,0505
		$n_{mth}$	27	14	14
		$Conso_{cor}$	5,5895	5,8054	5,7036
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 10]$	40%	$Conso$	4,4146	4,4955	4,4119
		$SOC_e$	-0,0481	-0,0748	-0,0639
		$n_{mth}$	28	15	13
		$Conso_{cor}$	4,5369	4,6861	4,5748
	55%	$Conso$	4,4146	4,4934	4,4119
		$SOC_e$	-0,0481	-0,0745	-0,0639
		$n_{mth}$	28	14	13
		$Conso_{cor}$	4,5369	4,6830	4,5748
	70%	$Conso$	4,4146	4,4300	4,4119
		$SOC_e$	-0,0481	-0,0495	-0,0639
		$n_{mth}$	28	14	13
		$Conso_{cor}$	4,5369	4,5561	4,5748
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 0]$	40%	$Conso$	3,2497	3,2940	3,2825
		$SOC_e$	-0,0757	-0,0687	-0,0894
		$n_{mth}$	29	56	48
		$Conso_{cor}$	3,4426	3,4691	3,5102

 $= [1, 0]$

TABLEAU C.3 – Résultats de simulation pour l'ensemble du cycle NEDC.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 20]$	55%	<i>Conso</i>	3,2497	3,2962	3,2825
		$SOC_e$	-0,0757	-0,0696	-0,0894
		$n_{mth}$	29	55	48
		$Conso_{cor}$	3,4426	3,4737	3,5102
	70%	<i>Conso</i>	3,2497	3,3413	3,2825
		$SOC_e$	-0,0757	-0,0890	-0,0894
		$n_{mth}$	29	56	48
		$Conso_{cor}$	3,4426	3,5681	3,5102
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 10]$	40%	<i>Conso</i>	6,2196	6,2565	6,1609
		$SOC_e$	0,0005	-0,0393	-0,0268
		$n_{mth}$	32	13	13
		$Conso_{cor}$	6,2182	6,3565	6,2292
	55%	<i>Conso</i>	6,2196	6,2560	6,1609
		$SOC_e$	0,0005	-0,0393	-0,0268
		$n_{mth}$	32	12	13
		$Conso_{cor}$	6,2182	6,3561	6,2292
	70%	<i>Conso</i>	6,2196	6,2552	6,1609
		$SOC_e$	0,0005	-0,0387	-0,0268
		$n_{mth}$	32	13	13
		$Conso_{cor}$	6,2182	6,3538	6,2292
	40%	<i>Conso</i>	5,1110	5,0871	4,9921
		$SOC_e$	-0,0525	-0,0557	-0,0384
		$n_{mth}$	27	14	14
		$Conso_{cor}$	5,2446	5,2290	5,0899
	55%	<i>Conso</i>	5,1110	5,0872	4,9921
		$SOC_e$	-0,0525	-0,0559	-0,0384
		$n_{mth}$	27	14	14
		$Conso_{cor}$	5,2446	5,2297	5,0899
	70%	<i>Conso</i>	5,1110	5,0890	4,9921
		$SOC_e$	-0,0525	-0,0560	-0,0384
		$n_{mth}$	27	15	14
		$Conso_{cor}$	5,2446	5,2315	5,0899
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 0]$	40%	<i>Conso</i>	3,9568	3,9296	3,8490
		$SOC_e$	-0,0815	-0,0737	-0,0573
		$n_{mth}$	31	56	49
		$Conso_{cor}$	4,1643	4,1175	3,9951
	55%	<i>Conso</i>	3,9568	3,9292	3,8490
		$SOC_e$	-0,0815	-0,0733	-0,0573
		$n_{mth}$	31	50	49
		$Conso_{cor}$	4,1643	4,1160	3,9951
	70%	<i>Conso</i>	3,9568	3,9290	3,8490
		$SOC_e$	-0,0815	-0,0734	-0,0573
		$n_{mth}$	31	51	49
		$Conso_{cor}$	4,1643	4,1160	3,9951

TABLEAU C.3 – Résultats de simulation pour l'ensemble du cycle NEDC.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 20]$	40%	<i>Conso</i>	6,9330	6,8356	6,7856
		$SOC_e$	-0,0019	-0,0172	-0,0183
		$n_{mth}$	43	10	13
		$Conso_{cor}$	6,9378	6,8794	6,8321
	55%	<i>Conso</i>	6,9330	6,8322	6,7856
		$SOC_e$	-0,0019	-0,0158	-0,0183
		$n_{mth}$	43	10	13
		$Conso_{cor}$	6,9378	6,8725	6,8321
	70%	<i>Conso</i>	6,9330	6,8506	6,7856
		$SOC_e$	-0,0019	-0,0237	-0,0183
		$n_{mth}$	43	10	13
		$Conso_{cor}$	6,9378	6,9109	6,8321
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 10]$	40%	<i>Conso</i>	5,7175	5,6576	5,6274
		$SOC_e$	-0,0306	-0,0295	-0,0336
		$n_{mth}$	37	15	14
		$Conso_{cor}$	5,7954	5,7329	5,7130
	55%	<i>Conso</i>	5,7175	5,6542	5,6274
		$SOC_e$	-0,0306	-0,0285	-0,0336
		$n_{mth}$	37	14	14
		$Conso_{cor}$	5,7954	5,7267	5,7130
	70%	<i>Conso</i>	5,7175	5,6561	5,6274
		$SOC_e$	-0,0306	-0,0294	-0,0336
		$n_{mth}$	37	13	14
		$Conso_{cor}$	5,7954	5,7310	5,7130
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 0]$	40%	<i>Conso</i>	4,5844	4,5374	4,4829
		$SOC_e$	-0,0588	-0,0583	-0,0523
		$n_{mth}$	33	43	52
		$Conso_{cor}$	4,7341	4,6861	4,6161
	55%	<i>Conso</i>	4,5844	4,5067	4,4829
		$SOC_e$	-0,0588	-0,0487	-0,0523
		$n_{mth}$	33	47	52
		$Conso_{cor}$	4,7341	4,6308	4,6161
	70%	<i>Conso</i>	4,5844	4,5071	4,4829
		$SOC_e$	-0,0588	-0,0479	-0,0523
		$n_{mth}$	33	47	52
		$Conso_{cor}$	4,7341	4,6292	4,6161

TABLEAU C.4 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC urbain.

<b>Conditions</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 20]$	40%	<i>Conso</i>	7,4019	7,5308	7,3552
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0024	-0,0050	-0,0003
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	13	6
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	7,3803	7,5760	7,3579
	55%	<i>Conso</i>	7,4019	7,5295	7,3552
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0024	-0,0050	-0,0003
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	13	6
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	7,3803	7,5748	7,3579
	70%	<i>Conso</i>	7,4019	7,5324	7,3552
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0024	-0,0052	-0,0003
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	13	6
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	7,3803	7,5797	7,3579
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 10]$	40%	<i>Conso</i>	5,3183	5,4028	5,2265
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0082	-0,0069	0,0014
		<i>n<sub>mth</sub></i>	18	15	11
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,3926	5,4655	5,2137
	55%	<i>Conso</i>	5,3183	5,4028	5,2265
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0082	-0,0069	0,0014
		<i>n<sub>mth</sub></i>	18	15	11
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,3926	5,4655	5,2137
	70%	<i>Conso</i>	5,3183	5,4028	5,2265
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0082	-0,0069	0,0014
		<i>n<sub>mth</sub></i>	18	15	11
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,3926	5,4655	5,2137
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 0]$	40%	<i>Conso</i>	3,0177	3,3256	3,2804
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0057	-0,0156	-0,0155
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	29	35
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	2,9658	3,4674	3,4215
	55%	<i>Conso</i>	3,0177	3,3259	3,2804
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0057	-0,0156	-0,0155
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	29	35
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	2,9658	3,4678	3,4215
	70%	<i>Conso</i>	3,0177	3,3265	3,2804
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0057	-0,0158	-0,0155
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	29	35
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	2,9658	3,4695	3,4215
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 20]$	40%	<i>Conso</i>	8,7131	8,6439	8,5430
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0052	0,0058	-0,0043
		<i>n<sub>mth</sub></i>	24	9	6
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	8,7603	8,5916	8,5819
	55%	<i>Conso</i>	8,7131	8,6574	8,5430
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0052	0,0046	-0,0043
		<i>n<sub>mth</sub></i>	24	9	6
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	8,7603	8,6158	8,5819
	70%	<i>Conso</i>	8,7131	8,7987	8,5430
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0052	-0,0109	-0,0043
		<i>n<sub>mth</sub></i>	24	9	6
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	8,7603	8,8977	8,5819

