

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE LITTÉRAIRE.....	5
1.1 Méthodes de modélisation	5
1.2 Le véhicule hybride et sa simulation.....	6
1.3 Technologies employées dans les véhicules hybrides	7
1.4 Le système hybride de la Toyota Prius	7
CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DE LA SIMULATION MULTI-DOMAINES.....	8
2.1 Introduction.....	8
2.2 La simulation multi-domaines	8
2.2.1 Enjeu de la simulation multi-domaines.....	8
2.2.2 Problèmes des systèmes électromécaniques	9
2.2.3 Résumé et solution.....	10
2.3 Les modules contenus dans Matlab/Simulink.....	10
2.3.1 Simulink.....	10
2.3.2 SimPowerSystems (SPS)	11
2.3.3 SimMechanics.....	12
2.3.4 SimDriveline	12
2.3.5 Interconnexion des modules.....	13
2.4 Exemple d'application : la bobineuse.	14
2.4.1 Présentation du modèle de la bobineuse	14
2.4.2 Description du système complet.	15
2.4.2.1 Le sous-système de la machine électrique et son entraînement.....	16
2.4.2.2 Le réducteur de vitesse.....	18
2.4.2.3 Le contrôleur de la bobineuse	19
2.4.2.4 La bobineuse	19
2.4.3 Modélisation avec le module SimMechanics.....	21
2.4.4 Résultats obtenus avec le modèle SimMechanics.....	23
2.4.5 Comparaison des résultats avec le modèle original	25

2.5	Conclusion	27
CHAPITRE 3 LE SYSTÈME DE PROPULSION HYBRIDE ÉLECTRIQUE.....		29
3.1	Introduction.....	29
3.2	Définition et présentation de la voiture hybride.....	29
3.3	Les différentes architectures hybrides.....	32
3.3.1	L'architecture hybride série	32
3.3.2	L'architecture hybride parallèle	33
3.3.3	L'architecture hybride série/parallèle	34
3.3.4	Choix de l'architecture pour la Toyota Prius	35
3.4	La Toyota Prius et son système THS II	36
3.4.1	Les différents modes de fonctionnement	37
3.4.2	Démarrage, basses et moyennes vitesses	38
3.4.3	Conduite normale.....	39
3.4.4	Forte accélération.....	41
3.4.5	Décélération, freinage et arrêt	41
3.4.6	Recharge de la batterie.....	42
3.5	Caractéristiques principales du système THS II	43
3.5.1	Le circuit électrique haute tension	44
3.5.2	La transmission hybride et son répartiteur de puissance.....	47
3.5.3	Le système de gestion de l'énergie	49
3.6	Conclusion	50
CHAPITRE 4 DESCRIPTION DU MODÈLE SÉRIE.....		52
4.1	Introduction.....	52
4.2	Le modèle série dans son ensemble et sa commande	52
4.3	Le système électrique.....	54
4.3.1	Le moteur électrique et son entraînement	55
4.3.1.1	La machine synchrone à aimants permanents.....	57
4.3.1.2	Onduleur triphasé.....	60
4.3.1.3	Contrôleur	62
4.3.1.4	Commande vectorielle	63
4.3.2	La génératrice et son entraînement électrique.....	64
4.3.2.1	Paramètres de la génératrice	64
4.3.2.2	Régulateur de vitesse	65
4.3.3	Le circuit d'alimentation haute tension.....	66
4.3.3.1	Le convertisseur CC/CC	67
4.3.3.2	Le régulateur de tension du bus CC.....	70
4.3.3.3	Le modèle de batterie.....	72
4.4	Le système mécanique	73
4.4.1	Le moteur à combustion interne.....	74
4.4.2	La boîte de vitesses	75
4.4.3	Le différentiel.....	77
4.4.4	La dynamique longitudinale du véhicule.....	78
4.4.5	Le contact des roues avant au sol.....	80

4.5	Conclusion	82
CHAPITRE 5 RÉSULTATS DE SIMULATION DU MODÈLE SÉRIE.....		83
5.1	Introduction.....	83
5.2	Définition des références des moteurs	83
5.3	Résultats généraux	84
5.3.1	Bilan des vitesses	84
5.3.2	Bilan des puissances.....	85
5.4	Analyse des différents modes de fonctionnement.....	87
5.4.1	Démarrage, basses et moyennes vitesses	87
5.4.2	Recharge de la batterie.....	90
5.4.3	Forte accélération.....	91
5.4.4	Conduite normale.....	92
5.4.5	Freinage.....	94
5.5	Temps de simulation	96
5.6	Conclusion	96
CHAPITRE 6 DESCRIPTION DU MODÈLE SÉRIE/PARALLÈLE.....		97
6.1	Introduction.....	97
6.2	Le modèle série/parallèle dans son ensemble	97
6.3	Le sous-système électrique	99
6.4	Le sous-système mécanique.....	101
6.4.1	Train planétaire épicycloïdal : détermination des vitesses.....	101
6.4.2	Train planétaire épicycloïdal : détermination des couples.....	103
6.5	Le sous-système de gestion de l'énergie.....	104
6.5.1	Détermination de la puissance requise.....	105
6.5.2	Détermination du mode hybride	107
6.5.3	Commande de couple du MCI et de vitesse de la génératrice	107
6.5.3.1	Calcul de $\omega_{\text{généré}}^*$	108
6.5.3.2	Calcul de T_{MCI}^*	109
6.5.4	Commande de couple du moteur électrique T_{moteur}^*	109
6.6	Conclusion	110
CHAPITRE 7 RÉSULTATS DE SIMULATION DU MODÈLE SÉRIE/PARALLÈLE.....		112
7.1	Introduction.....	112
7.2	Définition des consignes	112
7.3	Résultats généraux	114
7.3.1	Performances dynamiques du véhicule.....	115
7.3.2	Bilan de puissance.....	116
7.3.3	Bilan du train planétaire.....	118
7.4	Analyse des résultats selon les différents modes de fonctionnement	121
7.4.1	Démarrage, basses et moyennes vitesses	121
7.4.2	Forte accélération.....	122

7.4.3	Conduite normale et recharge de la batterie.....	124
7.4.4	Freinage.....	125
7.5	Temps de simulation	127
7.6	Conclusion	128
CONCLUSION.....		129
RECOMMANDATIONS.....		131
ANNEXE 1 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE LA TOYOTA PRIUS.....		132
ANNEXE 2 PARAMÈTRES DU MODÈLE SÉRIE/PARALLÈLE		136
BIBLIOGRAPHIE.....		148

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Temps de simulation27
Tableau II	Comparatif des différentes architectures hybrides électriques 36
Tableau III	Paramètres du moteur électrique.....59
Tableau IV	Paramètres de la génératrice (modèle série) 65
Tableau V	Paramètres du moteur à combustion interne 74
Tableau VI	Paramètres du modèle de la dynamique du véhicule 79
Tableau VII	Paramètres du modèle de la dynamique de la roue 81
Tableau VIII	Paramètres de la génératrice (modèle série/parallèle)..... 100
Tableau IX	Temps de simulation : modèles série et série/parallèle..... 127

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Interconnexion des différents modules..... 14
Figure 2	Schéma d'une bobineuse 15
Figure 3	Schéma Simulink de la bobineuse..... 16
Figure 4	Schéma structurel de la machine électrique et de son entraînement 17
Figure 5	Le réducteur de vitesse 18
Figure 6	Entrées et sorties du sous-système de contrôle de la bobineuse..... 19
Figure 7	Schéma Simulink du bilan des forces de la bobineuse.....21
Figure 8	Schéma SimMechanics du bilan des forces de la bobineuse.....21
Figure 9	Représentation de la bobineuse dans le repère (x,y,z)22
Figure 10	Vitesse et tension du matériau.....24
Figure 11	Vitesse de rotation, couple et puissance de la bobineuse24
Figure 12	Différences vitesse et tension du matériau26
Figure 13	Différences vitesse de rotation, couple et puissance de la bobineuse26
Figure 14	Points d'opération du moteur thermique dans le mode hybride.....31
Figure 15	L'architecture hybride série [17].....33
Figure 16	L'architecture hybride parallèle [17].....34
Figure 17	L'architecture hybride série/parallèle [17]35
Figure 18	Toyota Prius37
Figure 19	Le système de transmission de la Toyota Prius.....38
Figure 20	Démarrage, basses et moyennes vitesses39
Figure 21	Conduite normale40
Figure 22	Forte accélération41
Figure 23	Décélération, freinage et arrêt42
Figure 24	Recharge de la batterie43
Figure 25	Le système THS II.....43

Figure 26	Circuit électrique haute tension.....	44
Figure 27	Schéma de principe du circuit haute tension.....	45
Figure 28	Les flux de puissance dans le circuit d'alimentation haute tension	46
Figure 29	Train planétaire épicycloïdal.....	48
Figure 30	Comportement du train planétaire.....	48
Figure 31	Système de gestion de l'énergie de la transmission hybride.....	50
Figure 32	Schéma d'ensemble du modèle série.....	53
Figure 33	Flux de puissance dans le modèle série.....	54
Figure 34	Schéma de principe du système électrique.....	55
Figure 35	Schéma de principe de l'entraînement électrique du moteur	56
Figure 36	Schéma Simulink de l'entraînement électrique du moteur	57
Figure 37	Transformation de Park : Repère initial et repère de Park	58
Figure 38	Onduleur triphasé.....	61
Figure 39	Régulateur de vitesse.....	62
Figure 40	Commande vectorielle.....	63
Figure 41	Détermination de la référence de vitesse.....	66
Figure 42	Circuit Simulink d'alimentation haute puissance.....	67
Figure 43	Schéma de principe d'un convertisseur CC/CC.....	68
Figure 44	Schéma équivalent des interrupteurs K1 et K2	69
Figure 45	Régulateur du bus CC.....	70
Figure 46	Tension du bus CC et valeurs des rapports cycliques α_1 et α_2	71
Figure 47	La batterie électrique et son modèle idéal sous SPS	72
Figure 48	Le système mécanique.....	73
Figure 49	Caractéristiques $P = f(\omega)$ et $T = f(\omega)$ du MCI.....	75
Figure 50	Boîte de vitesses	75
Figure 51	Couples et vitesses en entrée et sortie de la boîte.....	76
Figure 52	Différentiel	77
Figure 53	Couples et vitesses en entrée et sortie du différentiel	78
Figure 54	Dynamique du véhicule.....	80

Figure 55	Modèle de la roue	81
Figure 56	Référence de vitesse du moteur électrique	84
Figure 57	Profils de vitesse obtenus du moteur électrique et du véhicule.....	85
Figure 58	Bilan de puissance du système électrique	86
Figure 59	Bilan de puissance du moteur électrique.....	87
Figure 60	Vitesse et couple en sortie de la génératrice.....	88
Figure 61	Bilan de puissance au démarrage, basses et moyennes vitesses.....	89
Figure 62	Bilan de puissance lors de la recharge de la batterie.....	91
Figure 63	Bilan de puissance lors d'une forte accélération	92
Figure 64	Bilan de puissance dans le cas d'une conduite normale.....	93
Figure 65	Bilan de puissance lors du freinage.....	95
Figure 66	Vitesse et couple du moteur électrique.....	95
Figure 67	Vue d'ensemble du modèle série parallèle.....	98
Figure 68	Flux de puissance dans le modèle série/parallèle	99
Figure 69	Référence de couple du moteur électrique	101
Figure 70	Clé de la méthode Ravigneaux	102
Figure 71	Algorithme général.....	105
Figure 72	Détermination de la puissance requise	106
Figure 73	Détermination du mode hybride : schéma Simulink.....	107
Figure 74	Commande de couple du MCI et de vitesse de la génératrice.....	107
Figure 75	Commande de couple du moteur électrique	109
Figure 76	États logiques des moteurs durant la simulation	113
Figure 77	Extinction et mise en marche des entraînements électriques	114
Figure 78	Vitesse linéaire du véhicule et vitesse angulaire de la couronne	115
Figure 79	Bilan de puissance : génératrice, batterie, moteur électrique	116
Figure 80	Bilan de puissance du véhicule	117
Figure 81	Bilan de puissance : MCI, génératrice, couronne du train	118
Figure 82	Vitesses angulaires du train planétaire : formule de Willis.....	119
Figure 83	Bilan de puissance du train planétaire.....	120

Figure 84	Bilan de puissance lors du démarrage ($P_{req} < 15kW$)	121
Figure 85	Bilan de puissance lors d'une forte accélération	123
Figure 86	Fonctionnement en mode moteur de la génératrice.....	124
Figure 87	Bilan de puissance en conduite normale et recharge de la batterie	125
Figure 88	Bilan de puissance en mode freinage	126

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

W	Largeur du matériau à enrouler (m).
MT	Épaisseur du matériau (m).
r_1	Rayon de l'axe de la bobineuse (m).
r_2	Rayon de l'axe de la bobineuse et de l'épaisseur du papier enroulé (m).
L_{af}	Inductance mutuelle de la machine CC.
I_f, I_a	Courant de champs et courant d'armature de la machine CC.
J_t	Inertie totale de la bobineuse ($kg \cdot m^2$).
T_l	Couple de charge (Nm).
<i>THS</i>	Toyota Hybrid System.
P_j	Pertes joules (J).
R	Résistance (Ω).
V	Tension (V).
i	Courant (A).
<i>CC, CA</i>	Courant Continu, Courant Alternatif.
<i>MSAP</i>	Machine Synchrone à Aimants Permanents.
S_a, S_b, S_c	Phases a, b, c de la machine synchrone à aimants permanents.
V_a, V_b, V_c	Tensions aux bornes de chaque enroulement statorique de la machine synchrone à aimants permanents (V).
i_a, i_b, i_c	Courants traversant chacun des enroulements statoriques de la machine synchrone à aimants permanents (A).
<i>dq0</i>	Axes du référentiel dq : d- direct, q- quadrature, 0 pour homopolaire.
L_d, L_q	Composantes orthogonales dq de l'inductance des enroulements statoriques de la machine synchrone à aimants permanents.
λ	Flux induit par les aimants permanents du rotor dans les phases du stator de la machine synchrone à aimants permanents (Wb).

p	Nombre de paires de pôles.
ω	Vitesse angulaire électrique (rad/s).
T_e	Couple électromagnétique d'une machine électrique (N.m).
F	Coefficient de friction visqueuse du rotor et de la charge (N.m.s).
T_m	Couple mécanique d'une machine électrique (N.m).
θ_r	Position angulaire du flux rotorique (rad).
J	Coefficient de l'inertie du rotor et de la charge combinée (Kg. m^2).
P	Puissance (W).
P_{sortie}	Puissance électrique en sortie de l'onduleur triphasé (W).
i_{aR}, i_{bR}	Courants dans les résistances des phases a et b de l'onduleur (A).
i_a^*, i_b^*, i_c^*	Courants statoriques de références de la MSAP (A).
i_{abc}^*	Vecteurs des références des courants statoriques de la MSAP.
N	Vitesse de rotation (r/min).
N^*	Référence de vitesse de rotation (t).
i_d^*, i_q^*, i_0^*	Courants de références dans le repère de Park de la MSAP (A).
θ_e	Position angulaire du flux rotorique (rad).
k_i, k_p	Gain de l'intégrateur, gain proportionnel.
PID	Proportionnel Intégral Dérivée.
$K1, K2$	Interrupteurs de puissance du convertisseur CC/CC.
C_{bus}	Condensateur du bus CC (F).
L	Inductance du convertisseur CC/CC (H).
α_1, α_2	Rapports cycliques des interrupteurs de puissance.
E_c	Effort de Commande du régulateur de tension du bus CC.
t	Temps (s).
K	Raison du train planétaire.

INTRODUCTION

Ce projet de maîtrise s'insère dans le cadre du partenariat entre TransÉnergie Technologie, filiale d'Hydro Québec, l'École de Technologie Supérieure de Montréal et la société « The Mathworks » développant le logiciel de calcul Matlab. L'objectif étant de modéliser un système électromécanique complexe sous un seul et même environnement de travail. L'intérêt de la simulation des systèmes multi-domaines est de plus en plus important. En effet, il est particulièrement intéressant de pouvoir simuler des systèmes multi-domaines complexes incorporant notamment une partie commande, une partie électrique et une partie mécanique sous un seul et même modèle. Pour cela des outils logiciels spécifiques et complémentaires entre chaque domaine doivent être utilisés.

L'accroissement de la puissance des calculateurs permet maintenant la modélisation et la simulation de systèmes complexes de plus en plus rapide et précise qui a pour but la diminution de prototypes physiques durant la phase de conception. Cependant, la simulation et la modélisation des systèmes électromécaniques soulèvent des problèmes de non-linéarités et d'oscillations. De plus l'utilisation de contraintes de temps beaucoup plus faibles d'un domaine à l'autre peut causer des problèmes sur les temps de simulation¹. Un logiciel doit donc pouvoir prendre en compte ces différentes particularités liées à chaque domaine d'étude.

Le but de ce projet est par conséquent de montrer à travers un exemple concret que la simulation de systèmes électromécaniques complexes incluant les différents problèmes cités peut être réalisée. Le logiciel utilisé pour mener à bien cette étude est le logiciel Matlab/Simulink et trois de ses modules Physical Modeling.

¹ Dans la littérature, ce problème est assigné par l'appellation « stiff problem ».

Le logiciel Matlab/Simulink est un outil de programmation et de simulation graphique. Il dispose de différents modules et notamment un module spécifique aux systèmes électriques (SimPowerSystems), un autre spécifique aux systèmes mécaniques (SimMechanics) et un dernier spécifique aux entraînements mécaniques pour des systèmes de transmission et d'entraînement (SimDriveline). Ces trois modules permettent la création de modèles multi-domaines. Répondant à une demande élevée de la part des industriels et notamment de l'industrie automobile, le système choisi à modéliser est la partie transmission d'un véhicule hybride électrique. Ce véhicule a la particularité de bénéficier de deux sources d'énergie. Une source d'énergie mécanique provenant du moteur à combustion interne² et une source d'énergie électrique provenant d'une batterie.

Le modèle étudié simule le principe de fonctionnement du système de propulsion de la Toyota Prius. Le but de l'étude est d'obtenir un modèle comportemental stable de ce système. Ce système couvre différents modes de fonctionnement du véhicule (démarrage, conduite normale, forte accélération, freinage, recharge de la batterie). Une gestion de l'énergie appropriée est réalisée, laquelle respecte le principe de comportement du véhicule. Dû à la complexité d'un tel système, certaines parties (le modèle de batterie, le système de transmission variable géré électroniquement, le système de gestion de l'énergie) demanderaient une étude plus approfondie dépassant le cadre de ce mémoire et ont donc été volontairement simplifiées. Les résultats montrent le comportement de chacun des sous-systèmes et particulièrement les flux d'énergie échangés.

Le projet est développé en sept grandes parties. La première partie traite de la revue littéraire qui a été effectuée. Cette partie permet de dresser le bilan des travaux qui ont été réalisés dans ce domaine de recherche. Elle synthétise d'une part les articles les plus

² Dans tout le rapport, les termes : moteur thermique, moteur à essence, moteur à combustion interne et MCI, désignent la même chose.

importants qui ont permis de mieux comprendre le projet dans son ensemble et d'autre part les articles qui ont apporté des solutions techniques pour la réalisation du modèle.

Le deuxième chapitre est une présentation de l'environnement de travail et des outils logiciels multi-domaines de Matlab/Simulink que sont SimPowerSystems, SimDriveline et SimMechanics. Un premier exemple de simulation multi-domaines avec le cas de la bobineuse est étudié afin de se familiariser avec ces modules. Ce système est notamment présent dans l'industrie papetière et consiste à contrôler le couple d'un moteur électrique afin de maintenir la tension du papier constante. Le moteur faisant tourner un cylindre dont l'inertie et la masse varient à mesure que le papier s'enroule autour de ce dernier.

Le troisième chapitre présente le principe de fonctionnement d'un véhicule hybride et plus particulièrement celui de la Toyota Prius. Cette partie traite du système THS II de la Toyota Prius et de son architecture hybride série/parallèle ainsi que des transferts d'énergie mécaniques et électriques s'effectuant pour chacun des modes de fonctionnement désirés. De plus, une description de haut niveau du système électrique, du système mécanique et du système de gestion de l'énergie est proposée.

L'architecture série/parallèle étant un système relativement complexe, l'architecture série est initialement abordée. Le quatrième chapitre décrit le modèle Simulink réalisé et la manière dont chaque sous-système a pu être modélisé. Le système électrique contient le moteur électrique et son entraînement, la génératrice et son entraînement, le circuit d'alimentation haute tension et la batterie. Le système mécanique contient le moteur à combustion, le système de transmission du couple aux roues ainsi que la modélisation de la dynamique longitudinale du véhicule. Le modèle est testé pour différents modes de fonctionnement. Une analyse de ces résultats sur un cycle de simulation de 10 s est effectuée au chapitre 5.

Le sixième chapitre décrit le modèle série/parallèle au complet. Le modèle série est repris auquel est ajouté le système de répartition de la puissance du moteur à combustion par le train planétaire. Également un système de gestion de l'énergie permettant la commande des moteurs dans leur plage de haut rendement est ajouté. Les simulations pour les mêmes modes de fonctionnement que pour le modèle série sont réalisées au chapitre 7 sur un cycle de simulation de 14 s cette fois.

CHAPITRE 1

REVUE LITTÉRAIRE

La simulation multi-domaines de systèmes complexes prend de plus en plus d'importance et est notamment portée par l'évolution de la puissance des calculateurs. De nombreux travaux et études sont entrepris dans ce domaine. Ce chapitre a pour objectif de décrire brièvement quelques travaux scientifiques qui ont permis de situer le projet de recherche par rapport aux études déjà effectuées. Les articles et livres sélectionnés traitent des différentes méthodes de représentation théorique de systèmes multi-domaines. Ces travaux traitent également de la simulation de véhicules hybrides, d'une part et de la technologie utilisée dans ces véhicules d'autre part. Les travaux présentés ci-après sont, parmi ceux étudiés, les plus pertinents et sur lesquels le projet a pu être bâti.

1.1 Méthodes de modélisation

Plusieurs travaux proposent des méthodes sur la modélisation de systèmes multi-domaines qui sont régis par l'interaction mutuelle de phénomènes physiques différents (électriques, mécaniques, thermiques, hydrauliques).

L'outil bond-graph ou graphe de liaison défini par Karnopp, Margolis et Rosenberg [6] [7] se présente comme un intermédiaire entre le système physique et les modèles qui lui sont associés. Cette méthode permet de mettre en évidence les relations de cause à effet dans le système de façon à permettre plus facilement l'écriture des équations algébriques et différentielles de chaque sous-système. La méthodologie est basée sur les échanges de puissance entre les différents sous-systèmes qu'ils soient électriques ou mécaniques.

La Représentation Énergétique Macroscopique ou REM est une autre méthode d'analyse de systèmes électromécaniques. Cette méthode développée par Bouscayrol [1] est là encore, une description graphique des échanges d'énergie entre les sous-systèmes. La notion de transfert d'énergie selon le principe de l'action et de la réaction est au cœur de cette démarche. Cette dernière respecte différentes lois pré-établies qui permettent de simuler les systèmes multi-machines [2]. Ainsi une structure de commande maximale (SCM) est déduite des règles d'inversion et permet d'être rapidement définie.

1.2 Le véhicule hybride et sa simulation

Le système choisi pour illustrer la simulation multi-domaines est celui du véhicule hybride électrique. Dans l'article de Emadi, Kaushik et Sheldon [8], les auteurs résument les différentes architectures hybrides actuellement possibles. Ce type de véhicule possède un important avantage par rapport à une automobile classique ou complètement électrique. Outre sa faible consommation d'essence, il permet de disposer d'excellentes performances dynamiques. Ainsi les véhicules hybrides électriques permettent d'obtenir un rendement énergétique de l'ordre de 30-40% comparativement aux 10-15% des véhicules conventionnels. L'architecture série/parallèle semblant être la plus performante dans ce domaine. L'élément le plus important étant le répartiteur de puissance (train planétaire) associé au système de gestion de l'énergie.

Plusieurs travaux ont tenté une approche de la simulation de ce type de véhicule. Dans l'article de Butler, Mehrdad, Preyas [9], les auteurs proposent une librairie contenant les principaux éléments d'un tel système (moteur électrique, génératrice, moteur thermique, boîte de vitesses...) sous l'environnement Matlab/Simulink afin de simuler et tester les différentes architectures. Ce système ne fait pas intervenir les régimes transitoires de chaque sous-système. Il s'agit donc d'une vision globale (de haut niveau) du problème. Cependant d'autres travaux ont été effectués sur la simulation et mettent l'accent soit sur

le sous-système de gestion de l'énergie [3] soit sur les systèmes électriques et leurs modélisations (batterie, moteur synchrone) [10].

1.3 Technologies employées dans les véhicules hybrides

De nombreux travaux évoquent la technologie employée pour chacun des sous-systèmes et ce selon le type d'architecture utilisée [11]. Du point de vue électronique de puissance, un des éléments importants est le convertisseur CC/CC et son bus CC à réguler. Sa tension doit alors rester constante quelque soit la source et la charge. Des convertisseurs à entrées multiples (batterie, super-condensateur, génératrice) [23] peuvent être employés. Des commandes spécifiques de moteur synchrone comme la commande vectorielle sont également utilisées [12]. Un autre élément très important dans une architecture série/parallèle, est le train planétaire permettant d'additionner ou de diviser des couples sans imposer de vitesses de rotation aux éléments connectés [17]. Enfin, l'élément le plus important est le système de gestion de l'énergie permettant d'obtenir le meilleur rendement énergétique possible. Cette gestion de l'énergie est basée principalement sur la vitesse du véhicule ainsi que sur la position de la pédale d'accélération [21], mais également sur le climatiseur ou le rapport de réduction de la boîte de vitesses [19]. Des algorithmes basés sur les systèmes flous en temps réel peuvent aussi être utilisés [20].

1.4 Le système hybride de la Toyota Prius

Le système modélisé afin d'illustrer la simulation multi-domaines est celui de la l'architecture hybride série/parallèle que l'on retrouve dans la Toyota Prius. Les documents de Toyota [17] et de Kawahashi [18] décrivant le système au complet ainsi que l'article de Jeanneret, Trigui, Badin et Harel [3] sur la proposition d'un système de gestion de l'énergie de la Prius permirent de mieux comprendre son fonctionnement. Ce projet s'appuie surtout sur ces documents.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DE LA SIMULATION MULTI-DOMAINES

2.1 Introduction

Le présent chapitre a pour objectif de présenter les enjeux ainsi que les problèmes de la simulation multi-domaines et également de présenter les outils logiciels contenus dans Matlab/Simulink qui ont été utilisés lors de ce projet. Un premier exemple d'application d'une bobineuse industrielle est présenté. Les résultats obtenus pour le nouveau modèle sont comparés à ceux du modèle original.

2.2 La simulation multi-domaines

Un système multi-domaines est un système faisant intervenir des compétences académiques de plusieurs domaines tels que le génie électrique, le génie mécanique, le génie industriel et le génie logiciel. Dans cette étude, un système multi-domaines est défini comme étant un système incorporant une partie commande, une partie électrique et une partie mécanique.

2.2.1 Enjeu de la simulation multi-domaines

La simulation numérique de phénomènes physiques, aussi précise et rapide que possible, est devenue un enjeu majeur dans la phase de conception de tout système. Cette discipline doit faire face à de nouvelles exigences du point de vue de la richesse et de la complexité des simulations, qui doivent alors prendre en compte des aspects très souvent multi-domaines. Ceci est néanmoins devenu possible avec l'accroissement de la puissance des processeurs de calculs ainsi que de la mémoire disponible. En effet, dans une logique de compétition industrielle, la diminution du nombre de prototypes

physiques requiert des outils logiciels adaptés et basés sur la complémentarité, incorporant des connaissances qui relèvent de plusieurs domaines de compétences.

2.2.2 Problèmes des systèmes électromécaniques

En premier lieu, si l'on souhaite obtenir un modèle dont le comportement est représentatif de celui de la réalité, on s'aperçoit que les systèmes électromécaniques ne sont que très rarement linéaires ou stationnaires [2]. Ces systèmes font notamment apparaître des discontinuités. En électronique de puissance notamment, l'utilisation d'interrupteurs pour le fonctionnement d'une commande spécifique d'un moteur, par exemple, peut s'avérer être un problème. Ces interrupteurs commutant à des fréquences élevées comparativement aux fréquences naturelles du reste du système, augmentent le nombre de calculs et par conséquent la durée de simulation. Les constantes de temps utilisées en électronique étant souvent beaucoup plus faibles que celles rencontrées en mécanique. De plus, de nombreuses non-linéarités sont souvent à prendre en compte dans les systèmes mécaniques telles que le cas d'une roue au contact du sol. Également, des problèmes d'oscillations et de stabilité peuvent apparaître au passage d'un domaine à l'autre. L'élaboration d'une commande globale peut aussi s'avérer complexe dans sa mise en oeuvre du fait du nombre de variables dont elle dépend. La robustesse de la commande doit prendre en compte les erreurs de modélisation, les non-stationnarités et les erreurs de la commande elle-même [2].

Enfin, il faut faire attention, pour de ne pas détériorer la précision d'un système, de ne pas confondre pluridisciplinarité et interdisciplinarité. À cet effet, un outil logiciel unique pour la simulation de systèmes électriques et mécaniques serait un outil pluridisciplinaire qui du fait de la juxtaposition des domaines, risquerait d'entraîner des hypothèses simplificatrices de modélisation et d'être responsable de l'imprécision des résultats obtenus. Tandis que des outils logiciels spécifiques à chaque domaine, avec des

convertisseurs pour passer entre les différents champs de compétence permettent une plus grande flexibilité et une moindre approximation des modèles réalisés.

2.2.3 Résumé et solution

C'est pour les raisons spécifiées précédemment (vitesse de calcul, non-linéarités, stabilité, interdisciplinarité) que l'utilisation d'un logiciel de simulation adapté est donc nécessaire. Et c'est par conséquent, pourquoi il a été décidé d'utiliser l'environnement de Matlab/Simulink et de ses différents modules pour mener à bien ce travail de recherche. Ce logiciel permet la simulation en régime transitoire des systèmes électriques et mécaniques ainsi que la réalisation de commandes complexes.

2.3 Les modules contenus dans Matlab/Simulink

Le logiciel Matlab constitue un système interactif et convivial de calculs numériques et de visualisation graphique destiné aux ingénieurs et aux scientifiques. Matlab voulant dire laboratoire de matrices, il s'agit donc d'un système à base de matrices permettant de réaliser des simulations numériques fondées sur des algorithmes d'analyse numérique [13]. Cet outil intègre des milliers de fonctions et différents modules autour du noyau Matlab pour le calcul matriciel, le traitement de signal, le traitement d'image, les visualisations graphiques, les réseaux de neurones, la simulation de systèmes électriques, mécaniques entre autres.

2.3.1 Simulink

Le module Simulink est une plate-forme de conception pour la simulation de systèmes dynamiques multi-domaines basée sur la modélisation. C'est un outil graphique interactif dont la bibliothèque de blocs personnalisables, permet de concevoir avec précision des systèmes complexes multi-domaines et leurs commandes associées. Ces

blocs pouvant être des blocs dynamiques continus et discrets (intégration, délai unitaire...), et des blocs d'algorithmes (sommations, produits...), des blocs structurels (multiplexeurs, commutateurs...). Cet outil permet donc l'élaboration de commandes complexes pour n'importe quel système physique. Simulink propose différentes méthodes de résolution numérique à pas fixe ou à pas variable.

Des modules supplémentaires étendent Simulink avec des fonctionnalités spécifiques. Il est possible de simuler des systèmes physiques dans Simulink en utilisant les modules SimDriveline, SimPowerSystems et SimMechanics. Ces modules forment l'ensemble Physical Modeling. Ils proposent donc des fonctionnalités étendues permettant de modéliser des systèmes électriques et/ou mécaniques [13].

2.3.2 SimPowerSystems (SPS)

L'outil logiciel SimPowerSystems ou SPS est un des modules contenus dans Simulink. Il s'agit d'un des modules de Physical Modeling. Il permet de modéliser et de simuler des réseaux électriques ainsi que des systèmes d'électronique de puissance détaillés [16]. La distribution, la consommation et la gestion de la puissance dans un système pouvant être simulées. Également, des blocs multimètres permettent de connaître la tension ou le courant pour n'importe quel point du circuit. SimPowerSystems inclus lui-même différentes sous bibliothèques et notamment la bibliothèque « Electric Drives » développée à l'ÉTS. Cette bibliothèque propose des modèles électriques d'entraînements à courant alternatif et continu incluant des modèles détaillés de convertisseurs, de moteurs, et de contrôleurs [16].

Lors de la réalisation d'un modèle SimPowerSystems, ce dernier doit impérativement contenir le bloc « Powergui » pour qu'une simulation du circuit puisse se réaliser. Ce bloc contient le circuit Simulink équivalent représentant les équations d'états des différents éléments SimPowerSystems.

2.3.3 SimMechanics

Physical Modeling contient également un module spécifique aux systèmes mécaniques. Cet outil permet de simuler des systèmes mécaniques complexes composés de corps et de joints et de leurs imposer différentes contraintes cinétiques. Des actionneurs et des capteurs permettent d'émettre ou de relever différentes caractéristiques en tout point du modèle. Cet outil permet aussi la visualisation et l'animation des systèmes modélisés en trois dimensions afin de rendre l'analyse plus précise [14].

Un modèle SimMechanics doit contenir impérativement quatre éléments pour pouvoir être simulé. Ces éléments sont les blocs « Machine Env », « Ground », « Joint » et « Body » qui forment alors une chaîne valide. Le bloc « Machine Env » permet de connaître et de changer les caractéristiques du modèle mécanique (méthode de simulation, interprétation des contraintes). Le bloc « Ground » représente un point immobile qui sert de référence absolue du système. Le bloc « Joint » définit les degrés de liberté entre un corps et le « Ground » ou entre deux corps. Enfin, le bloc « Body » permet de définir les propriétés d'un corps rigide (masse, inertie, propriétés géométriques).