TABLEAU C.4 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC urbain.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 10]$	40%	<i>Conso</i>	6,6508	6,4279	6,4059
		$SOC_e$	-0,0142	0,0053	-0,0018
		$n_{mth}$	21	12	11
		$Conso_{cor}$	6,7795	6,3801	6,4218
	55%	<i>Conso</i>	6,6508	6,4278	6,4059
		$SOC_e$	-0,0142	0,0052	-0,0018
		$n_{mth}$	21	12	11
		$Conso_{cor}$	6,7795	6,3804	6,4218
	70%	<i>Conso</i>	6,6508	6,4204	6,4059
		$SOC_e$	-0,0142	0,0061	-0,0018
		$n_{mth}$	21	12	11
		$Conso_{cor}$	6,7795	6,3652	6,4218
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 0]$	40%	<i>Conso</i>	4,3635	4,3649	4,4652
		$SOC_e$	-0,0073	0,0046	-0,0141
		$n_{mth}$	23	27	32
		$Conso_{cor}$	4,4294	4,3227	4,5933
	55%	<i>Conso</i>	4,3635	4,3474	4,4652
		$SOC_e$	-0,0073	0,0060	-0,0141
		$n_{mth}$	23	27	32
		$Conso_{cor}$	4,4294	4,2927	4,5933
	70%	<i>Conso</i>	4,3635	4,2588	4,4652
		$SOC_e$	-0,0073	0,0101	-0,0141
		$n_{mth}$	23	27	32
		$Conso_{cor}$	4,4294	4,1675	4,5933
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 20]$	40%	<i>Conso</i>	9,8933	9,7078	9,6705
		$SOC_e$	-0,0053	0,0099	0,0060
		$n_{mth}$	23	8	6
		$Conso_{cor}$	9,9412	9,6184	9,6165
	55%	<i>Conso</i>	9,8933	9,7140	9,6705
		$SOC_e$	-0,0053	0,0097	0,0060
		$n_{mth}$	23	8	6
		$Conso_{cor}$	9,9412	9,6260	9,6165
	70%	<i>Conso</i>	9,8933	9,7165	9,6705
		$SOC_e$	-0,0053	0,0096	0,0060
		$n_{mth}$	23	8	6
		$Conso_{cor}$	9,9412	9,6292	9,6165
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 10]$	40%	<i>Conso</i>	7,6132	7,6595	7,7022
		$SOC_e$	0,0031	-0,0058	-0,0165
		$n_{mth}$	25	15	10
		$Conso_{cor}$	7,5851	7,7117	7,8517
	55%	<i>Conso</i>	7,6132	7,6799	7,7022
		$SOC_e$	0,0031	-0,0085	-0,0165
		$n_{mth}$	25	15	10
		$Conso_{cor}$	7,5851	7,7567	7,8517
	70%	<i>Conso</i>	7,6132	7,6578	7,7022
		$SOC_e$	0,0031	-0,0056	-0,0165
		$n_{mth}$	25	15	10
		$Conso_{cor}$	7,5851	7,7088	7,8517

TABLEAU C.4 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC urbain.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 0]$	40%	<i>Conso</i>	5,4606	5,4421	5,3899
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0003	0,0010	0,0055
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	29	35
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,4576	5,4334	5,3403
	55%	<i>Conso</i>	5,4606	5,4405	5,3899
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0003	0,0011	0,0055
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	32	35
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,4576	5,4307	5,3403
	70%	<i>Conso</i>	5,4606	5,4410	5,3899
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0003	0,0010	0,0055
		<i>n<sub>mth</sub></i>	21	30	35
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,4576	5,4323	5,3403

TABLEAU C.5 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC périurbain.

<b>Conditions</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 20]$	40%	<i>Conso</i>	4,4479	4,5013	4,4767
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0006	0,0079	-0,0170
		<i>n<sub>mth</sub></i>	19	16	16
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,4492	4,4826	4,5167
	55%	<i>Conso</i>	4,4479	4,5016	4,4767
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0006	0,0078	-0,0170
		<i>n<sub>mth</sub></i>	19	16	16
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,4492	4,4831	4,5167
	70%	<i>Conso</i>	4,4479	4,5010	4,4767
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0006	0,0081	-0,0170
		<i>n<sub>mth</sub></i>	19	16	16
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,4492	4,4818	4,5167
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 10]$	40%	<i>Conso</i>	3,6348	3,7402	3,7292
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0075	-0,0122	-0,0349
		<i>n<sub>mth</sub></i>	19	21	16
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,6172	3,7689	3,8115
	55%	<i>Conso</i>	3,6348	3,7398	3,7292
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0075	-0,0120	-0,0349
		<i>n<sub>mth</sub></i>	19	21	16
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,6172	3,7682	3,8115
	70%	<i>Conso</i>	3,6348	3,7398	3,7292
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	0,0075	-0,0120	-0,0349
		<i>n<sub>mth</sub></i>	19	21	16
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,6172	3,7682	3,8115
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 0]$	40%	<i>Conso</i>	2,9024	2,9955	2,9621
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0114	-0,0268	-0,0438
		<i>n<sub>mth</sub></i>	23	32	25
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	2,9292	3,0586	3,0652
	55%	<i>Conso</i>	2,9024	3,0090	2,9621
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0114	-0,0272	-0,0438

TABLEAU C.5 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC périurbain.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 20]$	70%	$n_{mth}$	23	29	25
		$Conso_{cor}$	2,9292	3,0731	3,0652
	40%	$Conso$	2,9024	3,0093	2,9621
		$SOC_e$	-0,0114	-0,0273	-0,0438
	55%	$n_{mth}$	23	29	25
		$Conso_{cor}$	2,9292	3,0737	3,0652
		$Conso$	4,9053	4,9418	4,8399
		$SOC_e$	0,0100	-0,0165	0,0118
	70%	$n_{mth}$	27	16	15
		$Conso_{cor}$	4,8817	4,9806	4,8120
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 10]$	40%	$Conso$	4,9053	4,9377	4,8399
		$SOC_e$	0,0100	-0,0152	0,0118
		$n_{mth}$	27	15	15
		$Conso_{cor}$	4,8817	4,9735	4,8120
	55%	$Conso$	4,9053	4,9011	4,8399
		$SOC_e$	0,0100	0,0004	0,0118
		$n_{mth}$	27	14	15
		$Conso_{cor}$	4,8817	4,9002	4,8120
	70%	$Conso$	4,0781	4,1359	4,1056
		$SOC_e$	0,0165	-0,0036	-0,0132
		$n_{mth}$	26	20	15
		$Conso_{cor}$	4,0392	4,1444	4,1366
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 0]$	40%	$Conso$	4,0781	4,1338	4,1056
		$SOC_e$	0,0165	-0,0026	-0,0132
		$n_{mth}$	26	20	15
		$Conso_{cor}$	4,0392	4,1399	4,1366
	55%	$Conso$	4,0781	4,1355	4,1056
		$SOC_e$	0,0165	-0,0034	-0,0132
		$n_{mth}$	26	20	15
		$Conso_{cor}$	4,0392	4,1436	4,1366
	70%	$Conso$	3,3241	3,3814	3,3274
		$SOC_e$	0,0061	-0,0271	-0,0219
		$n_{mth}$	24	29	25
		$Conso_{cor}$	3,3097	3,4452	3,3789
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 20]$	40%	$Conso$	3,3241	3,3855	3,3274
		$SOC_e$	0,0061	-0,0284	-0,0219
		$n_{mth}$	24	30	25
		$Conso_{cor}$	3,3097	3,4524	3,3789
	55%	$Conso$	3,3241	3,4051	3,3274
		$SOC_e$	0,0061	-0,0311	-0,0219
		$n_{mth}$	24	30	25
		$Conso_{cor}$	3,3097	3,4784	3,3789
	70%	$Conso$	5,4024	5,3554	5,3168
		$SOC_e$	0,0066	-0,0095	-0,0225
		$n_{mth}$	28	16	15
		$Conso_{cor}$	5,3869	5,3778	5,3697
	55%	$Conso$	5,4024	5,3462	5,3168
		$SOC_e$	0,0066	-0,0093	-0,0225

 $= [3, 20]$

TABLEAU C.5 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC périurbain.