2.3.4 SimDriveline

Le troisième module de Physical Modeling est le module SimDriveline permettant de modéliser et de simuler la partie transmission mécanique d'un arbre d'un système et sa chaîne cinématique. Cet outil est particulièrement utilisé dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatial. Le module comporte plusieurs bibliothèques où les différents éléments d'un véhicule tels que la boîte de vitesses, le train planétaire, le système d'embrayage ou le moteur peuvent être utilisés. Il s'agit d'un outil optimisé pour simuler rapidement et simplement des systèmes mécaniques de transmission en se concentrant exclusivement sur les organes en rotation [15]. Le mouvement entre les

arbres de transmission n'étant possible qu'autour d'un seul axe, cela a pour effet de réduire la complexité des modèles réalisés, et par conséquent d'améliorer les temps de simulation.

Les éléments indispensables dans un modèle SimDriveline sont les blocs « Driveline Env » et « Inertia ». Le bloc « Driveline Env », définit les caractéristiques globales du système modélisé. Le bloc « inertia » ajoute une inertie sur une ligne de transmission. Cette transmission, par défaut, étant parfaitement rigide et sans masse, aucun couple ne peut y être affecté. Une inertie doit y être rattachée pour autoriser la rotation d'un corps et du couple qui est imposé sur cette ligne de transmission.

2.3.5 Interconnexion des modules

Il a été expliqué dans la partie 2.2.2 l'importance de l'interdisciplinarité entre les domaines. Les différents modules contenus dans Matlab/Simulink sont spécifiques à chaque discipline, comme l'est SimPowerSystems pour les réseaux électriques par exemple. Cependant pour chaque module, il existe des blocs permettant de passer d'un module à l'autre (figure 1) en passant au préalable dans le domaine Simulink. Il est impossible de passer du monde SPS au domaine SimDriveline, par exemple, sans passer par le domaine Simulink.

Dans SPS, il s'agit principalement de sondes de courant ou de tension et de sources de courant ou de tension commandées. Dans SimDriveline et SimMechanics il s'agit de capteurs de couple ou de vitesse et d'actuateurs. Ainsi sous un seul modèle il est possible d'avoir des éléments SPS, SimDriveline et SimMechanics.

La figure ci-après représente également les différents éléments nécessaires afin d'obtenir un modèle valide dans chaque domaine.

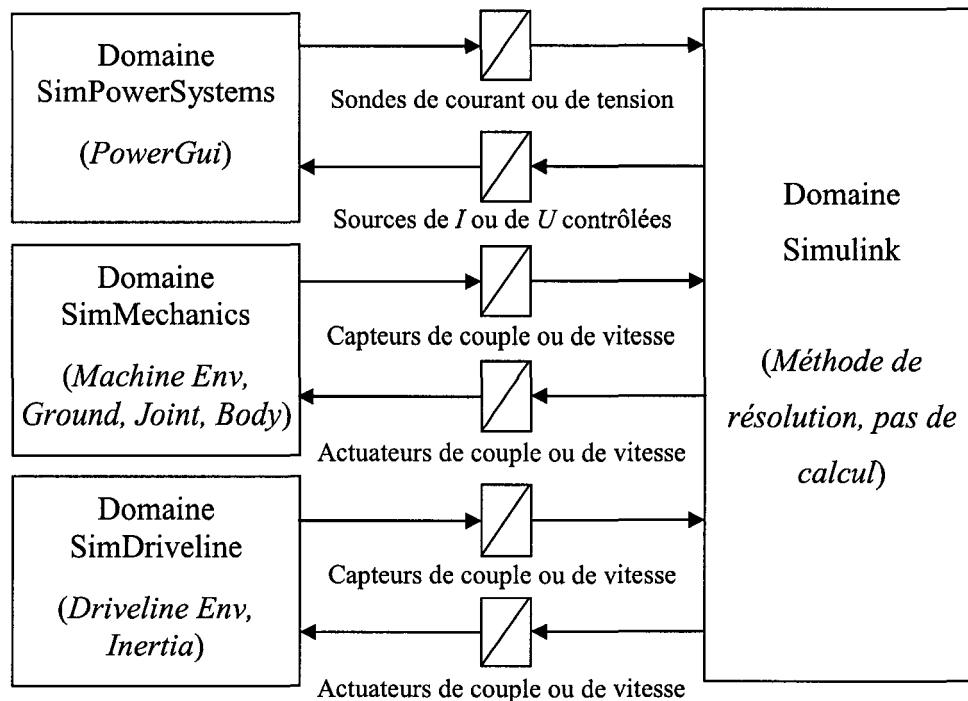


Figure 1 Interconnexion des différents modules

2.4 Exemple d'application : la bobineuse.

Le premier exemple d'application industrielle modélisé est celui de la bobineuse. Ce premier cas a permis de se familiariser avec l'environnement Matlab/Simulink et ses différents modules et plus particulièrement avec SimMechanics pour la simulation de systèmes mécaniques et SimPowerSystems pour la simulation de réseaux électriques.

2.4.1 Présentation du modèle de la bobineuse

Le modèle de la bobineuse est un des exemples contenus dans Matlab/Simulink. Ce cas est particulièrement intéressant puisqu'il comporte un système électrique, un système mécanique et un système de commande. En effet une caractéristique importante de ce genre de système est que la force appliquée sur le matériau enroulé doit rester constante,

ce qui implique que le couple du moteur doit être régulé puisqu'au fur et à mesure que le matériau s'enroule, le rayon de la bobine augmente et son inertie et sa masse par conséquent augmentent également. L'hypothèse choisie est que le matériau à enrouler est débité à une vitesse constante de 5 m/s .

Cette partie traite en particulier de la modélisation de la partie mécanique, c'est-à-dire la partie seulement modifiée et modélisée en utilisant des blocs SimMechanics. Le moteur et son entraînement électrique ainsi que le contrôle du système ne sont que succinctement abordés.

2.4.2 Description du système complet.

Le système est donc une bobineuse utilisée notamment dans l'industrie papetière et représentée par la figure 2 où W est la largeur du matériau à enrouler, MT son épaisseur, r_1 le rayon de l'arbre ou noyau de la bobineuse et r_2 , le rayon de l'axe et de l'épaisseur du papier enroulé.

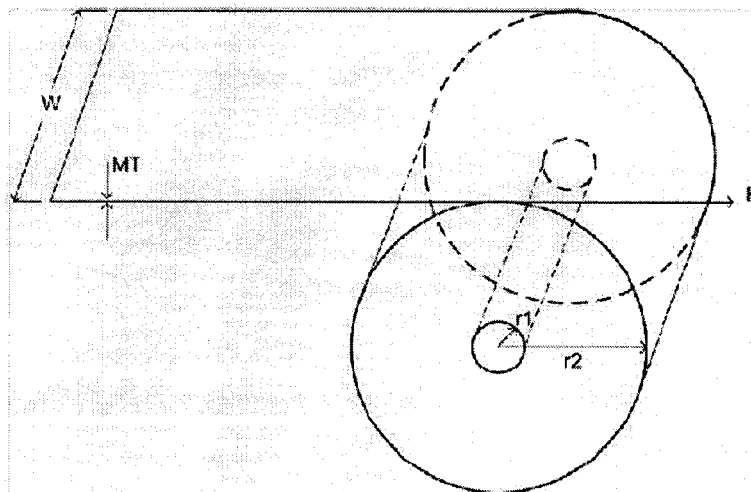


Figure 2 Schéma d'une bobineuse

Le schéma Simulink du système complet est celui de la figure 3 comprenant quatre sous-systèmes :

- le sous-système de la machine électrique et de son entraînement;
- le réducteur de vitesse auquel le moteur est connecté;
- le contrôleur de la bobineuse;
- le sous-système de la bobineuse.

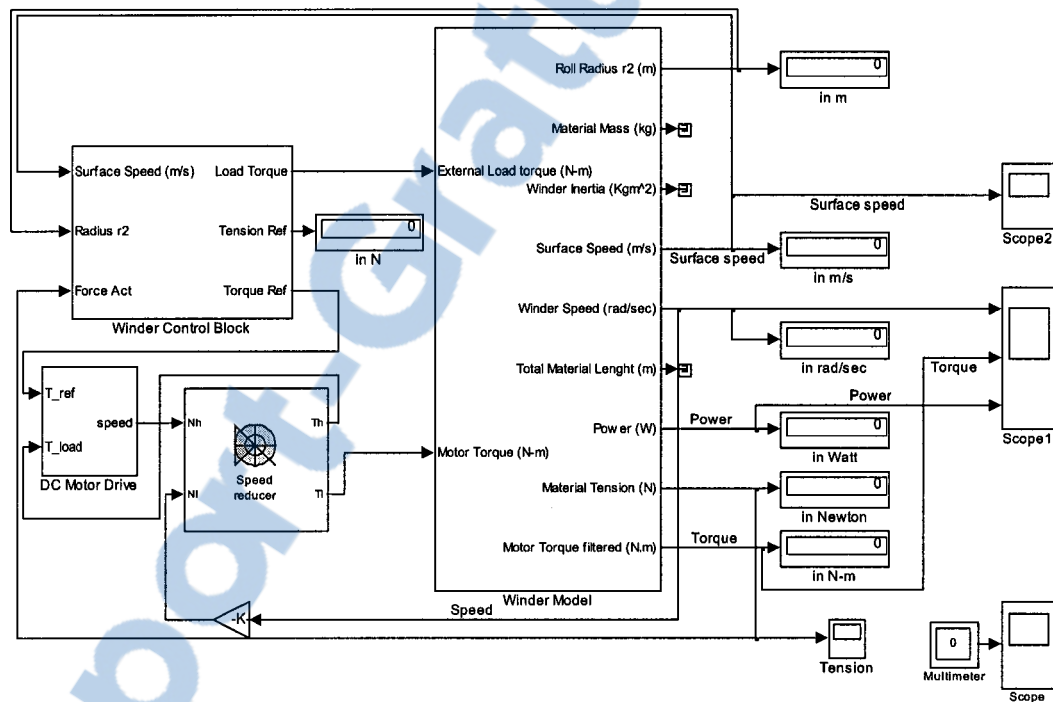


Figure 3 Schéma Simulink de la bobineuse

2.4.2.1 Le sous-système de la machine électrique et son entraînement

Ce sous-système contient le moteur électrique à courant continu de 5 hp et son entraînement électrique. L'entraînement électrique est composé d'un redresseur à thyristors deux quadrants alimenté par une source triphasée de 220 V à 50 Hz.

Une régulation de couple est effectuée. La référence de couple est ensuite transformée en une référence de courant. Le moteur étant à excitation séparée, l'équation reliant le couple du moteur au courant d'armature est la suivante :

$$T_e = L_{af} I_f I_a \quad (1.1)$$

Cette équation faisant intervenir l'inductance mutuelle L_{af} , le courant de champ I_f et le courant dans l'armature I_a .

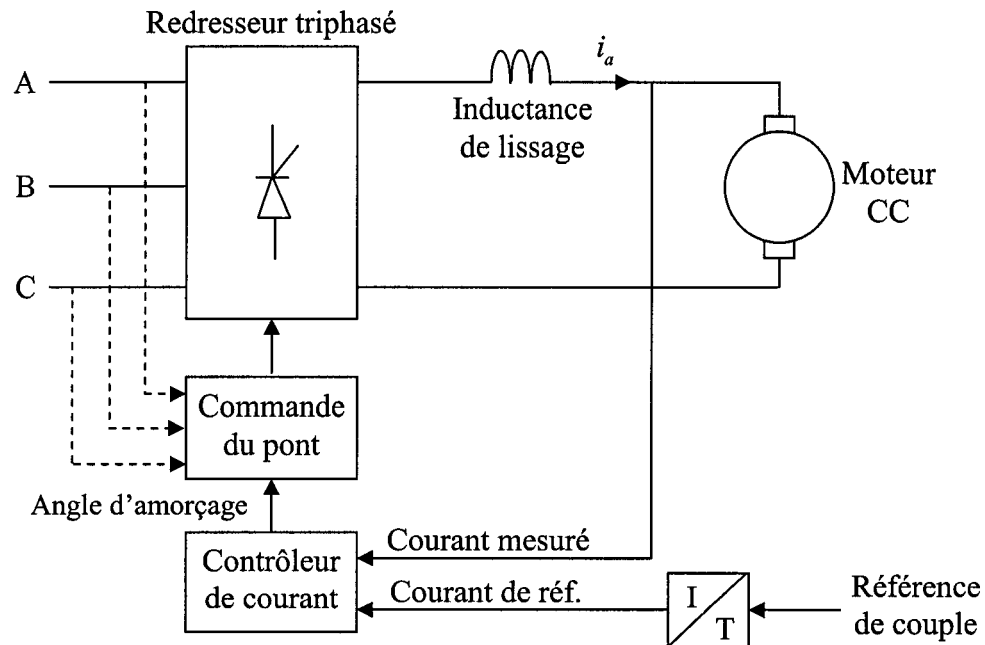


Figure 4 Schéma structurel de la machine électrique et de son entraînement³

Un régulateur de courant basé sur un contrôleur proportionnel intégral (PI) permet de contrôler le courant d'armature en commandant l'angle de retard à l'amorçage des thyristors (figure 4). Un bloc « commande du pont » fournit les six impulsions de

³ Ce graphique a été tiré et adapté de la documentation SimPowerSystems de Matlab/Simulink [16].

gâchettes nécessaires des thyristors. Le redresseur triphasé fournit alors la tension adéquate pour obtenir le courant d'armature I_a désiré et ainsi le couple électromagnétique demandé (équation 2.1).

2.4.2.2 Le réducteur de vitesse

Le moteur à courant continu est connecté à un réducteur de vitesse. Cet ensemble est constitué de trois parties comme le montre la figure 5. Un premier en entrée tournant à haute vitesse, puis l'engrenage du réducteur de vitesse et enfin, un axe de sortie tournant à basse vitesse.

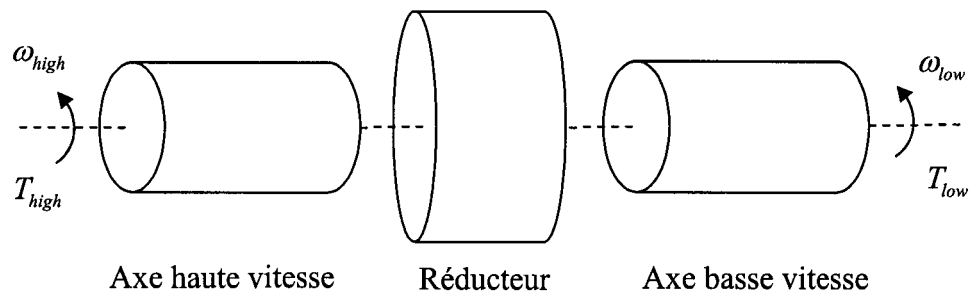


Figure 5 Le réducteur de vitesse⁴

Ce réducteur réduit donc la vitesse d'entrée par un facteur de 10. Les relations entre les vitesses et les couples sont les suivantes :

$$\omega_{high} = 10 \cdot \omega_{low} \quad (1.2)$$

$$T_{high} = \frac{1}{10} \cdot T_{low} \quad (1.3)$$

⁴ Ce graphique a été tiré et adapté de la documentation SimPowerSystems de Matlab/Simulink [16].

ω_{high} : vitesse angulaire de l'axe haute vitesse (rad/s);

T_{high} : couple sur l'axe haute vitesse (Nm);

ω_{low} : vitesse angulaire de l'axe basse vitesse (rad/s);

T_{low} : couple sur l'axe basse vitesse (Nm).