Condition	$SOC_{e,init}$	Critères	Stratégie - 1	Stratégie - 2	Stratégie - 3
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 10]$	70%	$n_{mth}$	28	17	15
		$Conso_{cor}$	5,3869	5,3681	5,3697
	40%	$Conso$	5,4024	5,3459	5,3168
		$SOC_e$	0,0066	-0,0093	-0,0225
	55%	$n_{mth}$	28	17	15
		$Conso_{cor}$	5,3869	5,3677	5,3697
		$Conso$	4,5700	4,5208	4,5082
		$SOC_e$	0,0028	0,0132	-0,0032
	70%	$n_{mth}$	29	18	14
		$Conso_{cor}$	4,5633	4,4898	4,5159
		$Conso$	4,5700	4,5147	4,5082
		$SOC_e$	0,0028	0,0158	-0,0032
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 0]$	40%	$n_{mth}$	29	19	14
		$Conso_{cor}$	4,5633	4,4774	4,5159
	55%	$Conso$	4,5700	4,5205	4,5082
		$SOC_e$	0,0028	0,0132	-0,0032
	70%	$n_{mth}$	29	18	14
		$Conso_{cor}$	4,5633	4,4893	4,5159
		$Conso$	3,7598	3,7752	3,7355
		$SOC_e$	0,0029	-0,0018	-0,0132
	55%	$n_{mth}$	32	25	23
		$Conso_{cor}$	3,7530	3,7795	3,7665
		$Conso$	3,7598	3,8066	3,7355
		$SOC_e$	0,0029	-0,0209	-0,0132
	70%	$n_{mth}$	32	26	23
		$Conso_{cor}$	3,7530	3,8558	3,7665
		$Conso$	3,7598	3,7808	3,7355
		$SOC_e$	0,0029	-0,0043	-0,0132

TABLEAU C.6 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC autoroute.

Conditions	$SOC_{e,init}$	Critères	Stratégie - 1	Stratégie - 2	Stratégie - 3
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 20]$	40%	$Conso$	4,7114	4,7640	4,6789
		$SOC_e$	-0,0134	-0,0194	-0,0071
		$n_{mth}$	6	4	4
		$Conso_{cor}$	4,7570	4,8299	4,7031
	55%	$Conso$	4,7114	4,7966	4,6789
		$SOC_e$	-0,0134	-0,0300	-0,0071
		$n_{mth}$	6	4	4
		$Conso_{cor}$	4,7570	4,8984	4,7031
	70%	$Conso$	4,7114	4,7639	4,6789
		$SOC_e$	-0,0134	-0,0194	-0,0071
		$n_{mth}$	6	4	4
		$Conso_{cor}$	4,7570	4,8298	4,7031

TABLEAU C.6 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC autoroute.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 10]$	40%	<i>Conso</i>	4,2690	4,2733	4,2422
		$SOC_e$	-0,0241	-0,0148	-0,0171
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	4,3510	4,3236	4,3002
	55%	<i>Conso</i>	4,2690	4,3070	4,2422
		$SOC_e$	-0,0241	-0,0257	-0,0171
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	4,3510	4,3945	4,3002
	70%	<i>Conso</i>	4,2690	4,3070	4,2422
		$SOC_e$	-0,0241	-0,0257	-0,0171
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	4,3510	4,3945	4,3002
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 0]$	40%	<i>Conso</i>	3,8333	3,8066	3,7344
		$SOC_e$	-0,0356	-0,0127	-0,0045
		$n_{mth}$	3	7	7
		$Conso_{cor}$	3,9543	3,8497	3,7498
	55%	<i>Conso</i>	3,8333	3,8045	3,7344
		$SOC_e$	-0,0356	-0,0121	-0,0045
		$n_{mth}$	3	7	7
		$Conso_{cor}$	3,9543	3,8455	3,7498
	70%	<i>Conso</i>	3,8333	3,8037	3,7344
		$SOC_e$	-0,0356	-0,0117	-0,0045
		$n_{mth}$	3	7	7
		$Conso_{cor}$	3,9543	3,8436	3,7498
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 20]$	40%	<i>Conso</i>	5,0237	4,9933	4,9856
		$SOC_e$	-0,0255	-0,0158	-0,0230
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	5,1104	5,0469	5,0637
	55%	<i>Conso</i>	5,0237	4,9934	4,9856
		$SOC_e$	-0,0255	-0,0158	-0,0230
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	5,1104	5,0472	5,0637
	70%	<i>Conso</i>	5,0237	4,9931	4,9856
		$SOC_e$	-0,0255	-0,0157	-0,0230
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	5,1104	5,0464	5,0637
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 10]$	40%	<i>Conso</i>	4,5165	4,6061	4,4667
		$SOC_e$	-0,0182	-0,0410	-0,0091
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	4,5782	4,7455	4,4975
	55%	<i>Conso</i>	4,5165	4,6091	4,4667
		$SOC_e$	-0,0182	-0,0420	-0,0091
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	4,5782	4,7519	4,4975
	70%	<i>Conso</i>	4,5165	4,6095	4,4667
		$SOC_e$	-0,0182	-0,0421	-0,0091
		$n_{mth}$	5	4	4
		$Conso_{cor}$	4,5782	4,7526	4,4975

TABLEAU C.6 – Résultats de simulation pour le cycle WLTC autoroute.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 0]$	40%	<i>Conso</i>	4,0666	3,9977	3,9738
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0232	0,0005	-0,0018
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	7	7
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,1454	3,9960	3,9801
	55%	<i>Conso</i>	4,0666	3,9977	3,9738
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0232	0,0005	-0,0018
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	7	7
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,1454	3,9960	3,9801
	70%	<i>Conso</i>	4,0666	4,0017	3,9738
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0232	-0,0008	-0,0018
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	7	7
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,1454	4,0045	3,9801
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 20]$	40%	<i>Conso</i>	5,2240	5,1927	5,1411
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0206	0,0006	0,0048
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	3	4
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,2939	5,1905	5,1250
	55%	<i>Conso</i>	5,2240	5,1920	5,1411
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0206	0,0008	0,0048
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	3	4
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,2939	5,1895	5,1250
	70%	<i>Conso</i>	5,2240	5,1933	5,1411
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0206	0,0004	0,0048
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	3	4
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,2939	5,1918	5,1250
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 10]$	40%	<i>Conso</i>	4,7570	4,8403	4,7224
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0099	-0,0358	-0,0107
		<i>n<sub>mth</sub></i>	7	3	4
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,7906	4,9620	4,7587
	55%	<i>Conso</i>	4,7570	4,8400	4,7224
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0099	-0,0357	-0,0107
		<i>n<sub>mth</sub></i>	7	3	4
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,7906	4,9614	4,7587
	70%	<i>Conso</i>	4,7570	4,8402	4,7224
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0099	-0,0359	-0,0107
		<i>n<sub>mth</sub></i>	7	3	4
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,7906	4,9623	4,7587
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 0]$	40%	<i>Conso</i>	4,3088	4,3647	4,3136
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0215	-0,0340	-0,0273
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	7	8
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,3817	4,4802	4,4064
	55%	<i>Conso</i>	4,3088	4,3318	4,3136
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0215	-0,0238	-0,0273
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	7	8
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,3817	4,4127	4,4064
	70%	<i>Conso</i>	4,3088	4,3572	4,3136
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0215	-0,0313	-0,0273
		<i>n<sub>mth</sub></i>	6	8	8
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,3817	4,4637	4,4064

TABLEAU C.7 – Résultats de simulation pour l'ensemble du cycle WLTC.

<b>Conditions</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 20]$	40%	<i>Conso</i>	4,9342	4,9973	4,9313
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0116	-0,0165	-0,0244
		<i>n<sub>mth</sub></i>	46	33	26
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,9482	5,0172	4,9607
	55%	<i>Conso</i>	4,9342	5,0089	4,9313
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0116	-0,0271	-0,0244
		<i>n<sub>mth</sub></i>	46	33	26
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,9482	5,0416	4,9607
	70%	<i>Conso</i>	4,9342	4,9974	4,9313
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0116	-0,0164	-0,0244
		<i>n<sub>mth</sub></i>	46	33	26
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,9482	5,0172	4,9607
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 10]$	40%	<i>Conso</i>	4,0838	4,1505	4,1104
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0248	-0,0339	-0,0506
		<i>n<sub>mth</sub></i>	42	40	31
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,1138	4,1914	4,1714
	55%	<i>Conso</i>	4,0838	4,1622	4,1104
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0248	-0,0447	-0,0506
		<i>n<sub>mth</sub></i>	42	40	31
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,1138	4,2162	4,1714
	70%	<i>Conso</i>	4,0838	4,1623	4,1104
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0248	-0,0447	-0,0506
		<i>n<sub>mth</sub></i>	42	40	31
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,1138	4,2162	4,1714
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [1, 0]$	40%	<i>Conso</i>	3,2482	3,3273	3,2785
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0413	-0,0551	-0,0639
		<i>n<sub>mth</sub></i>	47	68	67
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,2980	3,3938	3,3556
	55%	<i>Conso</i>	3,2482	3,3335	3,2785
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0413	-0,0549	-0,0639
		<i>n<sub>mth</sub></i>	47	65	67
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,2980	3,3997	3,3556
	70%	<i>Conso</i>	3,2482	3,3335	3,2785
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0413	-0,0548	-0,0639
		<i>n<sub>mth</sub></i>	47	65	67
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,2980	3,3996	3,3556
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 20]$	40%	<i>Conso</i>	5,4536	5,4523	5,3840
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0207	-0,0265	-0,0154
		<i>n<sub>mth</sub></i>	56	29	25
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,4786	5,4842	5,4026
	55%	<i>Conso</i>	5,4536	5,4520	5,3840
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0207	-0,0265	-0,0154
		<i>n<sub>mth</sub></i>	56	28	25
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,4786	5,4839	5,4026

TABLEAU C.7 – Résultats de simulation pour l'ensemble du cycle WLTC.