2.4.2.3 Le contrôleur de la bobineuse

Ce sous-système contient un contrôleur PID (Proportionnel Intégral Dérivée) qui détermine la force qui est appliquée sur le matériau à enrouler. La sortie de ce régulateur est la référence de couple du moteur électrique. De plus, ce sous-système permet de déterminer le couple de charge appliqué sur la bobineuse. Ce dernier correspondant au produit du rayon de l'axe plus du matériau enroulé multiplié par la vitesse de défilement du matériau. Les entrées et sorties de ce sous-système sont les suivantes :

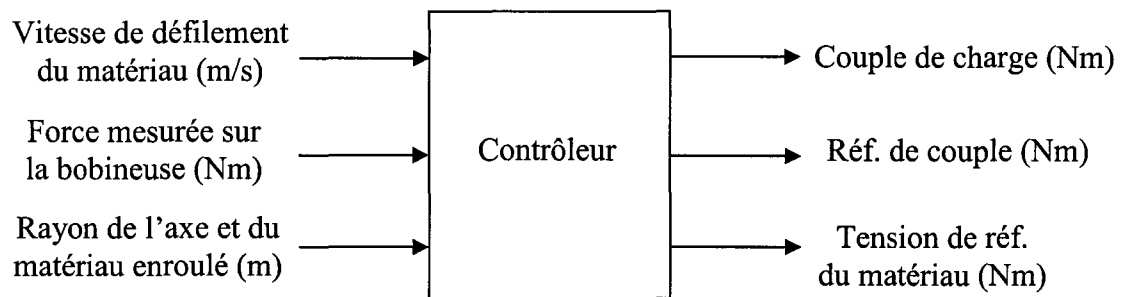


Figure 6 Entrées et sorties du sous-système de contrôle de la bobineuse

2.4.2.4 La bobineuse

Dans ce sous-système, différentes variables liées à la bobineuse et au matériau enroulé comme la vitesse de défilement du matériau, la vitesse angulaire de la bobineuse, l'épaisseur totale du matériau enroulé en outre sont calculées. Cependant, la principale

équation est celle du bilan des forces appliquées sur la bobineuse. Le couple électromagnétique de la machine est déterminé par l'équation différentielle suivante :

$$T_e = J_t \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_l + \frac{dJ_t}{dt} \omega \quad (1.4)$$

- T_e : couple électromagnétique du moteur électrique (Nm).
- J_t : inertie totale de la bobineuse ($kg \cdot m^2$);
- ω : vitesse angulaire de la bobineuse (Nm);
- B : frottement visqueux de la bobineuse ($Nm.s$);
- T_l : Couple de charge (Nm);

Il est à noter que l'inertie totale de la bobineuse variant lentement en fonction du temps, la dérivée de l'inertie totale du système peut donc être négligée. L'équation corrigée du couple électromagnétique de la machine devient :

$$T_e = J_t \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_l \quad (1.5)$$

Le bilan des forces appliquées à la bobineuse peut donc être calculé à partir de cette dernière équation. La force appliquée à la bobineuse étant fonction du rayon du noyau de la bobineuse et de l'épaisseur du papier enroulé r_2 ainsi que du couple de charge T_l , l'équation du bilan des forces appliquées au cylindre de la bobineuse est la suivante :

$$F = \frac{T_e - J_t \dot{\omega} - B\omega}{r_2} \quad (1.6)$$

Cette dernière équation, qui représente la force de tension du papier, est modélisée avec des blocs Matlab/Simulink.

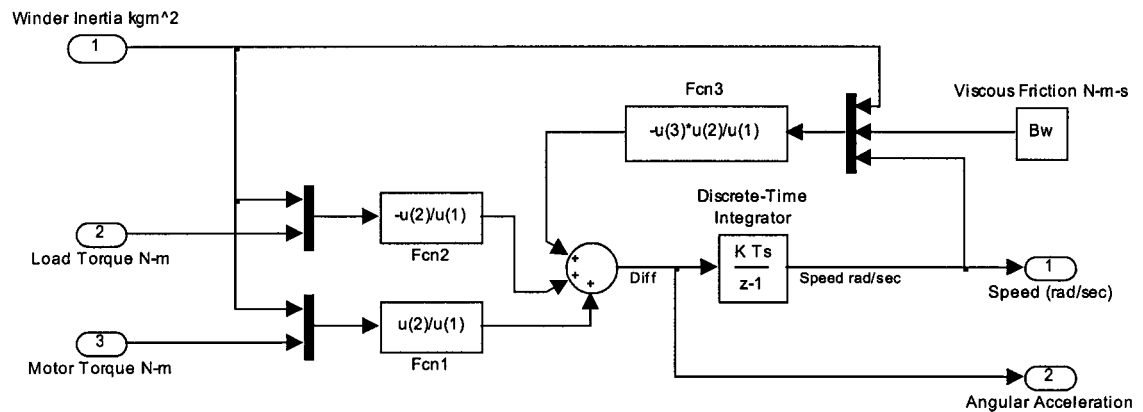


Figure 7 Schéma Simulink du bilan des forces de la bobineuse

2.4.3 Modélisation avec le module SimMechanics

Le but de cette étude est de remplacer le modèle de l'équation du bilan des forces appliquées sur la bobineuse et réalisé avec des éléments Simulink par des éléments SimMechanics. Ce module est spécifique aux systèmes mécaniques comme il a été précisé dans la partie 2.3.2.

Le système est donc celui d'un cylindre tournant, sur lequel différentes forces sont appliquées et dont l'inertie et la masse sont variables au fur et à mesure que le matériau est enroulé. Le modèle de la figure 7 est donc remplacé par le suivant :

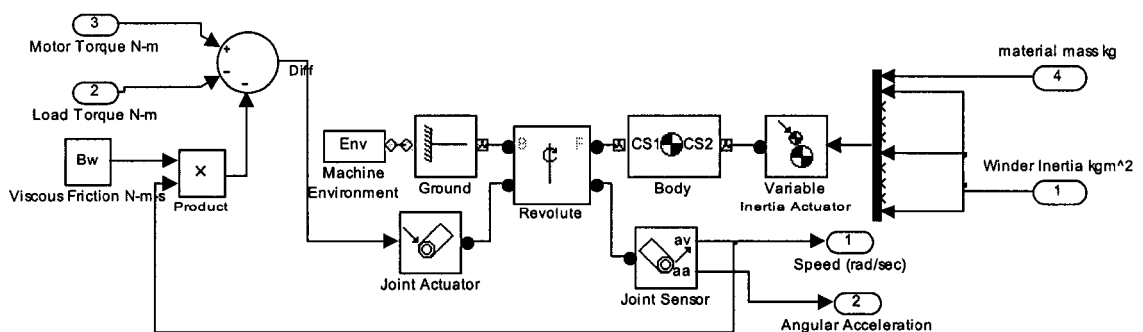


Figure 8 Schéma SimMechanics du bilan des forces de la bobineuse

Le système est composé d'un cylindre ayant un seul degré de liberté qui est une rotation sur l'axe z . Les différentes forces contenues dans l'équation (2.6) s'exercent alors sur ce cylindre (figure 9). L'inertie et la masse de ce cylindre variant au cours du temps en fonction de la quantité de matériau enroulé.

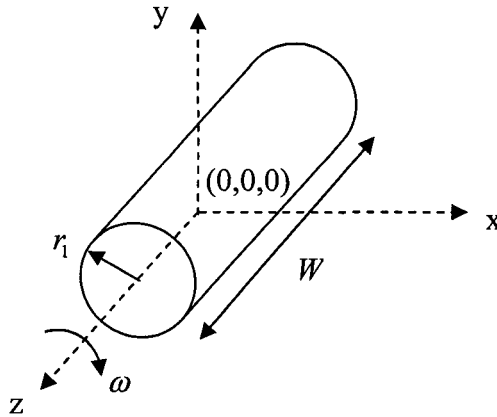


Figure 9 Représentation de la bobineuse dans le repère (x,y,z)

La bobineuse au complet (noyau et matériau enroulé) est considérée comme un cylindre dans un repère fixe (x,y,z) , son centre de masse correspondant au centre du repère $(0,0,0)$. Son tenseur d'inertie est par conséquent la matrice suivante dont les valeurs propres sont les moments principaux de la matrice.

$$\begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}m\left(r_1^2 + \frac{1}{3}W^2\right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4}m\left(r_1^2 + \frac{1}{3}W^2\right) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4}m \cdot r_1^2 \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Un tenseur d'inertie est défini dans le bloc « body » du modèle SimMechanics (figure 8). Cependant, ce tenseur ne peut pas être défini variable et doit être constant durant la

simulation. La masse de l'objet ne peut pas être variable non plus. La solution est alors d'utiliser un bloc « variable mass & inertia actuator » qui transmet l'inertie et la masse additionnelles du matériau enroulé au cylindre. Cette liaison est équivalente à relier un second corps invisible dont l'inertie et la masse sont variables. Ce corps invisible a le même centre de masse que celui du cylindre, qui correspond au centre du repère (0,0,0). On a donc un corps avec un tenseur d'inertie et une masse fixes correspondant au tenseur d'inertie du noyau de la bobineuse et sa masse auquel est rattaché un second corps invisible dont le tenseur et la masse correspondent à ceux du matériau seulement.

Le problème est que cette façon de modéliser provoque des perturbations dans les signaux autour de la valeur désirée. Ces oscillations peuvent être considérées comme des oscillations numériques provenant de l'algorithme de calcul du module SimMechanics.

Une façon de corriger ce problème est de créer un corps dont la masse et le tenseur d'inertie sont constants et dont les valeurs propres du tenseur sont négligeables. Ensuite, on y rattache, par l'intermédiaire du bloc « variable mass & inertia actuator », la masse et l'inertie de la bobineuse au complet, c'est-à-dire celles du noyau de la bobineuse ajoutées à celles du papier enroulé.

2.4.4 Résultats obtenus avec le modèle SimMechanics

Une simulation du modèle contenant des blocs SimMechanics est effectuée. La figure 10 montre la vitesse de défilement du matériau et la tension appliquée sur ce dernier et la figure 11 montre la vitesse de rotation, le couple et la puissance de la bobineuse. La simulation a été effectuée pour un cycle de 25 s. Un pas de $10 \mu s$ est utilisé qui correspond au pas de calcul à utiliser pour le bloc réducteur de vitesse. Les références de vitesse de défilement du matériau et de la tension appliquée sur ce dernier sont respectivement de 5 m/s (hypothèse spécifiée au départ : le matériau à enrouler est débité à une vitesse constante de 5 m/s) et de 300 Nm.

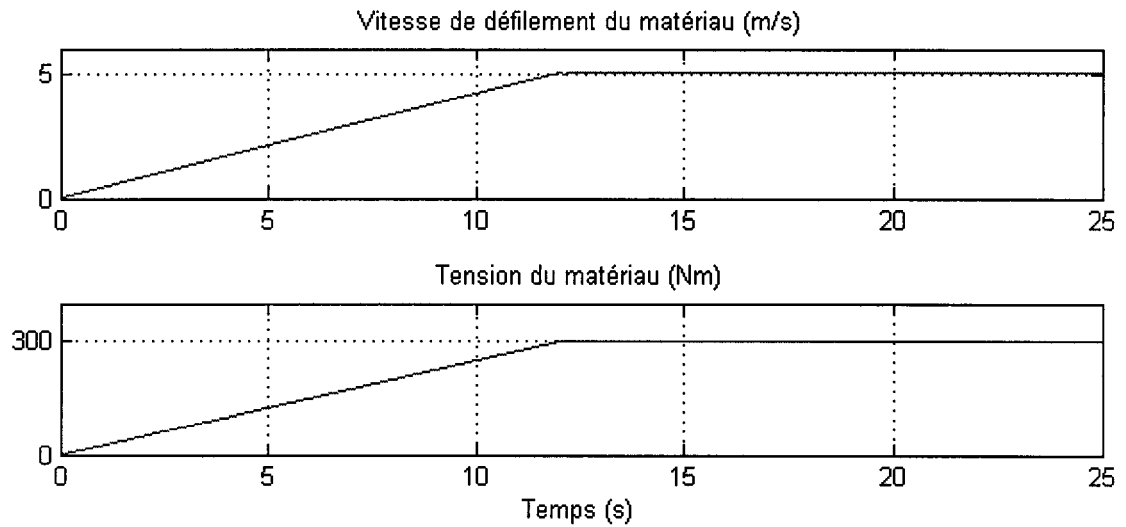


Figure 10 Vitesse et tension du matériau

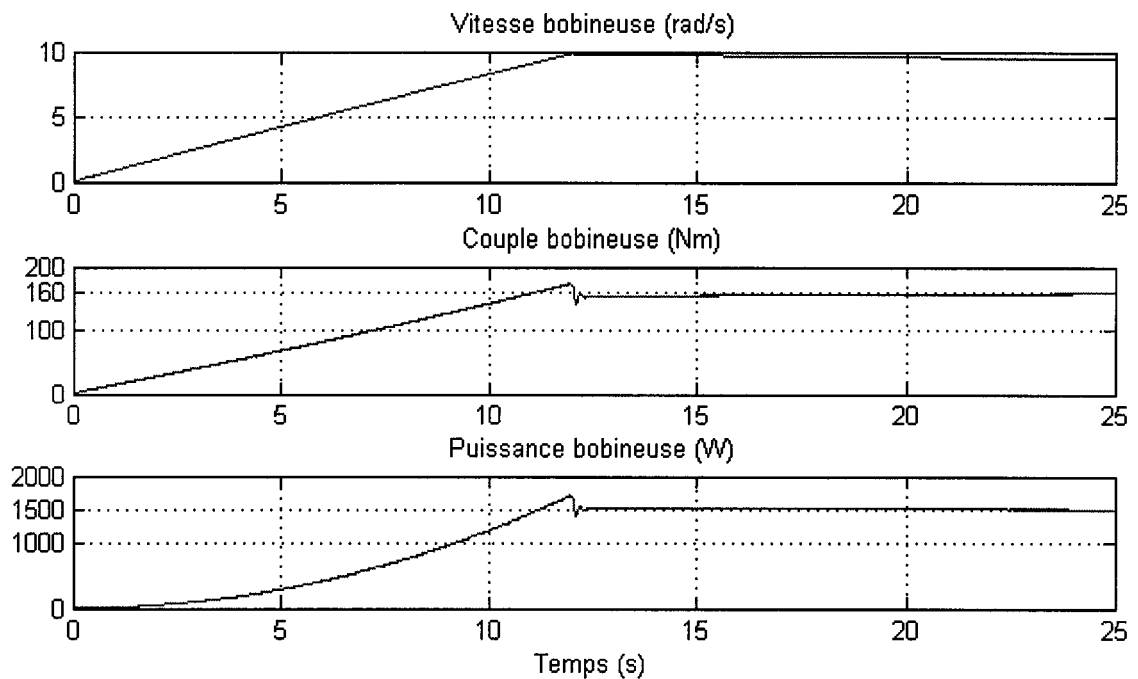


Figure 11 Vitesse de rotation, couple et puissance de la bobineuse

On remarque donc que la vitesse de défilement du matériau augmente linéairement jusqu'à sa valeur souhaitée (5 m/s). La tension du matériau est elle aussi correctement

régulée à sa valeur (300 Nm). Une fois que ces valeurs sont atteintes, on peut observer sur la figure 11 que le couple augmente linéairement à mesure que le matériau est enroulé. Par conséquent, la vitesse angulaire de la bobineuse diminue elle aussi de façon linéaire. La puissance de la bobineuse est alors approximativement constante.

2.4.5 Comparaison des résultats avec le modèle original

Les résultats obtenus précédemment doivent être comparés avec ceux du modèle original contenu dans Matlab/Simulink. Une simulation avec le modèle entièrement Simulink en utilisant le même algorithme de calcul est réalisée. Les références sont également les mêmes. Les figures 12 et 13 montrent l'écart relatif entre les deux modèles par rapport au modèle Simulink. Autrement dit, le pourcentage de variation du modèle SimMechanics par rapport au modèle original : $\left(\frac{dx}{x}\%\right)$. La variable x étant la valeur d'une variable du modèle Simulink et dx la différence entre cette variable dans le modèle SimMechanics et le modèle Simulink.

Les résultats obtenus avec le modèle SimMechanics sont extrêmement proches de ceux obtenus avec le modèle Simulink. La différence étant de l'ordre de 0,1 à 0,2% comparativement au modèle original. On parle de différence et non pas d'erreur, car les modules Simulink et SimPowerSystems possèdent chacun leur propre méthode de résolution du système. Il est alors impossible de savoir qui est le plus fidèle à la réalité avec de si petites différences.

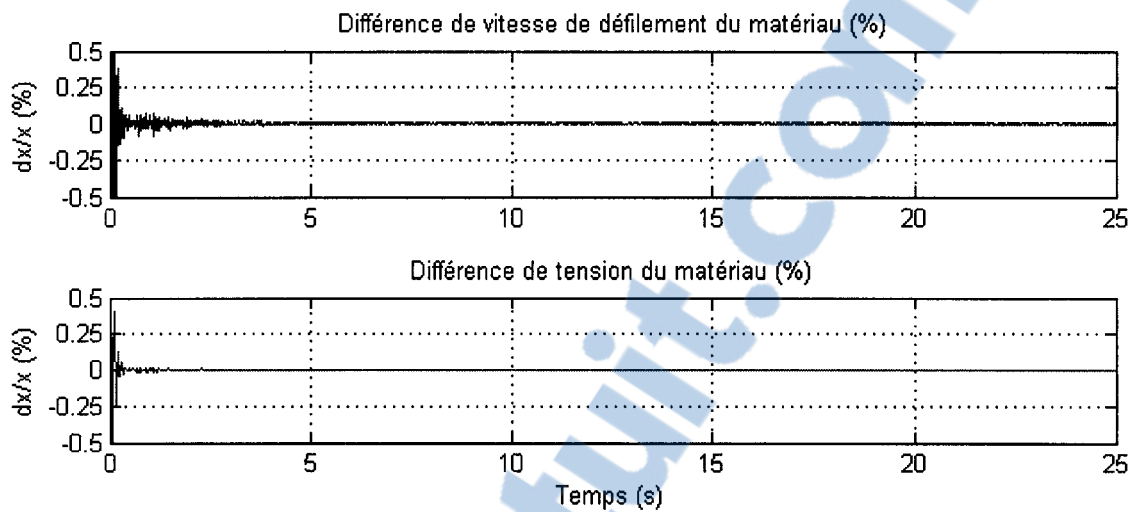


Figure 12 Différences vitesse et tension du matériau

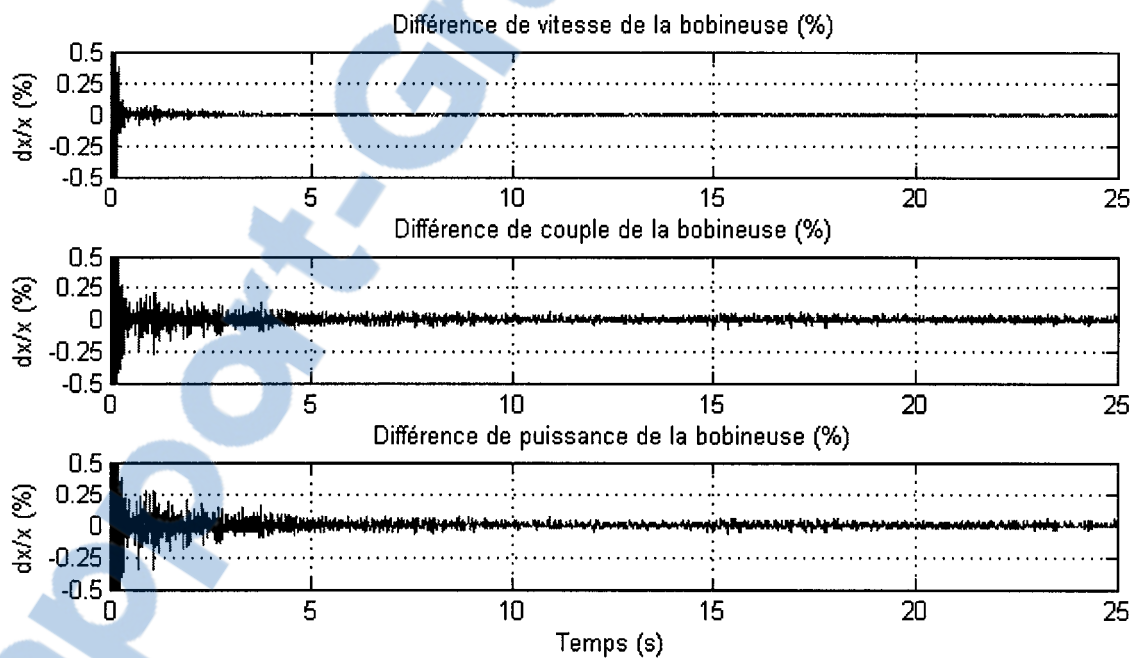


Figure 13 Différences vitesse de rotation, couple et puissance de la bobineuse

Du point de vue des résultats de simulation, on peut donc dire que ces derniers sont équivalents quelque soit le modèle simulé. Par contre en ce qui concerne les temps de simulation, cela n'est pas le cas (tableau I).

Tableau I

Temps de simulation

	Cycle de simulation	Temps réel de simulation obtenu
Modèle Simulink	25 s	42 s
Modèle SimMechanics	25 s	414 s

On remarque que le temps réel de simulation du modèle SimMechanics est dix fois celui du modèle original. Ceci provient de la méthode d'analyse du module SimMechanics lui-même. Cet outil doit tenir compte des différents organes mécaniques en rotation et en translation sur les trois axes et qui compliquent les calculs et allongent les temps de simulation.

2.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif tout d'abord de montrer les enjeux et les difficultés de la simulation multi-domaines ainsi que de présenter les modules de Physical Modeling de Matlab/Simulink utilisés dans ce projet pour la modélisation et la simulation de systèmes électromécaniques.

Un premier exemple traité est celui de la bobineuse. Dans ce modèle, la partie mécanique est modélisée par des blocs SimMechanics. Les simulations ont montré que les résultats du modèle SimMechanics étaient équivalents par rapport à ceux du modèle original (entièrement Simulink). Cependant, les temps de simulation sont beaucoup plus longs (multipliés par un facteur 10).

Ce premier exemple a permis de montrer un des désavantages d'avoir des modules spécialisés dans chaque domaine par rapport à un seul module pluridisciplinaire. En effet, l'utilisation de deux méthodes d'analyse et de calculs entraîne l'allongement des temps de simulation (modèle SimMechanics 10 fois plus lent que le modèle Simulink) alors que la précision des résultats obtenus est la même.

CHAPITRE 3

LE SYSTÈME DE PROPULSION HYBRIDE ÉLECTRIQUE

3.1 Introduction

Cette partie propose une définition d'un véhicule hybride électrique et présente les différentes architectures hybrides possibles. Ensuite, la partie transmission hybride et le système hybride de la Toyota Prius ainsi que son principe de fonctionnement sont expliqués. Les principales caractéristiques du système électrique, du système mécanique et du système de gestion de l'énergie sont enfin, présentées.

3.2 Définition et présentation de la voiture hybride

De façon générale, on appelle véhicule hybride tout véhicule qui, en plus de sa source d'énergie primaire (énergie chimique du carburant en général), possède un stockage dit réversible d'énergie sous une seconde forme. Cette énergie pouvant être l'énergie électrique d'une batterie, d'un super condensateur, l'énergie hydraulique d'une réserve de pression, ou bien l'énergie cinétique d'un volant d'inertie. Cette énergie est dite réversible, car elle peut être délivrée aux roues ou bien stockée par l'intermédiaire d'un dispositif de conversion d'énergie. En pratique, on observe que la quasi-totalité des solutions retenues sont basées sur une seconde source d'origine électrique.

Un véhicule hybride électrique associe ainsi deux sources d'énergie différentes. Il possède une chaîne de traction basée sur un moteur thermique (essence, diesel, gaz, etc.) et une chaîne de traction électrique (batterie ou super condensateur, moteur électrique). Le véhicule hybride électrique est la solution intermédiaire entre les véhicules conventionnels (thermiques) et les véhicules électriques.

Les véhicules hybrides électriques ont été créés pour une raison majeure : afin de diminuer la consommation en carburant d'un véhicule conventionnel et ainsi améliorer le rendement énergétique de ce véhicule. En effet, dans un véhicule conventionnel, ce rendement est de l'ordre de seulement 10 ou 15% à cause de l'utilisation courante du moteur à de faibles vitesses [8]. La conséquence première étant la diminution des polluants émis par ces véhicules, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et plus précisément les émissions de dioxyde de carbone. Le véhicule électrique permet de résoudre ce problème idéalement mais la technologie actuelle sur les batteries et le système d'électronique de puissance ne permet pas de disposer des caractéristiques dynamiques ainsi que d'une autonomie suffisante, qui soient attrayantes pour le consommateur. C'est pourquoi le secteur automobile favorise le développement de véhicules hybrides permettant de regrouper les avantages du véhicule conventionnel (caractéristiques dynamiques très bonnes à des vitesses élevées) et du véhicule électrique (couple important disponible au démarrage, pollution nulle). La réduction de la consommation globale du véhicule s'effectue :

- lors des phases d'arrêt du véhicule : le moteur à combustion peut être coupé;
- lors des phases de décélération ou de freinage, où l'énergie cinétique peut être partiellement récupérée dans les batteries par le moteur électrique au lieu d'être perdue dans les freins (sous forme calorifique);
- par une utilisation du moteur à combustion qui peut être choisie de façon à ce qu'il soit utilisé dans sa plage de haut rendement, quitte à stocker la part d'énergie non utilisée pour la traction. De plus lors des fortes accélérations, il est plus intéressant d'utiliser le moteur électrique alimenté par l'énergie stockée dans la batterie que de faire fonctionner le moteur à combustion à sa limite, ce qui dégrade le rendement énergétique du véhicule.

Ainsi, dans l'optique d'utiliser le moteur à combustion dans sa plage de haut rendement pour réduire sa consommation, le véhicule hybride n'est pas simplement la juxtaposition

de deux chaînes de traction qui travaillent en alternance. En effet, ces deux chaînes travaillent souvent (selon l'architecture utilisée) en même temps de façon à utiliser l'énergie disponible de la meilleure manière possible tout en gardant de bonnes prestations de conduite (accélération, confort de conduite, vitesse de pointe). La gestion de l'énergie provenant des deux sources peut par conséquent s'avérer extrêmement complexe.

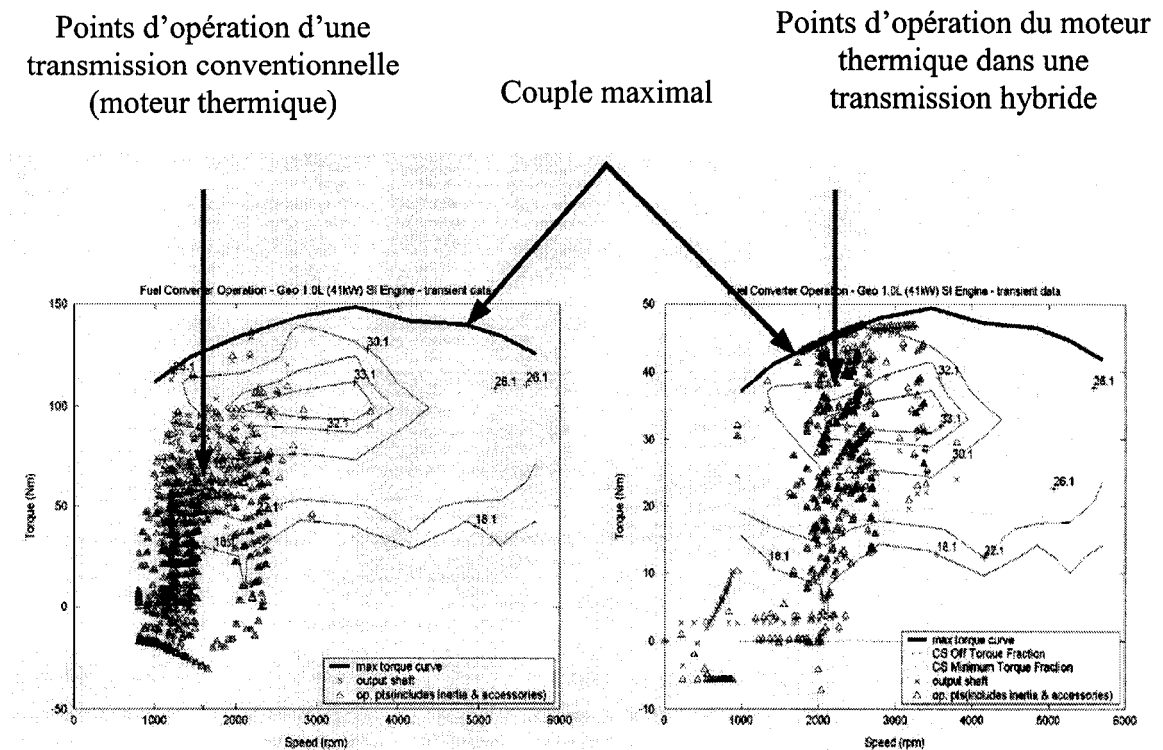


Figure 14 Points d'opération du moteur thermique dans le mode hybride⁵.

Le graphique ci-dessus montre les points d'opérations du moteur thermique dans le cas d'une propulsion conventionnelle et dans le cas d'une propulsion hybride électrique. On remarque que le moteur à combustion d'un véhicule hybride électrique tourne à des

⁵ Ce graphique a été tiré et adapté de l'article d'Ali Emadi, Kaushik Rajashekar, Sheldon S. Williamson et Sedjan M. Lukic [8]

vitesses plus élevées et qu'il délivre un couple mécanique en sortie plus élevé. Cette courbe démontre qu'en utilisant un système de gestion de l'énergie adapté, il est possible de forcer le moteur thermique (en lui imposant une vitesse) à fonctionner dans une zone de haut rendement ou le couple de sortie est plus important et par conséquent d'augmenter le rendement énergétique du véhicule.

3.3 Les différentes architectures hybrides

Durant les dernières années, plusieurs véhicules hybrides électriques ont été proposés sur le marché automobile. La diversité des réalisations montre que le choix d'une architecture et les choix techniques qui en découlent ne sont pas simples. Trois architectures hybrides sont possibles : l'architecture série, l'architecture parallèle et l'architecture série/parallèle, appelée aussi architecture combinée.

3.3.1 L'architecture hybride série

Dans l'architecture série (figure 15), la propulsion est intégralement assurée par le moteur électrique. Ce système est appelé série car tous les éléments de la chaîne de traction sont disposés en série, c'est-à-dire les uns à la suite des autres. Le moteur thermique (par le biais d'une génératrice) et/ou la batterie fournissent la puissance nécessaire au moteur électrique dont le couple est transmis directement aux roues [17].

Dans cette architecture, le moteur électrique doit être relativement puissant car il assure à lui seul la totalité de la propulsion. Le rôle de la génératrice est d'une part de fournir la puissance électrique nécessaire au moteur, et d'autre part de recharger la batterie. L'avantage de cette architecture est que le moteur thermique fonctionne à un rendement élevé ce qui réduit le niveau de ses émissions polluantes [8].

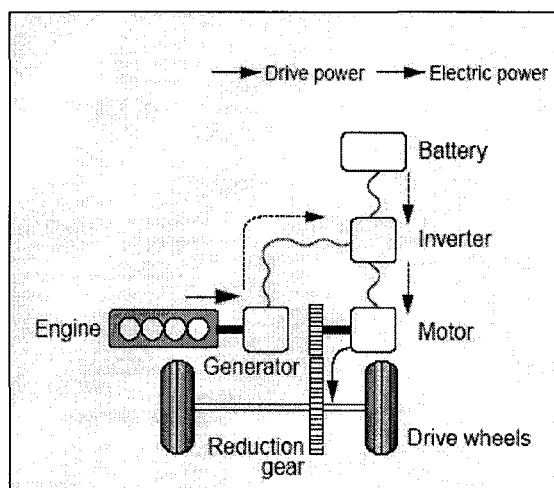


Figure 15 L'architecture hybride série [17]

L'inconvénient principal est la perte d'énergie dans la chaîne de transmission. En effet, la puissance mécanique du moteur à combustion doit être transformée tout d'abord en puissance électrique pour alimenter le moteur, pour enfin être convertie une nouvelle fois en puissance mécanique aux roues. Ce système est particulièrement utilisé pour des véhicules à vocation citadine.

3.3.2 L'architecture hybride parallèle

Dans l'architecture parallèle, le couple fourni aux roues provient du moteur thermique ainsi que du moteur électrique. La batterie ne peut cette fois, comparativement à l'architecture série, être rechargée que par le moteur électrique en fonctionnement génératrice. Les puissances provenant des deux sources circulent en parallèle [17].

Cette architecture relativement simple (figure 16) ne peut pas à la fois fournir le couple nécessaire aux roues ainsi que le couple au moteur pour recharger la batterie. C'est uniquement dans le mode freinage que l'état de charge de la batterie peut être amélioré. Le moteur électrique est utilisé pour les faibles vitesses tandis que le moteur à combustion est utilisé pour des vitesses plus élevées où son rendement est meilleur. Le

ratio de la puissance fournie par les deux moteurs peut être choisi de façon à réduire la consommation en utilisant chaque moteur dans sa plage de haut rendement. L'avantage de cette architecture par rapport à l'architecture hybride série est que la perte d'énergie dans la chaîne de transmission est moindre.

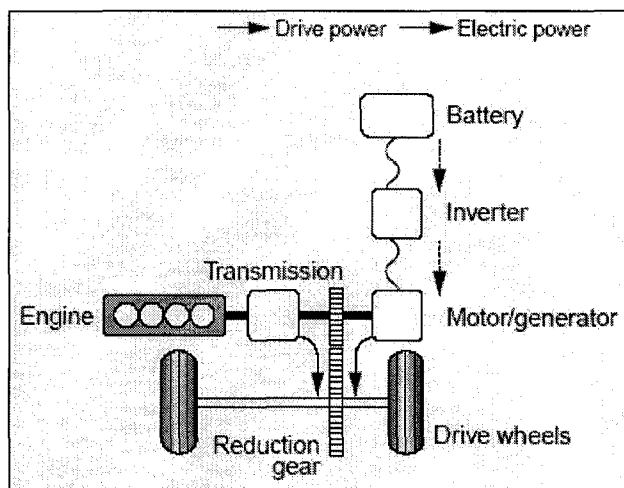


Figure 16 L'architecture hybride parallèle [17]

3.3.3 L'architecture hybride série/parallèle

La troisième architecture (figure 17) est l'architecture hybride série/parallèle, qui est une combinaison des deux architectures vues précédemment, et qui permet de bénéficier des avantages de ces deux systèmes. Deux moteurs électriques et un moteur à combustion sont utilisés.