<b>Condition</b>	<b><math>SOC_{e,init}</math></b>	<b>Critères</b>	<b>Stratégie - 1</b>	<b>Stratégie - 2</b>	<b>Stratégie - 3</b>
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 10]$	70%	<i>Conso</i>	5,4536	5,4519	5,3840
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0207	-0,0262	-0,0154
		<i>n<sub>mth</sub></i>	56	27	25
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,4786	5,4836	5,4026
	40%	<i>Conso</i>	4,5758	4,6076	4,5396
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0159	-0,0394	-0,0240
		<i>n<sub>mth</sub></i>	52	36	30
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,5949	4,6551	4,5685
	55%	<i>Conso</i>	4,5758	4,6075	4,5396
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0159	-0,0393	-0,0240
		<i>n<sub>mth</sub></i>	52	36	30
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,5949	4,6550	4,5685
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [2, 0]$	70%	<i>Conso</i>	4,5758	4,6076	4,5396
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0159	-0,0395	-0,0240
		<i>n<sub>mth</sub></i>	52	36	30
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	4,5949	4,6552	4,5685
	40%	<i>Conso</i>	3,7260	3,7309	3,7081
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0243	-0,0219	-0,0378
		<i>n<sub>mth</sub></i>	53	63	64
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,7553	3,7573	3,7537
	55%	<i>Conso</i>	3,7260	3,7307	3,7081
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0243	-0,0219	-0,0378
		<i>n<sub>mth</sub></i>	53	64	64
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,7553	3,7571	3,7537
	70%	<i>Conso</i>	3,7260	3,7304	3,7081
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0243	-0,0219	-0,0378
		<i>n<sub>mth</sub></i>	53	64	64
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	3,7553	3,7568	3,7537
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 20]$	40%	<i>Conso</i>	5,9361	5,8763	5,8334
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0193	0,0010	-0,0117
		<i>n<sub>mth</sub></i>	57	27	25
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,9594	5,8751	5,8476
	55%	<i>Conso</i>	5,9361	5,8722	5,8334
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0193	0,0011	-0,0117
		<i>n<sub>mth</sub></i>	57	28	25
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,9594	5,8708	5,8476
	70%	<i>Conso</i>	5,9361	5,8728	5,8334
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0193	0,0008	-0,0117
		<i>n<sub>mth</sub></i>	57	28	25
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,9594	5,8719	5,8476
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 10]$	40%	<i>Conso</i>	5,0410	5,0515	5,0089
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0039	-0,0284	-0,0304
		<i>n<sub>mth</sub></i>	61	36	28
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,0458	5,0857	5,0456
	55%	<i>Conso</i>	5,0410	5,0510	5,0089
		<i>SOC<sub>e</sub></i>	-0,0039	-0,0283	-0,0304
		<i>n<sub>mth</sub></i>	61	37	28
		<i>Conso<sub>cor</sub></i>	5,0458	5,0851	5,0456

TABLEAU C.7 – Résultats de simulation pour l'ensemble du cycle WLTC.

Condition	$SOC_{e,init}$	Critères	Stratégie - 1	Stratégie - 2	Stratégie - 3
$[P_{aux}, \Delta T_{cth}] = [3, 0]$	70%	$Conso$	5,0410	5,0511	5,0089
		$SOC_e$	-0,0039	-0,0283	-0,0304
		$n_{mth}$	61	36	28
		$Conso_{cor}$	5,0458	5,0853	5,0456
	40%	$Conso$	4,1809	4,2060	4,1606
		$SOC_e$	-0,0183	-0,0349	-0,0350
		$n_{mth}$	59	61	66
		$Conso_{cor}$	4,2029	4,2481	4,2029
	55%	$Conso$	4,1809	4,2102	4,1606
		$SOC_e$	-0,0183	-0,0436	-0,0350
		$n_{mth}$	59	65	66
		$Conso_{cor}$	4,2029	4,2628	4,2029
	70%	$Conso$	4,1809	4,2061	4,1606
		$SOC_e$	-0,0183	-0,0347	-0,0350
		$n_{mth}$	59	63	66
		$Conso_{cor}$	4,2029	4,2480	4,2029