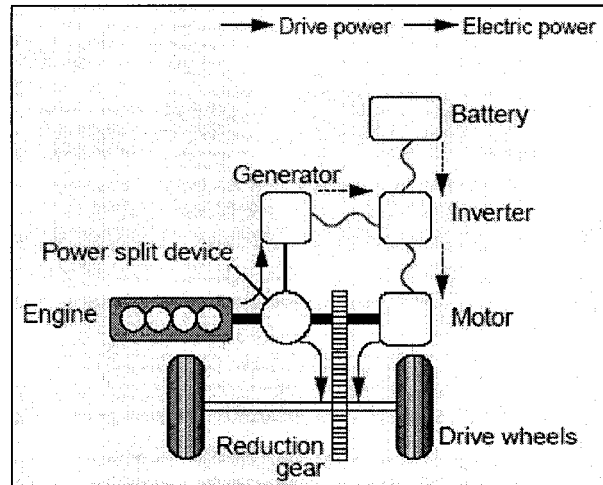


Figure 17 L'architecture hybride série/parallèle [17]

Le moteur à combustion peut, suivant les modes de fonctionnement, fournir sa puissance mécanique aux roues directement et/ou entraîner une génératrice pour fournir la puissance électrique nécessaire au second moteur électrique. Ce dernier fournit à son tour un couple mécanique aux roues. La puissance requise par le moteur électrique peut provenir de la batterie et/ou de la génératrice entraînée par le moteur à combustion. La batterie quant à elle peut être rechargée lors du freinage par le moteur électrique en fonctionnement générateur (entraîné par l'énergie cinétique du véhicule) ou bien par la génératrice en conduite normale. Comme on peut le voir, ce système propose de multiples solutions pour fournir la puissance aux roues ou recharger la batterie, permettant ainsi l'utilisation des différents moteurs dans leurs zones de haut rendement selon le mode de fonctionnement en cours.

3.3.4 Choix de l'architecture pour la Toyota Prius

Des trois architectures vues précédemment, l'architecture hybride série/parallèle est celle qui offre le plus de souplesse d'utilisation. Elle permet d'offrir toutes les possibilités de gestion de la puissance entre le moteur électrique et le moteur thermique.

Ainsi en comparant les performances des trois architectures sur différents critères (tableau II), on s'aperçoit que l'architecture série/parallèle est toujours plus performante que les deux autres. C'est pourquoi nous avons choisi de modéliser le système de propulsion de la Toyota Prius. Ce système, nommé THS II pour Toyota Hybrid System II, est sans conteste une référence dans le secteur de l'automobile hybride et lui a valu d'être élu voiture de l'année 2005 en Europe. La suite de ce chapitre décrit plus en détails la Prius et notamment le système THS II simulé par la suite.

Tableau II

Comparatif des différentes architectures hybrides⁶

	Réduction de la consommation				Performances dynamiques	
	Arrêt du moteur thermique	Récupération d'énergie	Rendement du contrôleur d'énergie	Rendement total	Accélération	Hautes vitesses
Série	**	***	**	**	*	*
Parallèle	**	**	*	**	**	*
Série/parallèle	***	***	***	***	**	**

* Faible

**Moyen

***Très bon

3.4 La Toyota Prius et son système THS II

En 1997, après une décennie de recherche, en créant notamment le programme Hybrid Synergy Drive dans le but d'allier performance et diminution de la pollution, Toyota lance la première Prius et son système THS. Toyota prouva que cette solution pouvait être appliquée en série. Depuis 1997, la Prius a été remaniée à deux reprises sans que le

⁶ Ce tableau a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

choix de l'architecture série/parallèle ne soit remis en cause. La dernière version, apparue en 2003, a cependant été profondément revue (système THS II), offrant un gain substantiel en terme de consommation. Le but du projet est non pas de simuler le véhicule dans son ensemble mais le système THS II correspondant à la partie transmission hybride de la voiture et à son système de gestion de l'énergie.



Figure 18 Toyota Prius⁷

3.4.1 Les différents modes de fonctionnement

Selon les modes de fonctionnement, la gestion de l'énergie dans le système de transmission THS II est différente et ce dans le but d'obtenir le meilleur rendement possible de chaque moteur tout en gardant un niveau de performance élevé. Le système de transmission hybride (figure 19) est constitué du moteur électrique, du moteur à combustion, du circuit d'alimentation haute tension, de la génératrice, du répartiteur de puissance, du système de transmission et de la batterie.

De plus, on peut ajouter le sous-système de commande et de gestion de l'énergie qui permet de faire fonctionner et de gérer les différents systèmes énoncés. Tous ces

⁷ Cette photo a été tirée du document de Toyota [17].

systemes sont décrits dans la suite de ce chapitre et font l'objet d'une étude approfondie sous l'environnement Matlab/Simulink dans la suite de ce rapport.

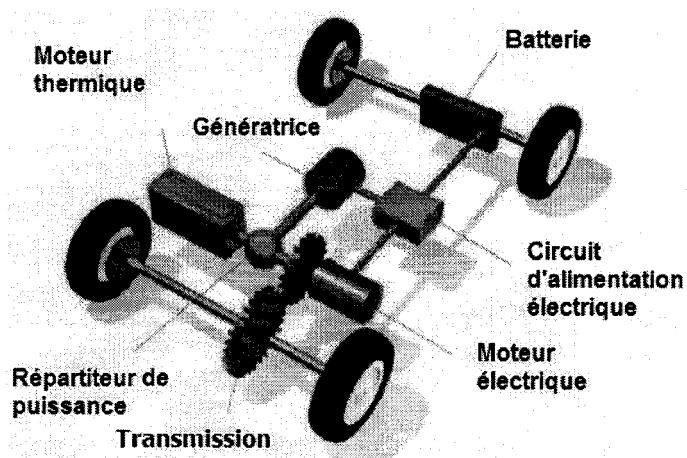


Figure 19 Le système de transmission de la Toyota Prius⁸

3.4.2 Démarrage, basses et moyennes vitesses

Le moteur à essence n'est pas utilisé au démarrage jusqu'aux vitesses moyennes (figure 20). Ceci a pour but de ne pas utiliser le moteur à combustion dans sa zone de faible rendement. Le véhicule est donc mû exclusivement par le moteur électrique (A).

⁸ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

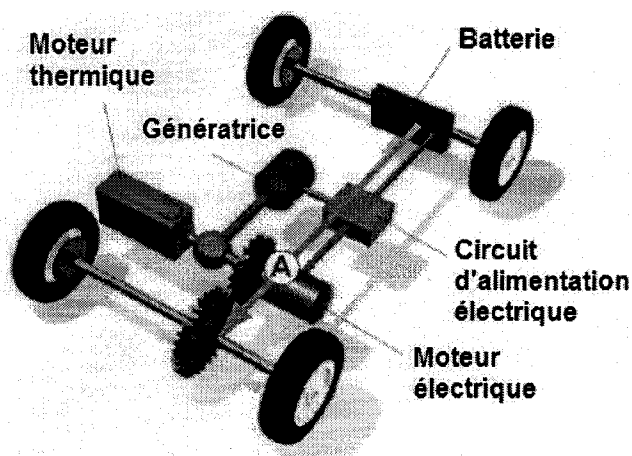


Figure 20 Démarrage, basses et moyennes vitesses⁹

Dans ce mode, la puissance fournie en sortie du moteur électrique est limitée à 20 kW. Le moteur électrique étant pourtant un moteur de 50 kW, cette puissance est limitée par la batterie qui ne peut délivrer une puissance maximale de plus de 20 kW.

3.4.3 Conduite normale

En conduite normale, le dispositif de répartition de puissance distribue la puissance générée par le moteur à essence. Cette puissance peut suivre deux voies. Une partie entraîne directement les roues (C) et l'autre permet d'entraîner une génératrice qui fournit à son tour la puissance nécessaire au moteur électrique (B) (figure 21). Ce dernier fournissant le couple requis aux roues.

⁹ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

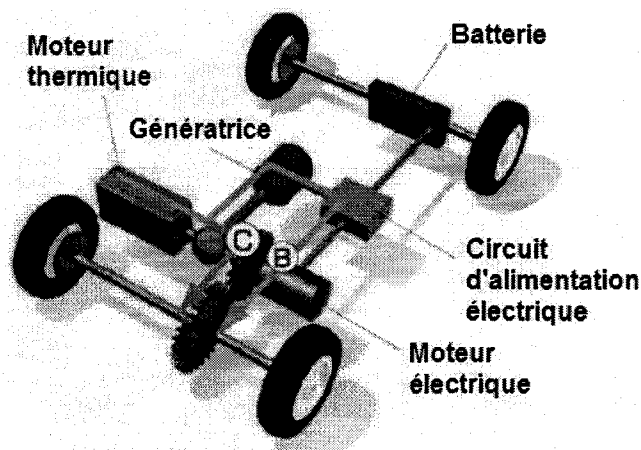


Figure 21 Conduite normale¹⁰

On pourrait penser que le fait de transformer la puissance mécanique en puissance électrique pour enfin la reconvertir en puissance mécanique est une chose superflue. Le moteur thermique ne possède pas un bon rendement à des vitesses faibles comme il a été expliqué précédemment. Ainsi, malgré les pertes engendrées lors des différentes conversions de puissance, le rendement énergétique est plus favorable dans cette voie que dans la voie où la puissance mécanique en sortie du moteur à combustion est transmise directement aux roues. La puissance fournie en sortie du moteur électrique est limitée à 30 kW. Cette puissance est limitée par la génératrice qui ne peut fournir une puissance maximale de plus de 30 kW. Ce procédé permet de faire travailler le moteur à combustion à des vitesses plus élevées et par conséquent avec un meilleur rendement. La répartition des flux de puissance est contrôlée pour obtenir un rendement énergétique optimal. Dans ce mode, pour des vitesses faibles, le moteur électrique sera davantage utilisé. Par contre pour des vitesses plus élevées, le répartiteur de puissance aura tendance à favoriser la voie où la puissance mécanique du moteur à combustion est transmise directement aux roues.

¹⁰ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

3.4.4 Forte accélération

Dans le cas d'une forte accélération (figure 22), correspondant à une demande de couple importante, le moteur électrique délivre sa pleine puissance (50 kW). Ce dernier est alimenté en priorité par la batterie (A) qui fournit une puissance de 20 kW ainsi que par la génératrice (B) qui délivre une puissance de 30 kW. Cette dernière est entraînée par le moteur à combustion. La batterie fournit une puissance additionnelle au moteur électrique.

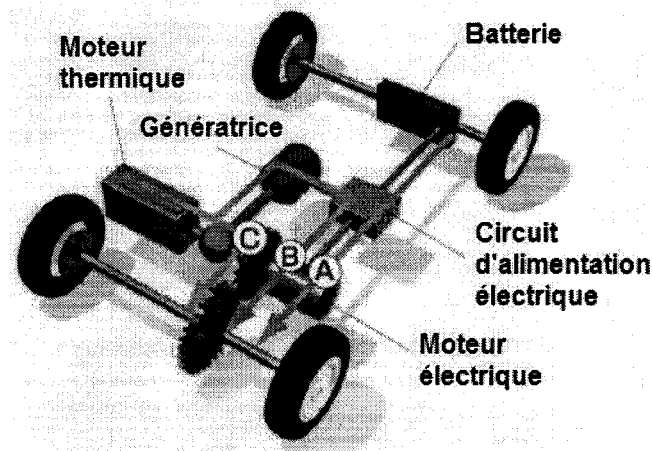


Figure 22 Forte accélération¹¹

La gestion des flux d'énergie est faite de telle manière qu'elle permet de procurer une accélération linéaire et souple afin de garantir un confort de conduite satisfaisant.

3.4.5 Décélération, freinage et arrêt

Lors d'une décélération ou d'un freinage (figure 23), le moteur électrique fonctionne en mode génératrice (D), entraîné par l'énergie cinétique de la voiture. Le moteur produit une force qui tend à s'opposer à celle créée par le véhicule. La puissance ainsi délivrée

¹¹ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

par l'ensemble contrôleur-convertisseur fonctionnant en redresseur est directement stockée dans la batterie. Dans une voiture classique, l'énergie cinétique est perdue à chaque fois que les freins sont sollicités pour ralentir le véhicule. C'est une source d'énergie importante pour la recharge de la batterie, tout particulièrement en ville où les arrêts et les redémarrages sont fréquents. Dans le cas où le véhicule est à l'arrêt, le moteur à combustion est automatiquement coupé.

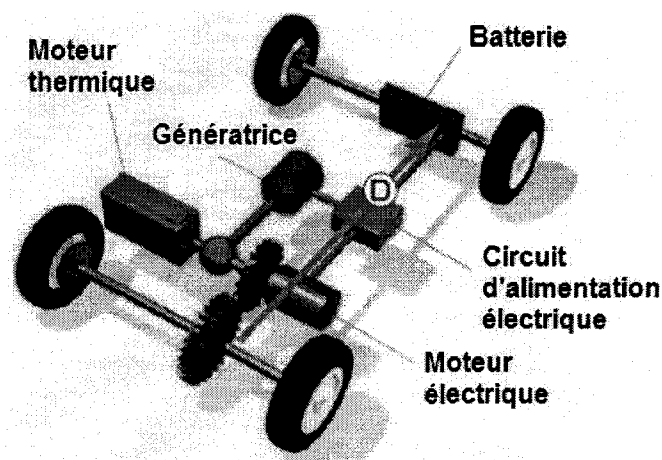


Figure 23 Décélération, freinage et arrêt¹²

3.4.6 Recharge de la batterie

L'état de charge de la batterie est contrôlé de façon à préserver un certain niveau de charge. Si ce niveau diminue et atteint une certaine limite, en conduite normale, la génératrice entraînée par le moteur à combustion intervient pour recharger la batterie (E). Ainsi, la Toyota Prius ne nécessite aucune recharge électrique extérieure (figure 24).

¹² Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

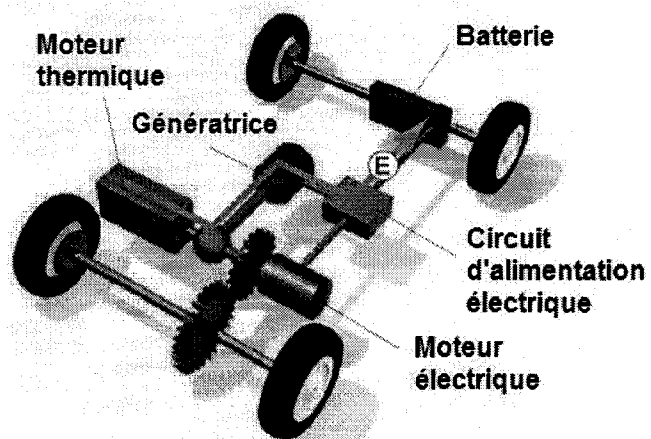


Figure 24 Recharge de la batterie¹³

3.5 Caractéristiques principales du système THS II

Cette partie décrit les différentes composantes le système de transmission hybride THS II. Une description succincte de leurs rôles et de leurs principes de fonctionnement est faite et a pour objectif de présenter ce qui est simulé dans la suite de ce rapport.

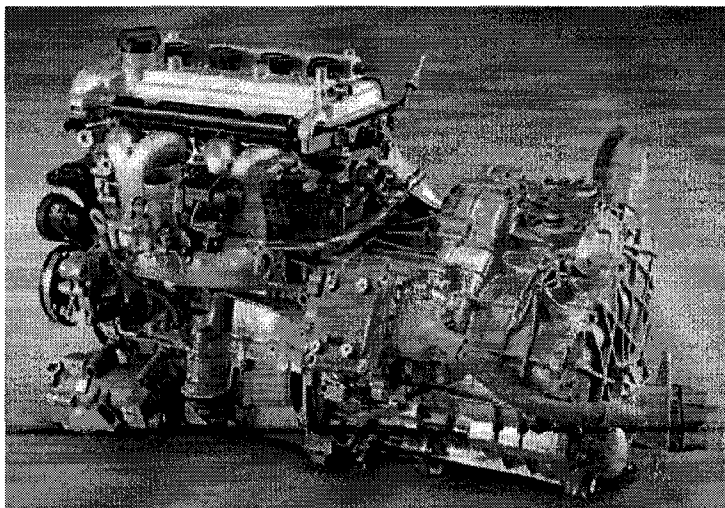


Figure 25 Le système THS II

¹³ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

3.5.1 Le circuit électrique haute tension

La principale évolution apportée à la nouvelle Prius est son système d'alimentation à haute tension. En effet, la tension aux bornes de la génératrice et du moteur électrique a été portée à 500 V au lieu de 274 V avec le système précédent THS (figure 27).

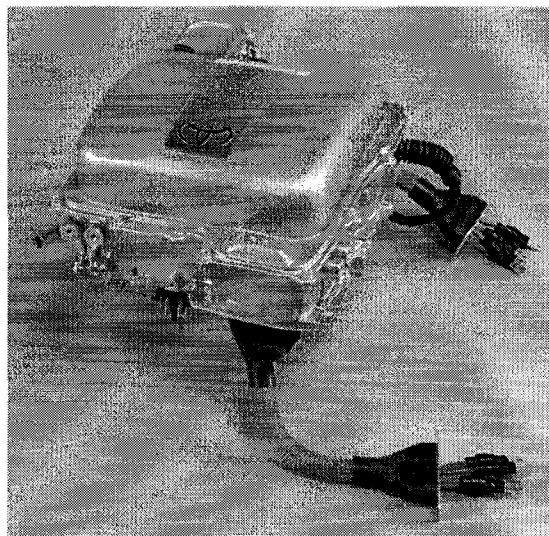


Figure 26 Circuit électrique haute tension¹⁴

La tension aux bornes de la batterie est de 202 V et est élevée à 500 V. Le but d'élever la tension par l'intermédiaire d'un convertisseur CC/CC est de pouvoir alimenter un moteur électrique de puissance plus importante. Le moteur utilisé est un moteur synchrone à aimants permanents dont la puissance délivrée est proportionnelle à la tension à ses bornes.

¹⁴ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

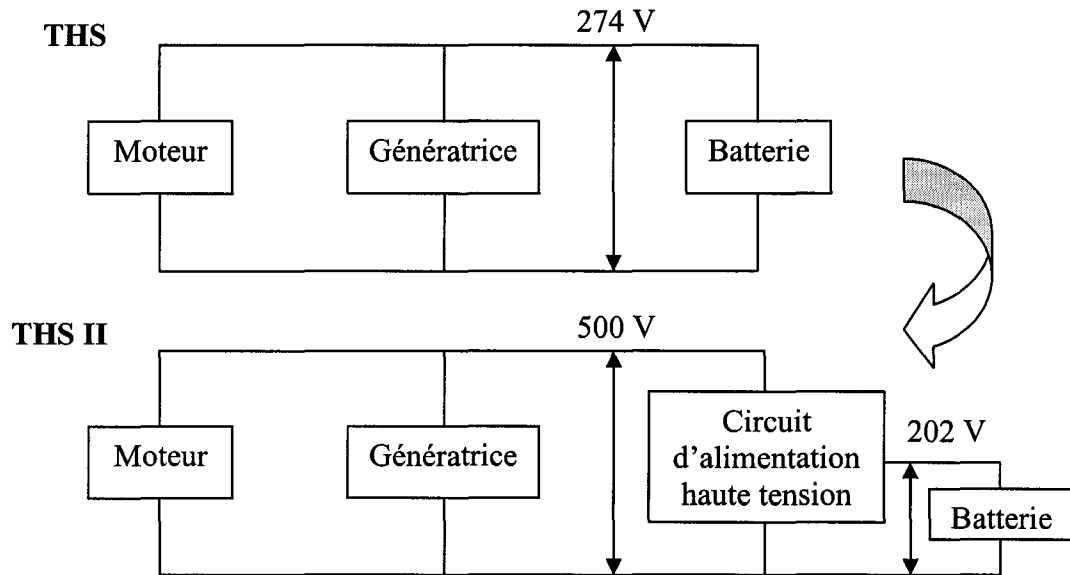


Figure 27 Schéma de principe du circuit haute tension¹⁵

Les pertes joules dissipées sont fonction de la résistance interne et du courant la traversant au carré.

$$P_j = R.I^2 \quad (3.1)$$

À pertes joules approximativement équivalentes (même courant), la puissance disponible est presque doublée (de 33 kW pour THS à 50 kW pour THS II) et le couple maximal disponible augmenté (de 350 Nm pour THS à 400 Nm pour THS II).

¹⁵ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

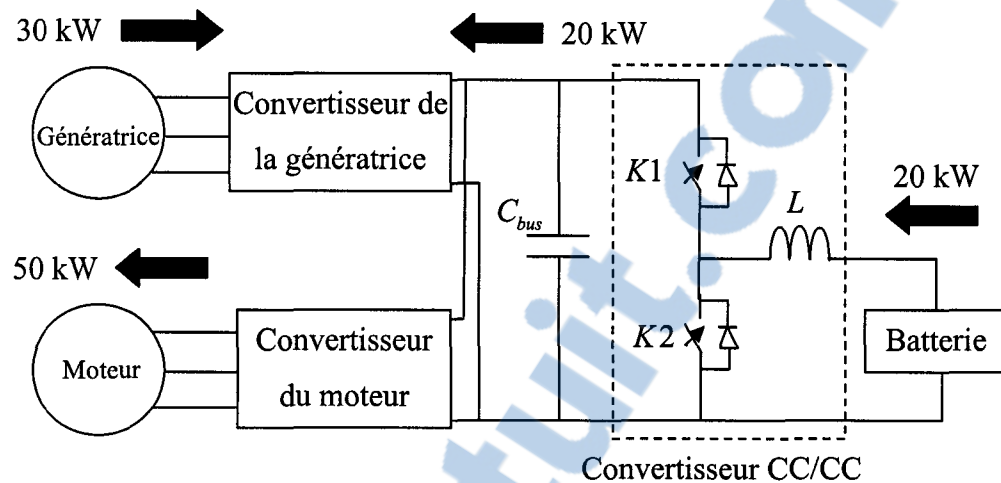


Figure 28 Les flux de puissance dans le circuit d'alimentation haute tension¹⁶

Pour les flux de puissance (figure 28), la puissance délivrée au moteur provient de :

- La batterie (20 kW). Le convertisseur CC/CC permet de redresser la tension de 202 V à 500 V. La puissance en entrée et en sortie du convertisseur est de 20 kW. La tension du bus CC aux bornes du condensateur est réglée à 500V.
- La génératrice entraînée par le moteur à combustion. La puissance fournie par la génératrice est de 30 kW. La tension aux bornes de la génératrice est fixée à 500 V par le condensateur du bus CC. Un redresseur est utilisé en sortie de la génératrice pour convertir la tension triphasée alternative en tension continue.

Un convertisseur est également utilisé pour convertir le courant continu en courant alternatif triphasé pour alimenter le moteur. La puissance maximale transitant dans ce convertisseur est de 50 kW. Tous les convertisseurs utilisés sont bidirectionnels de façon

¹⁶ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

à permettre au courant de circuler dans les deux sens selon le mode de fonctionnement utilisé (freinage ou traction).

Les descriptions des convertisseurs de puissances ainsi que le contrôle de la tension aux bornes du condensateur du bus CC sont effectuées en détails dans le chapitre suivant.

3.5.2 La transmission hybride et son répartiteur de puissance

La transmission hybride de la Toyota Prius est constituée du moteur à combustion, du moteur électrique, de la génératrice, du répartiteur de puissance et de la boîte de vitesses. Le rôle du répartiteur de puissance, comme il a été vu précédemment, est de répartir la puissance mécanique du moteur à combustion entre les roues et la génératrice. Cette division de la puissance dépend du mode de fonctionnement du véhicule. La puissance délivrée par le moteur pouvant suivre une voie mécanique ou une voie électrique.

Le répartiteur de puissance utilise un train planétaire épicycloïdal (figure 29). Ce dispositif permet aux trois moteurs d'additionner leurs couples sans imposer un rapport fixe entre les régimes. Le train planétaire épicycloïdal est composé d'un pignon planétaire associé à des pignons satellites (appelés ainsi car les satellites tournent autour du planétaire comme dans le système solaire). Le train planétaire reçoit, par la couronne à denture interne, la puissance du moteur électrique et par le porte-satellites celle du moteur à combustion. Le pignon soleil étant solidaire de la génératrice.

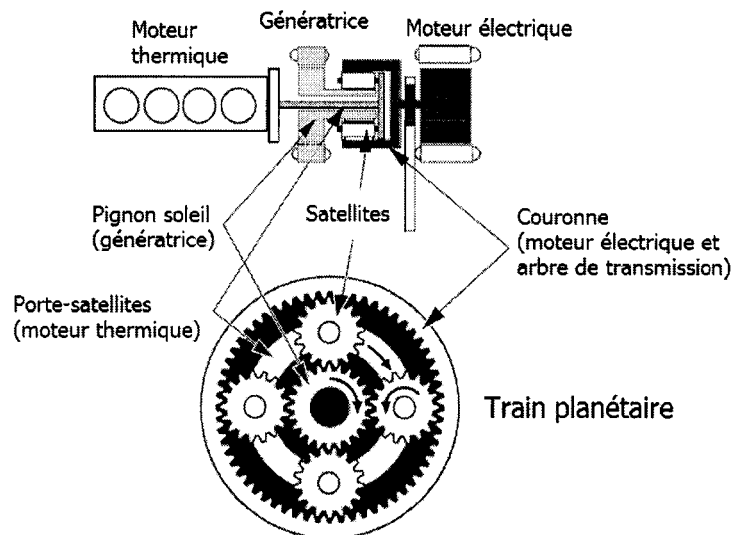


Figure 29 Train planétaire épicycloïdal¹⁷

Selon le mode de fonctionnement du véhicule, les différents éléments du train planétaire épicycloïdal tournent dans un sens ou l'autre à une certaine vitesse (figure 30).

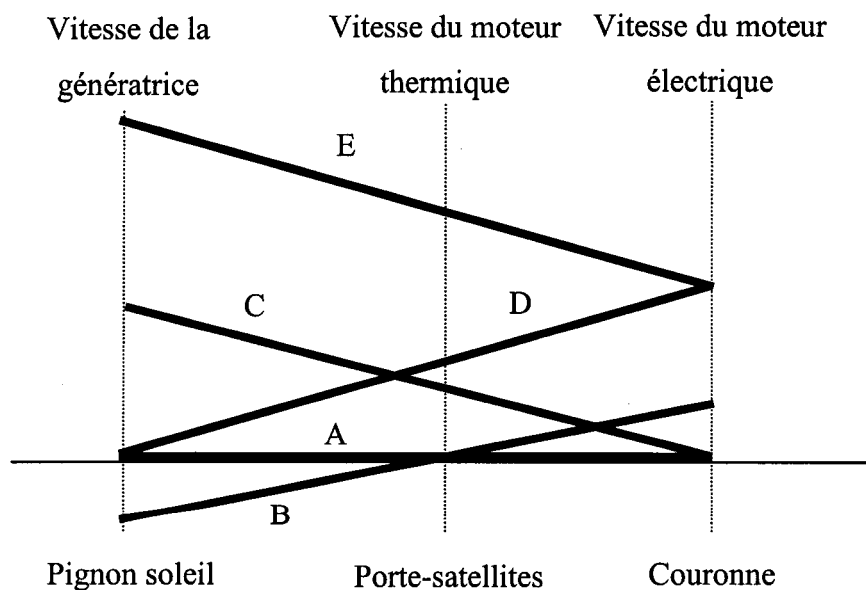


Figure 30 Comportement du train planétaire

¹⁷ Ce graphique a été tiré et adapté du document de Toyota [17].

Cette figure présente donc les différentes vitesses mises en jeu sur chacun des éléments tournant du train planétaire et ce pour chaque mode de fonctionnement du véhicule. À l'arrêt (A), aucun des trois moteurs ne tourne. Au démarrage ou à basse vitesse (B), le véhicule est mû exclusivement par le moteur électrique. Lorsque le mode hybride est activé (MCI allumé), la génératrice dans le rôle de l'alternateur entraîne le pignon soleil et démarre le moteur à combustion (C). En conduite normale (D), le moteur thermique est utilisé. Le pignon soleil (génératrice) ne tourne pas car la recharge de la batterie n'est pas nécessaire. Enfin, dans le cas d'une forte accélération (E), le moteur à combustion fournit plus de puissance, le moteur électrique (couronne) fonctionne et est alimenté par la génératrice (pignon soleil) et par la batterie qui délivre une puissance additionnelle.

La méthode pour tracer ce graphe et les calculs liés au couple et à la vitesse pour chaque élément tournant sont expliqués au chapitre 6.

3.5.3 Le système de gestion de l'énergie

Le système de gestion de l'énergie a pour objectif de proposer un rendement énergétique aussi élevé que possible tout en gardant des performances dynamiques et un confort de conduite élevés. Il a également pour objectif de gérer l'énergie dans les circuits auxiliaires du système de transmission hybride tels que la climatisation par exemple. Dans le cadre de ce projet, seulement quelques paramètres ont été pris en considération dans le système de contrôle des flux d'énergie des trois moteurs. L'utilisation des différents moteurs dans ce projet est fonction des paramètres suivants :

- la position de la pédale d'accélération ;
- la vitesse actuelle du véhicule ;
- la position de la pédale de frein.

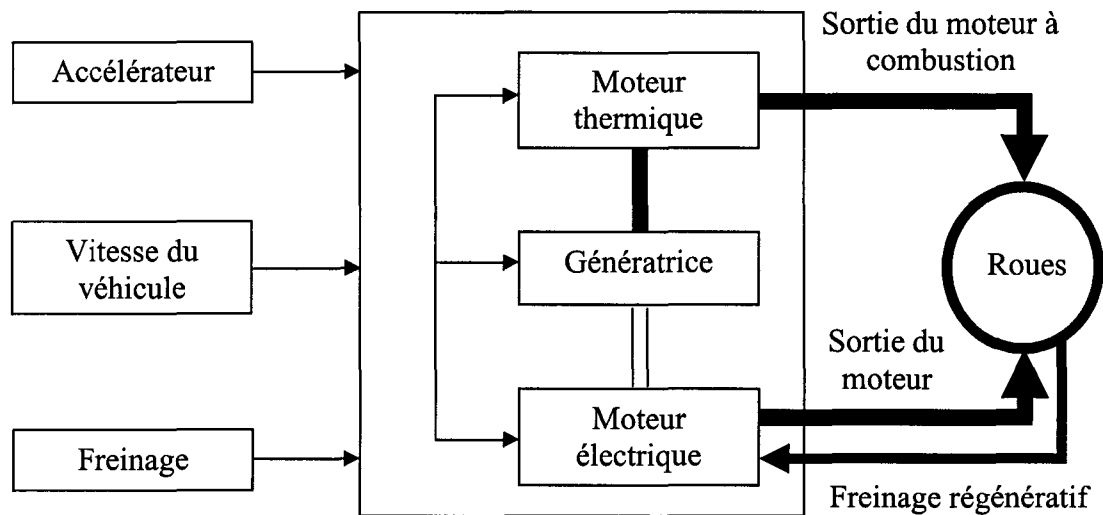


Figure 31 Système de gestion de l'énergie de la transmission hybride

Ces éléments sont les principaux paramètres de commande pris en compte dans l'établissement de la stratégie de commande du système de transmission (figure 31). Cette stratégie de commande est expliquée dans le chapitre 6. En réalité, beaucoup d'autres facteurs peuvent être pris en compte tel que la position de la boîte de vitesses, l'état de charge de la batterie. Cependant, prendre en compte ces paramètres, compliquerait beaucoup la stratégie de commande. De plus, ils ne sont pas nécessaires pour montrer le comportement du système dans son ensemble.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer l'intérêt principal du véhicule hybride qui est la réduction des émissions polluantes ainsi que des différentes architectures utilisées. Ceci est obtenu en utilisant une seconde source d'énergie électrique et en utilisant un système de gestion de l'énergie permettant d'exploiter chacun des moteurs dans sa plage de haut rendement, ceci dans le but ultime d'augmenter le rendement énergétique du véhicule.

Le système de transmission hybride série/parallèle de la Toyota a été décrit dans son ensemble. Les principes de fonctionnement et les caractéristiques principales de chacun des sous-systèmes ont été présentés. Ce système peut se décomposer en un sous-système électrique comportant les moteurs et leurs entraînements, la batterie et le convertisseur CC/CC, un sous-système mécanique incluant un moteur à combustion, un train planétaire et une chaîne de transmission du couple aux roues. Le dernier sous système est celui de la gestion de l'énergie qui détermine les consignes des différents moteurs. Le chapitre suivant présente le modèle Matlab/Simulink réalisé de l'architecture hybride série dans un premier temps et décrit précisément la modélisation de chaque sous-système. Le modèle série/parallèle sera ensuite traité.

CHAPITRE 4

DESCRIPTION DU MODÈLE SÉRIE

4.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de proposer une description détaillée des différents sous-systèmes modélisés dans l'environnement Matlab/Simulink qui composent le modèle de la transmission hybride série. Ce système peut être décomposé en trois sous-systèmes :

- le sous-système électrique qui regroupe le moteur électrique, la génératrice, la batterie et le circuit d'alimentation haute tension;
- le sous-système mécanique qui inclus le moteur à combustion, le système de transmission du couple transmis aux roues, ainsi que la modélisation du véhicule lui-même;
- le sous-système de commande des moteurs.