## C.2 Figures des résultats

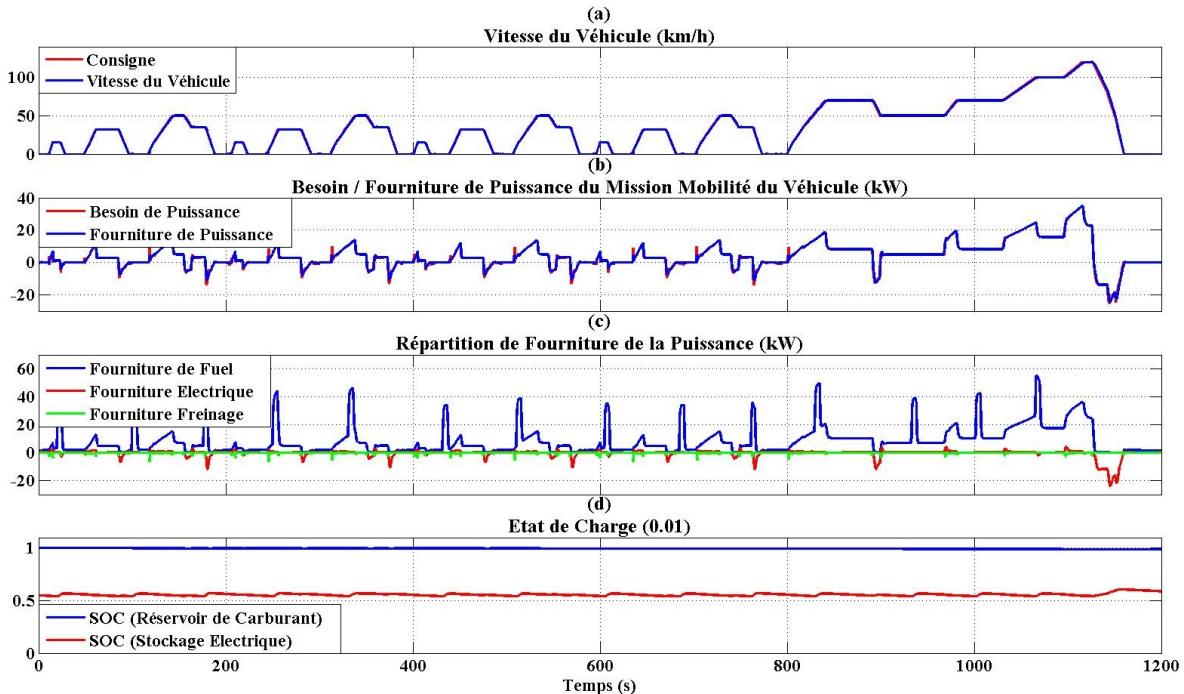
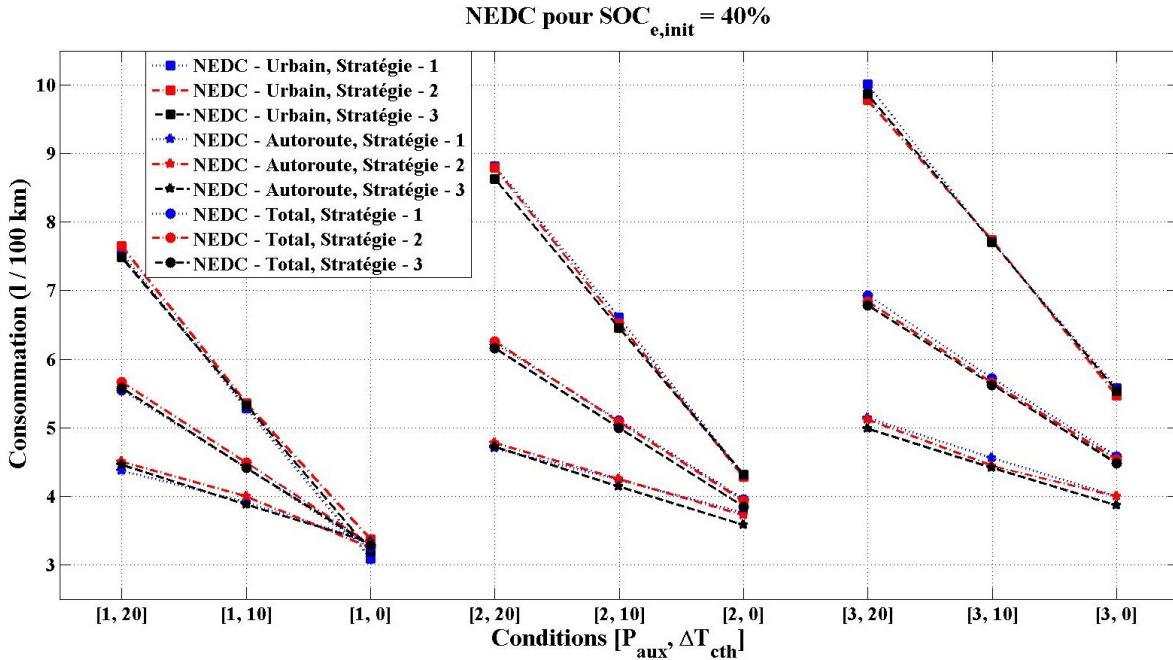
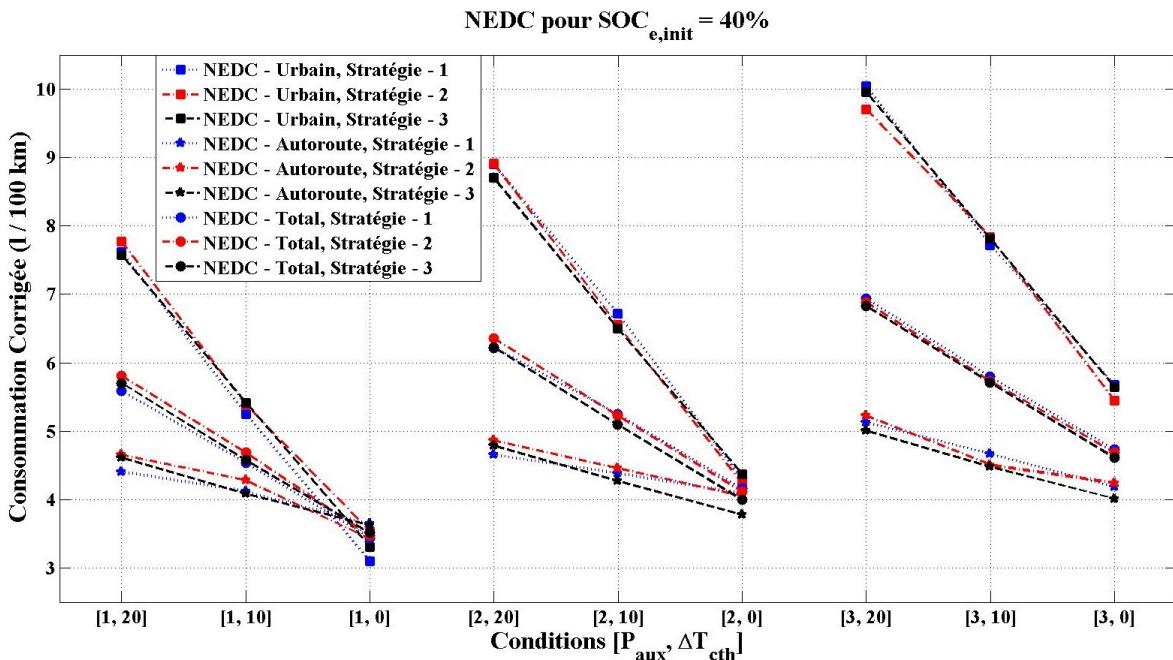


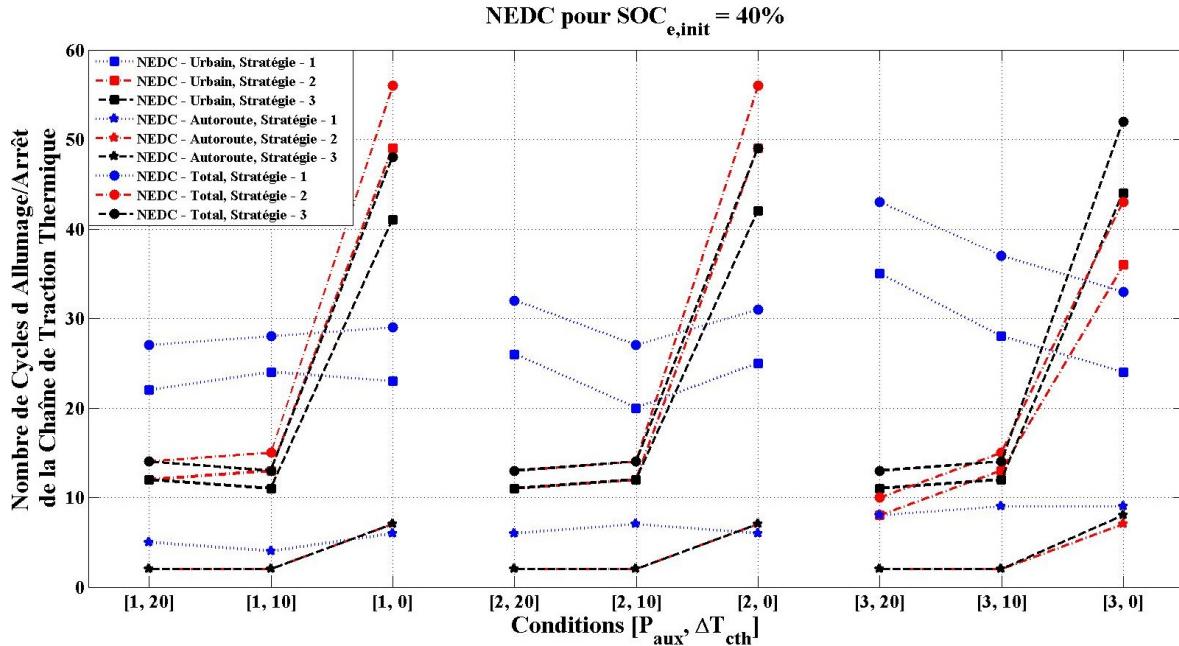
FIGURE C.1 – Résultats de simulation avec la stratégie fondée sur PFC, fonctionnement boost pour le cycle NEDC.



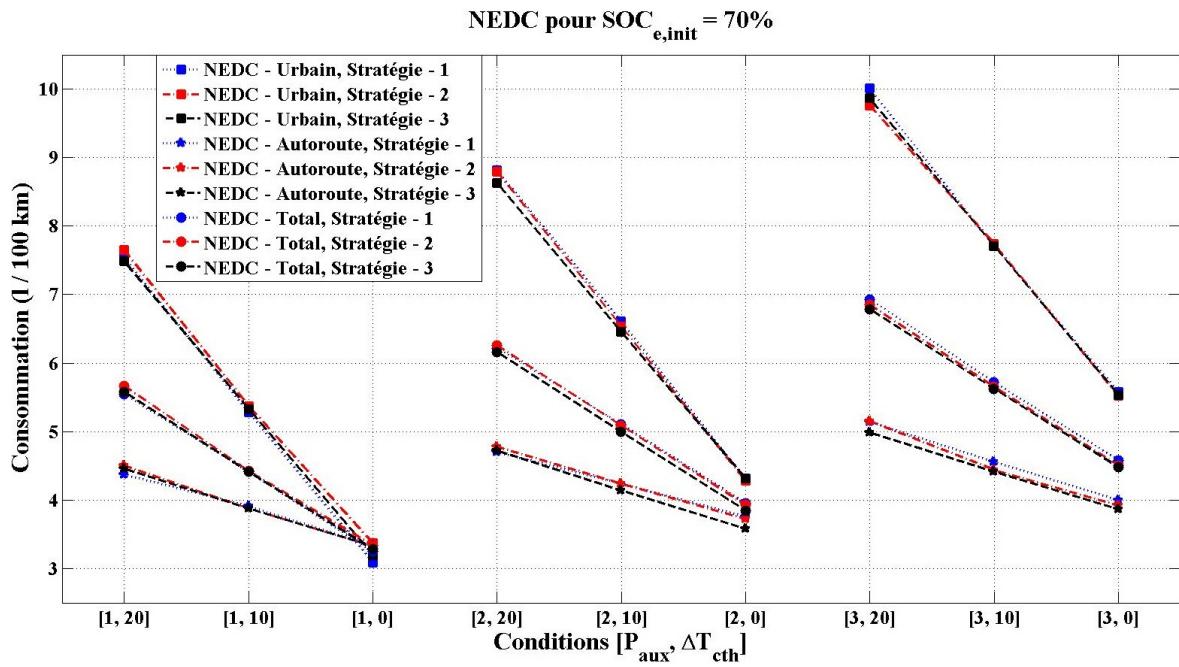
**FIGURE C.2 –** Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 40\%$ .



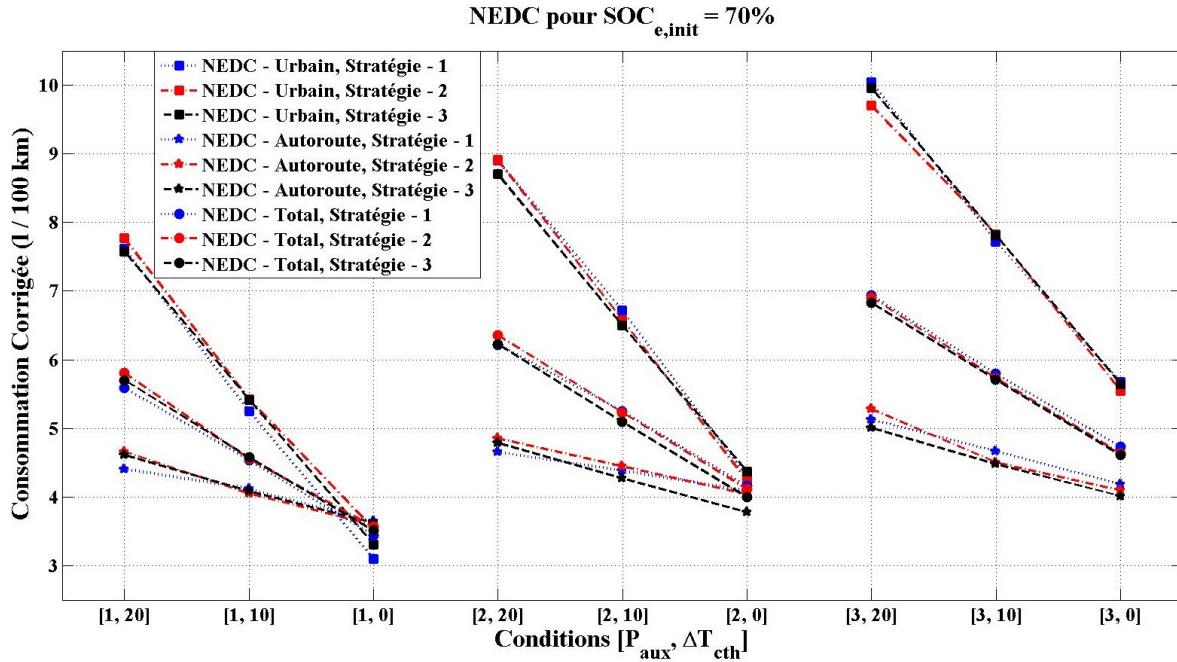
**FIGURE C.3 –** Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 40\%$ .



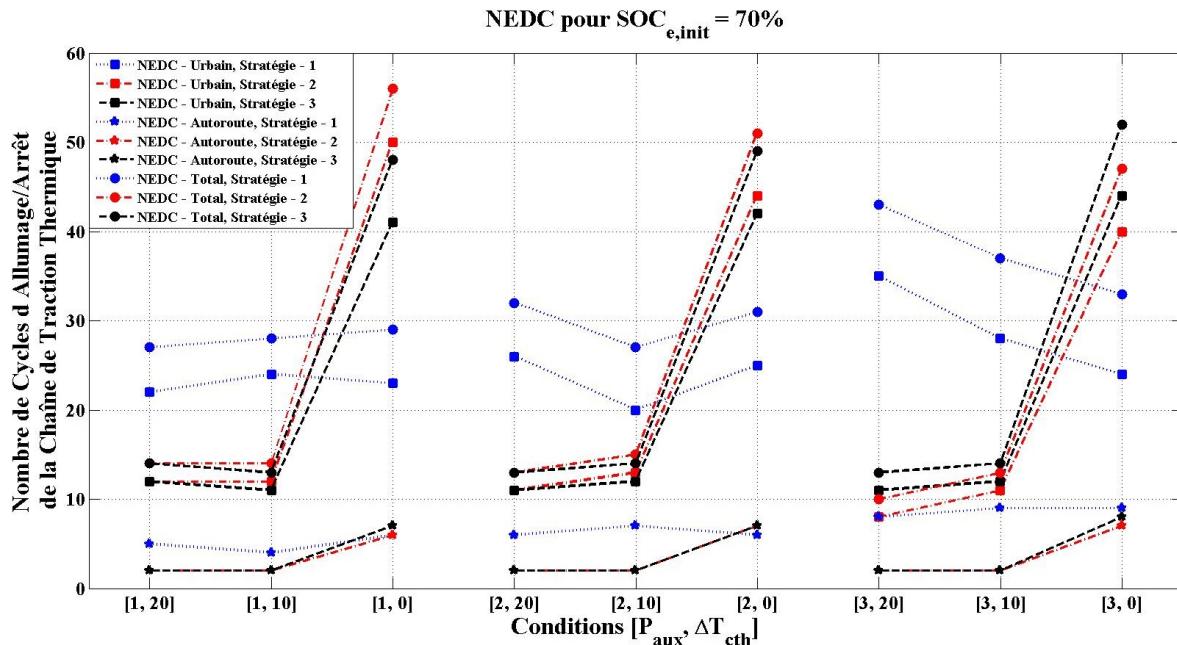
**FIGURE C.4** – Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 40\%$ .



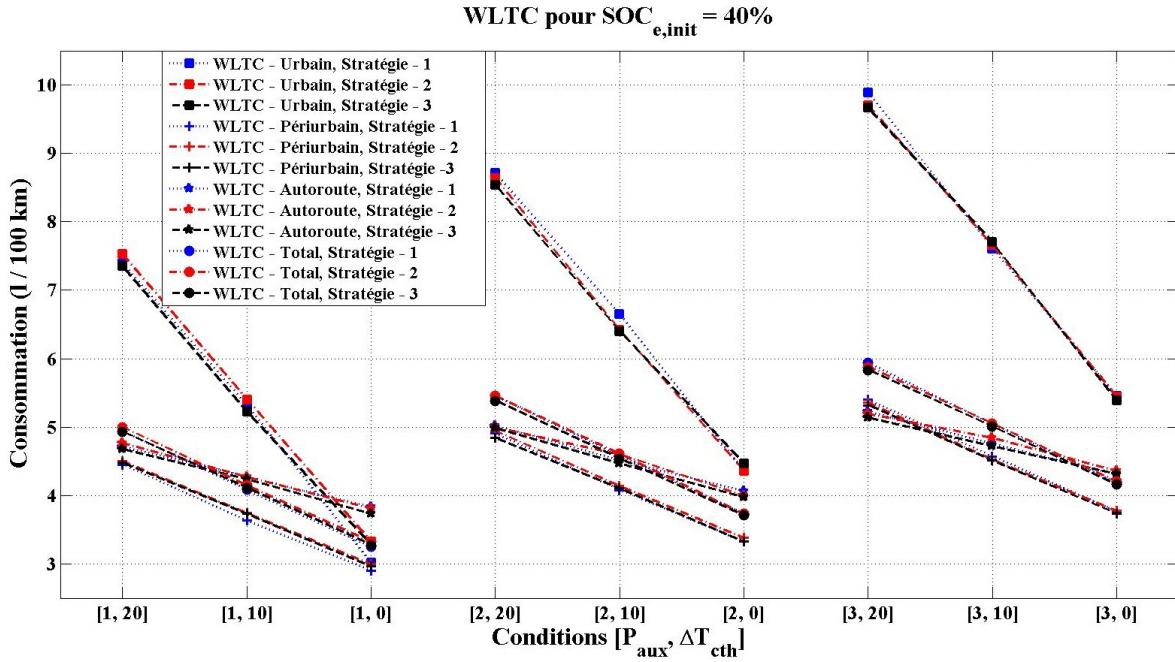
**FIGURE C.5** – Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 70\%$ .



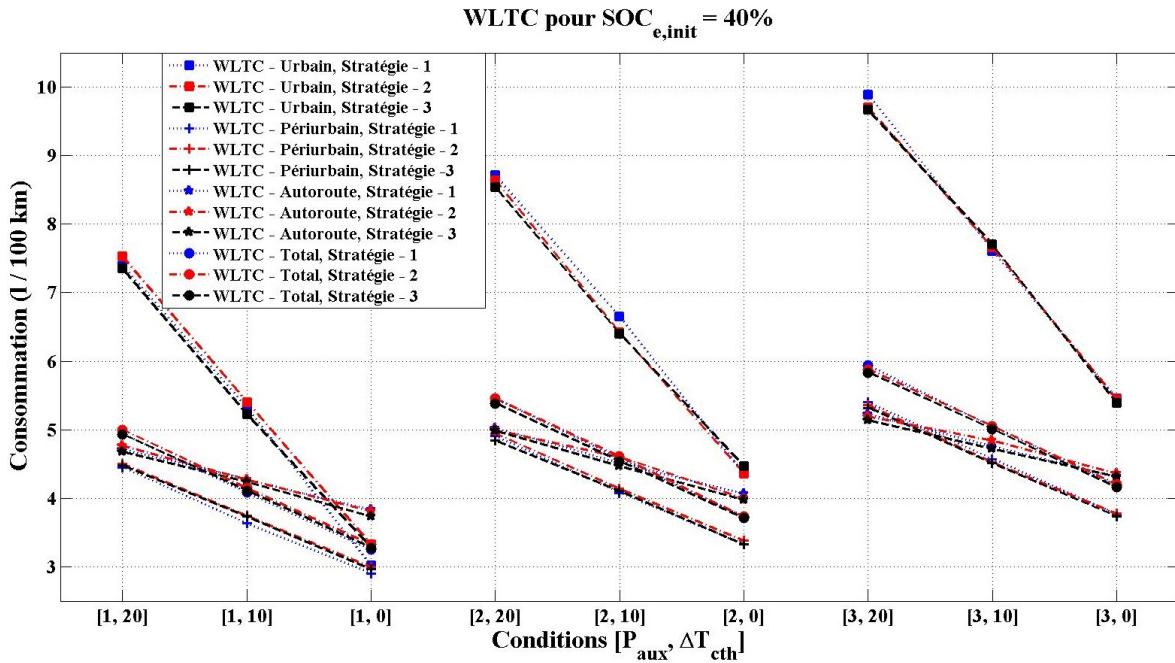
**FIGURE C.6** – Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 70\%$ .



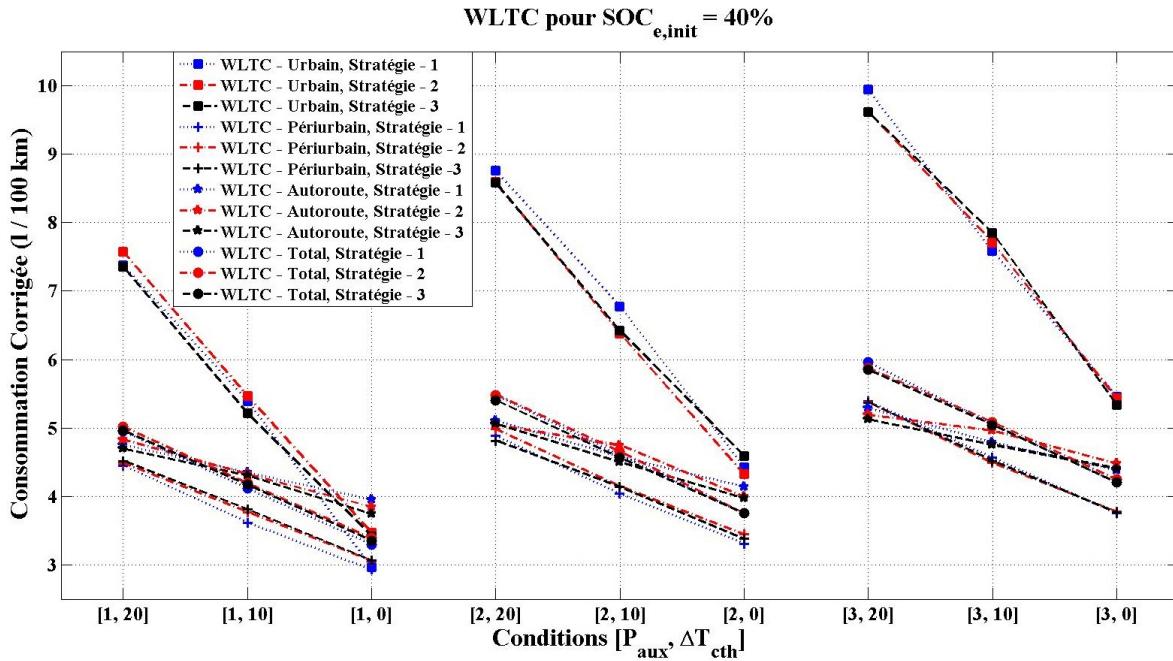
**FIGURE C.7** – Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle NEDC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 70\%$ .



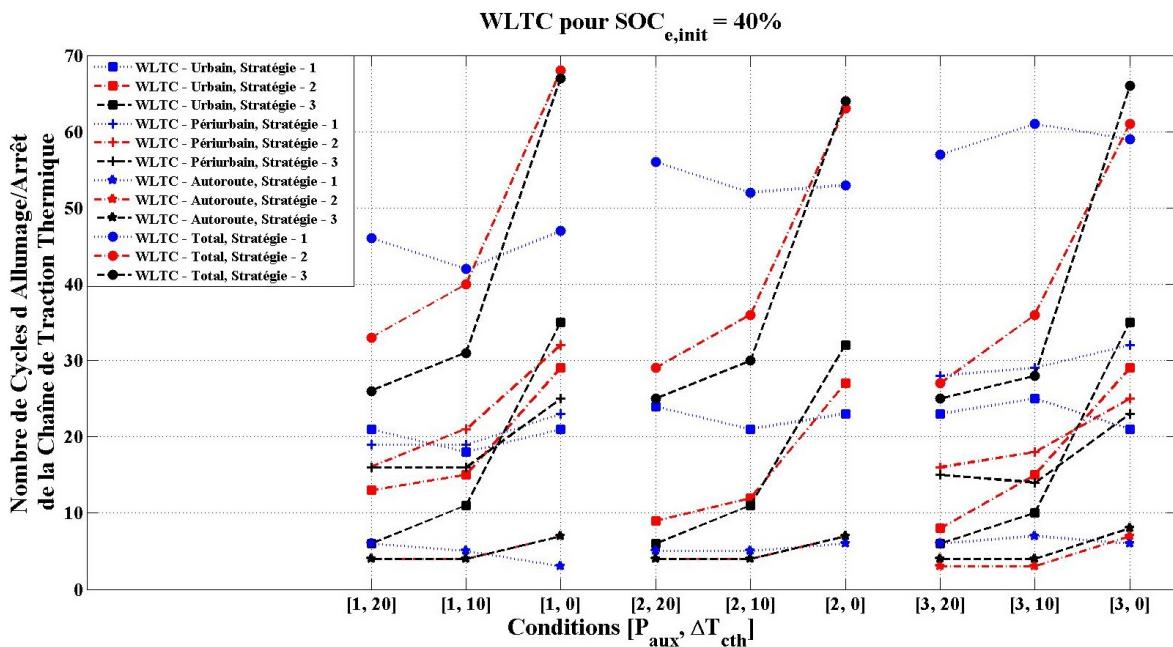
**FIGURE C.8 – Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 40\%$ .**



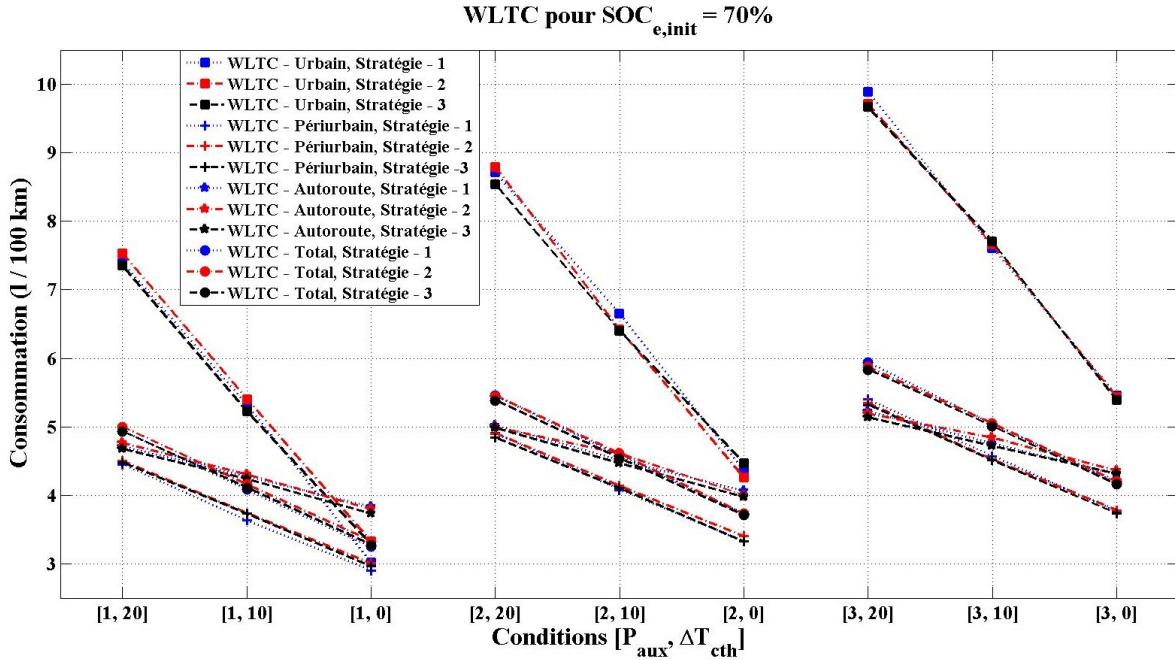
**FIGURE C.9 – Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 40\%$ .**



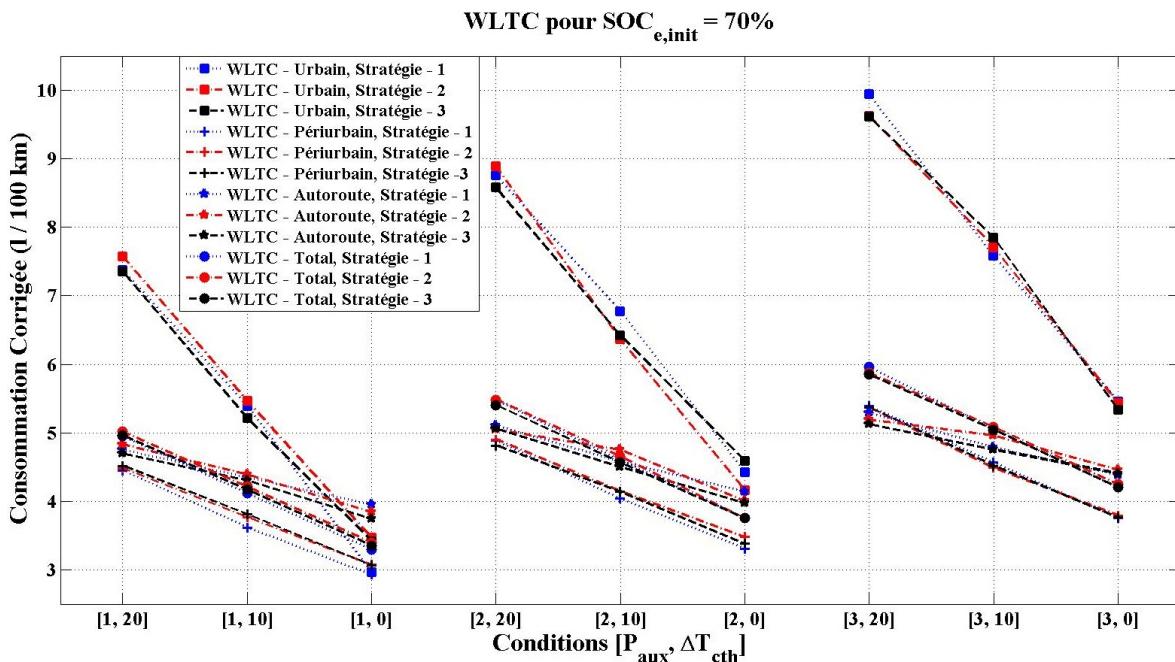
**FIGURE C.10** – Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 40\%$ .



**FIGURE C.11** – Consommations selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 70\%$ .



**FIGURE C.12 –** Consommations corrigées selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 70\%$ .



**FIGURE C.13 –** Nombre du cycle d'allumage/arrêt de la chaîne de traction thermique selon les stratégies de gestion d'énergie pour le cycle WLTC selon la condition de fonctionnement  $[P_{aux}, \Delta T_{cth}]$  pour  $SOC_{e,init} = 70\%$ .

**Titre :** Optimisation énergétique d'un véhicule hybride

**Mots clés :** Optimisation énergétique, Optimisation modulaire, Véhicule hybride, Motorisation électrique, Modélisation fonctionnelle

**Résumé :** Les progrès technologiques augmentent la complexité des systèmes énergétiques, ce qui permet d'avoir variés sources et architectures possibles. Si le contexte économique et écologique est également pris en compte, l'industrie automobile est menée à aligner sa production sur des véhicules hybrides ou électriques qui disposent d'une gestion de l'énergie sophistiquée. Ainsi, les études pour la conception sont orientées à l'optimisation et à la gestion de l'énergie en tenant compte les tendances des constructeurs : i) augmenter les performances des véhicules, ii) avoir des véhicules moins polluants en réduisant la consommation de carburant et iii) diminuer le temps nécessaire à la conception et au processus de validation. Face à ces problèmes, une approche qui aide le concepteur à caractériser le système de gestion de l'énergie d'un VEH est proposée. Cette caractérisation consiste à : i) choisir l'architecture de la chaîne de traction, ii) le dimensionnement des composants (groupes) et iii) le contrôleur de gestion de l'énergie. Pour accomplir ces tâches, une méthode de modélisation énergétique fonctionnelle est proposée. Cette approche proposée à un

niveau d'abstraction "juste nécessaire" qui permet d'avoir une analyse énergétique pour une série de cas d'utilisation. La méthode repose sur des boucles de contrôle locales, un contrôleur global et des équations de base et elle permet d'avoir une optimisation modulaire pour tout changement d'architecture. Prochaine étape de la validation est l'adaptation du modèle fonctionnel afin d'obtenir le contrôleur de haut niveau pour le niveau multi-physique avec deux étapes proposées : i) l'ajustement des paramètres des éléments fonctionnels et ii) l'interconnexion les modèles fonctionnels et multi-physiques. Après l'illustration du démonstrateur d'un VEH, trois stratégies de gestion de l'énergie sont proposées : i) fondée sur des règles, ii) fondée sur PFC avec fonctionnement de partage de besoin par priorisation et iii) fondée sur PFC avec fonctionnement boost. Les stratégies de gestion de l'énergie proposées sont ensuite comparées par indicateurs de performance (consommation de carburant, nombre de cycles marche/arrêt du groupe motopropulseur et consommation de carburant corrigée avec variation de l'état de charge du stockage électrique) avec des cas d'usages définis.

**Title :** Optimisation énergétique d'un véhicule hybride

**Keywords :** Energy optimization, Modular optimization, Hybrid vehicle, Electric drive, Functional modelling

**Abstract :** Technology advancements increase the complexity of energy systems which bring additional varieties of sources and possible architectures to choose. If the economic and ecological context is also included, the automobile industry is influenced to align their production to hybrid or battery electric vehicles that have sophisticated energy management system. Thus, researchers and designers have oriented their studies for system design, optimisation and energy management that take into consideration the constructor tendencies : i) increasing vehicle performances, ii) having less polluting vehicles by reducing fuel consumption and iii) decreasing the time needed for design and validation process. Against these problematics, an approach that assists the system designer to fully characterize the energy management system of a HEV is proposed. This characterization consists : i) choosing powertrain architecture, ii) component (units) sizing and iii) energy management controller. In order to accomplish these tasks, a functional energetic modelling method is

proposed. Proposed functional modelling level has a level of abstraction "just necessary" which permits to have energetic analysis for a series of use case. This method relies on local control loops, a global controller and basic equations and it allows to have a modular optimisation for any architecture changes. The second-stage in the validation is completed by adapting the functional model in order to obtain the high-level controller for the multi-physical level with two offered steps : i) adjustment the functional elements' parameters and ii) interconnection the functional and multi-physical models. After the illustration of the demonstrator of a HEV, three strategies for energy management is proposed : i) based on rules, ii) based on PFC with power sharing function and iii) based on PFC with booster function. The proposed energy management strategies then compared by performance indicators (fuel consumption, number of on/off cycles of engine powertrain and corrected fuel consumption with variation of state of charge of electrical storage) with defined use cases.