4.2 Le modèle série dans son ensemble et sa commande

Le modèle série dans son ensemble est présenté par la figure suivante. Il possède donc un sous-système électrique, un sous-système mécanique et un système de commande. On a vu dans le chapitre précédent (figure 15) que dans l'architecture série, le véhicule est mû uniquement par le couple fourni par le moteur électrique. Ce moteur est alimenté par une génératrice qui est alors entraînée par un moteur à combustion, et par une batterie. Une commande pour chacun des trois moteurs donc être définie. Le système au complet est le suivant :

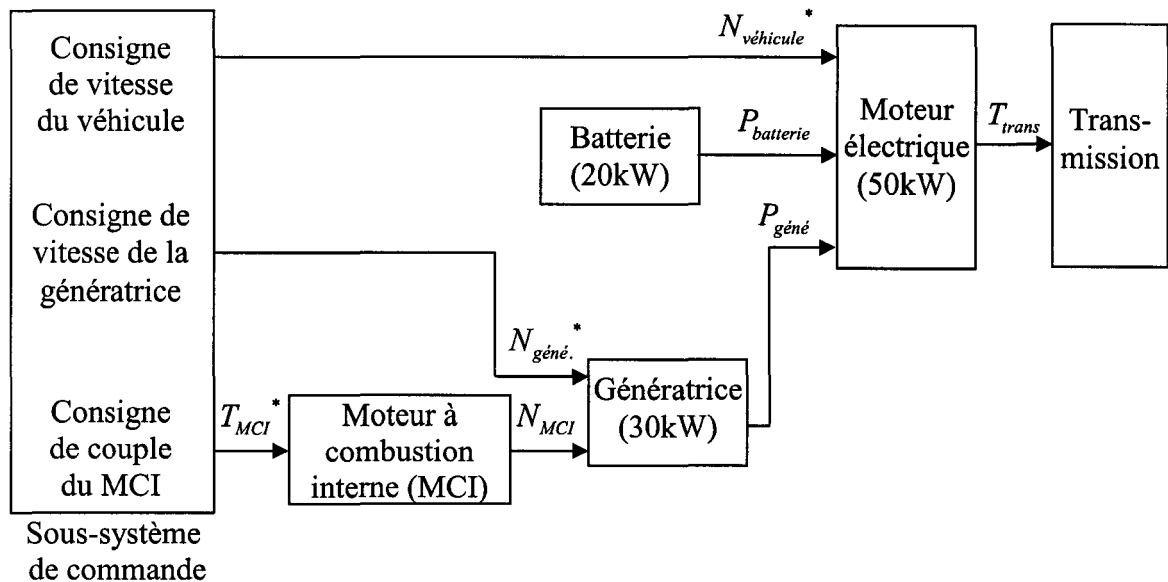


Figure 32 Schéma d'ensemble du modèle série

La consigne de vitesse du véhicule est équivalente à la consigne de vitesse du moteur électrique (en r/min) puisque l'arbre de transmission de ce dernier délivre le couple nécessaire aux roues via le système de transmission. Le moteur à combustion interne et la génératrice sont sur le même arbre. Cet arbre tournant à une vitesse constante qui correspond à la consigne de vitesse de la génératrice (en r/min). Enfin la consigne de couple du moteur à combustion équivaut à la position de la pédale d'accélérateur. Cette dernière consigne est comprise entre 0 et 1. Ainsi la génératrice et le MCI tournent à une même vitesse et leurs couples varient en fonction de la position de la pédale d'accélérateur. Ces différentes consignes sont définies au chapitre 5.

Ce système ne fait pas apparaître de système de gestion de l'énergie de façon à faire fonctionner chacun des moteurs dans sa plage de haut rendement. Un tel système est mis en place et décrit au chapitre 6.

La figure suivante résume la circulation des différents flux de puissance entre les différents systèmes.

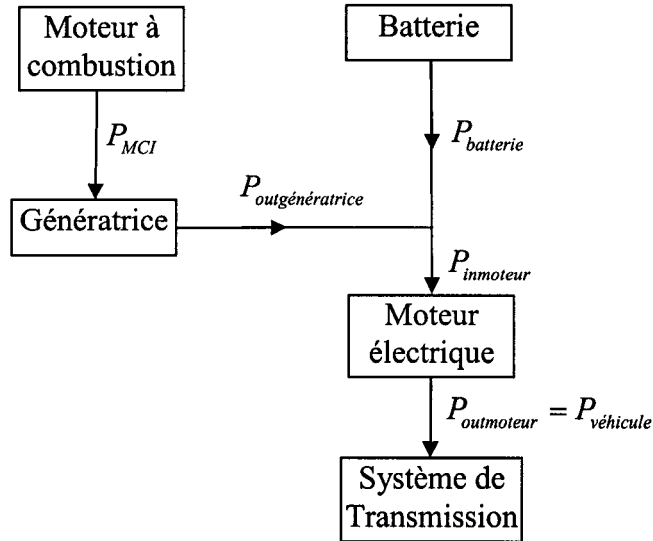


Figure 33 Flux de puissance dans le modèle série

Ainsi, on peut voir que la puissance en entrée du moteur électrique est égale à la puissance délivrée par la batterie plus la puissance fournie par la génératrice. Des pertes apparaissent dans le moteur électrique et la génératrice. On a donc :

$$P_{inmoteur} = P_{véhicule} + P_{pertesmoteur} \quad (4.1)$$

$$P_{inmoteur} = P_{outgéné} + P_{batterie} \quad (4.2)$$

$$P_{MCI} = P_{outgéné} + P_{pertesgéné} \quad (4.3)$$

4.3 Le système électrique

Le système électrique est composé du moteur électrique, de la génératrice, du circuit d'alimentation haute puissance et de la batterie. Le rôle principal du système électrique est de fournir une source d'énergie alternative à celle fournie par le moteur à combustion pour entraîner le véhicule. Cette source d'énergie peut être utilisée de différentes manières selon le mode de fonctionnement du véhicule désiré. Le moteur électrique doit

être capable d'entraîner le véhicule à lui tout seul sous certaines conditions. Il apporte également un couple additionnel aux roues si le couple fourni par le moteur à combustion est insuffisant. Enfin, il permet d'effectuer un freinage régénératif en transformant l'énergie cinétique du véhicule en énergie électrique permettant ainsi de recharger la batterie.

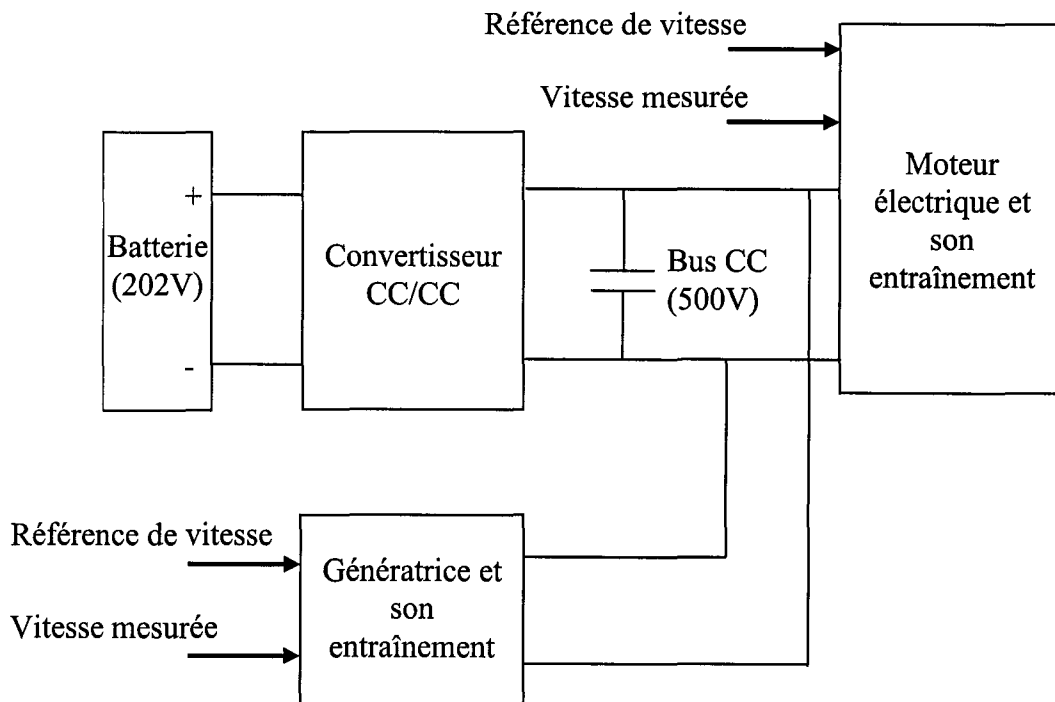


Figure 34 Schéma de principe du système électrique

4.3.1 Le moteur électrique et son entraînement

Le modèle du moteur électrique est basé sur le modèle d'entraînement électrique d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ce modèle correspondant est nommé AC6 dans la librairie «Electric Drives» de SimPowerSystems contenu dans Matlab/Simulink. Le modèle AC6 de l'entraînement disponible a dû être modifié et adapté pour pouvoir être utilisé. Le schéma de principe de l'entraînement électrique

modifié de la MSAP est montré à la figure 35. Le modèle utilisé est un modèle dit à valeurs moyennes. Une régulation de vitesse y est faite. Le module SimPowerSystems propose en effet deux modèles pour l'entraînement électrique de la MSAP. Un modèle détaillé et un modèle dit à valeurs moyennes.

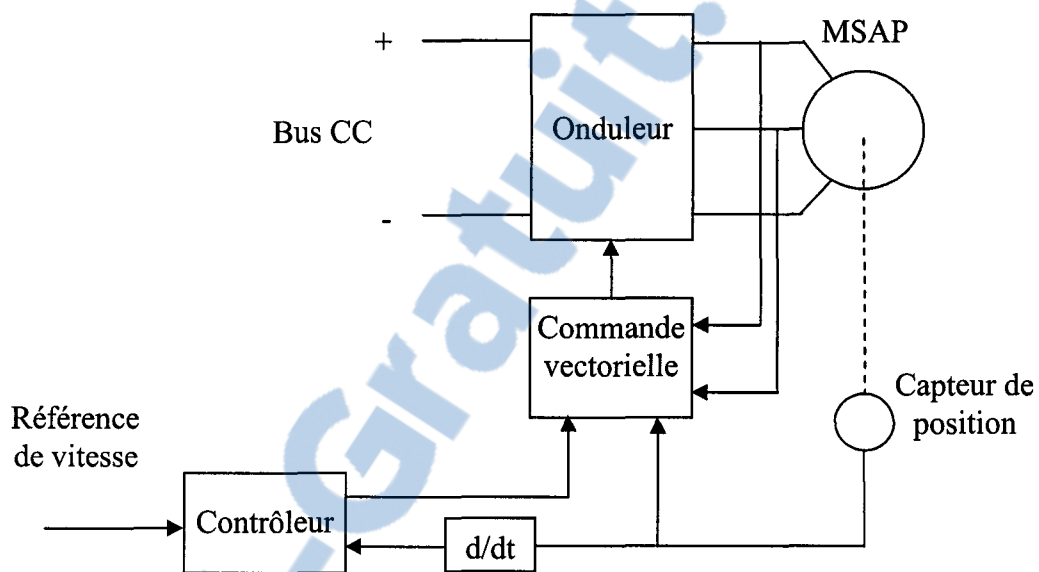


Figure 35 Schéma de principe de l'entraînement électrique du moteur

Le modèle détaillé est un modèle utilisant des interrupteurs pour le régulateur de courant à hystérésis dont les fréquences de commutation sont autour de 10 kHz. Le pas de calcul nécessaire pour obtenir une précision satisfaisante est de l'ordre de la microseconde, ce qui a pour but d'augmenter les calculs et ainsi d'allonger les temps de simulation. De plus, ces commutations créent de faibles oscillations à la fréquence de 10 kHz sur les courants du moteur et par conséquent sur le couple électromagnétique produit par ce dernier. Ces petites oscillations sont alors absorbées par la charge connectée au moteur. Ceci est particulièrement vrai dans le cas étudié où la charge est une voiture. C'est pourquoi la représentation de ces phénomènes à hautes fréquences n'est pas pertinente. L'utilisation d'un entraînement électrique dit à valeurs moyennes permet alors d'augmenter le pas de calcul d'un facteur de 30, ce qui accélérera les simulations en

remplaçant les interrupteurs de puissance par des sources de tension et de courant commandées. Le schéma bloc Simulink de l'entraînement électrique est le suivant :

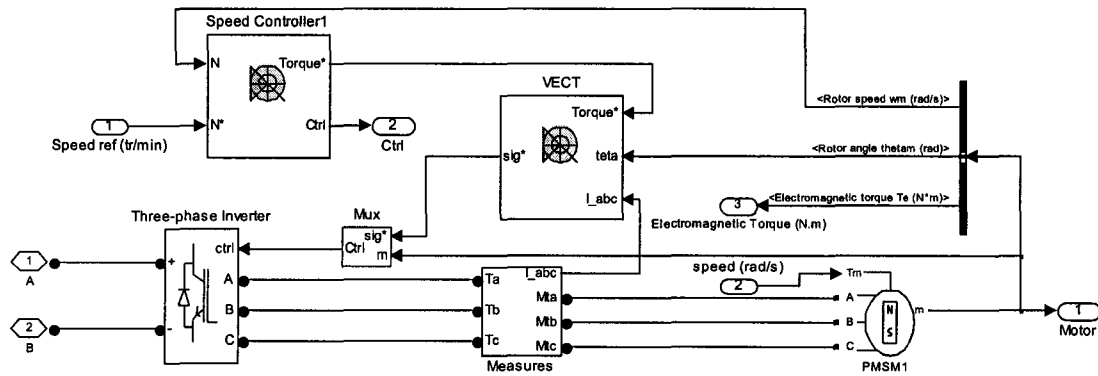


Figure 36 Schéma Simulink de l'entraînement électrique du moteur

4.3.1.1 La machine synchrone à aimants permanents

La machine utilisée dans l'entraînement est une machine synchrone triphasée à aimants permanents à distribution sinusoïdale de flux et tient son nom du fait que le rotor du moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant du stator. Cette vitesse est donc liée à la fréquence de la source.

Le comportement électrique et mécanique de la MSAP a été modélisé dans l'environnement Matlab/Simulink par une représentation d'état du deuxième ordre en utilisant la transformation de Park (figure 37). Cette représentation est nécessaire puisque les entrées et les sorties du modèle de la machine synchrone sont exprimées dans le référentiel a,b,c . La transformation de Park permet de convertir les tensions et les courants pour chaque bobine dans le référentiel a,b,c en deux composantes dans le référentiel $d,q,0$. De plus, cette représentation est nécessaire car les modèles dynamiques des machines à courant alternatif sont relativement lourds et complexes. Afin de les simplifier, on applique un changement de repère. La figure 37 montre la transformation

des trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$. Le nouveau référentiel $d,q,0$, peut être stationnaire ou rotorique de tel sorte que les courants i_d, i_q soient constants.

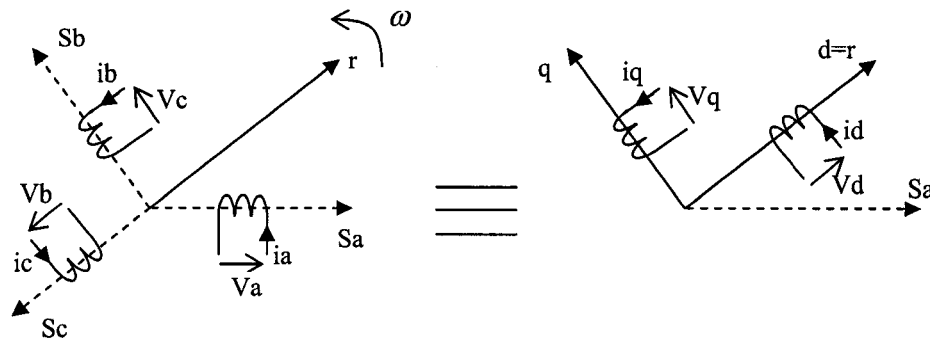


Figure 37 Transformation de Park : Repère initial et repère de Park

Les équations électriques de la machine synchrone sont les suivantes :

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} U_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q \quad (4.4)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} U_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q} \quad (4.5)$$

$$T_e = 1.5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4.6)$$

Les équations mécaniques de la machine synchrone sont les suivantes :

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m) \quad (4.7)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (4.8)$$

Les paramètres de la machine doivent être spécifiés dans le modèle d'entraînement électrique de la MSAP (AC6) sous Matlab/Simulink. Le moteur électrique de la Prius a les caractéristiques suivantes :

- couple constant de 400 Nm entre 0 et 1200 r/min;
- puissance constante de 50 kW entre 1200 et 1540 r/min;
- tension du bus CC : 500 V.

Les paramètres de la machine correspondant à ces caractéristiques sont les suivants :

Tableau III

Paramètres du moteur électrique

Distribution du flux	Sinusoïdale
Entrée, Sortie	Vitesse (rad/s), Couple (Nm)
Résistance statorique	0.005 Ω
Inductance sur l'axe q	0.3 mH
Inductance sur l'axe d	0.3 mH
Flux induit des aimants	0.192 Wb
Inertie	0.25 kg.m ²
Coefficient de friction	0.005 Nm.s
Nombre de paires de pôles	4

Les valeurs de ces paramètres ont été estimées à partir des jeux de paramètres proposés dans le bloc AC6 de la librairie des entraînements électriques dans SPS. Différentes simulations ont été effectuées afin d'ajuster ces valeurs pour rencontrer les spécifications demandés. Ces valeurs ne sont donc pas directement tirées de la littérature ou des données des constructeurs.

4.3.1.2 Onduleur triphasé

La figure 35 montre que l'entraînement électrique du moteur est alimenté par un bus CC maintenu constant à 500 V. Cette tension doit donc être transformée en courant alternatif afin d'alimenter le moteur. Un onduleur triphasé permet de réaliser cette opération. Là encore, l'utilisation d'un modèle à valeurs moyennes est préféré à cause des discontinuités causées par les interrupteurs contenus dans un modèle détaillé. L'onduleur utilisé dans le modèle à valeurs moyennes intègre donc des sources de tension et de courant commandées (figure 38). Du côté CC, une source de courant commandée est utilisée. La valeur du courant est spécifiée par l'équation ci-dessous.

$$I_{cc} = \frac{P_{in} + P_{pertes}}{V_{in}} \quad (4.9)$$

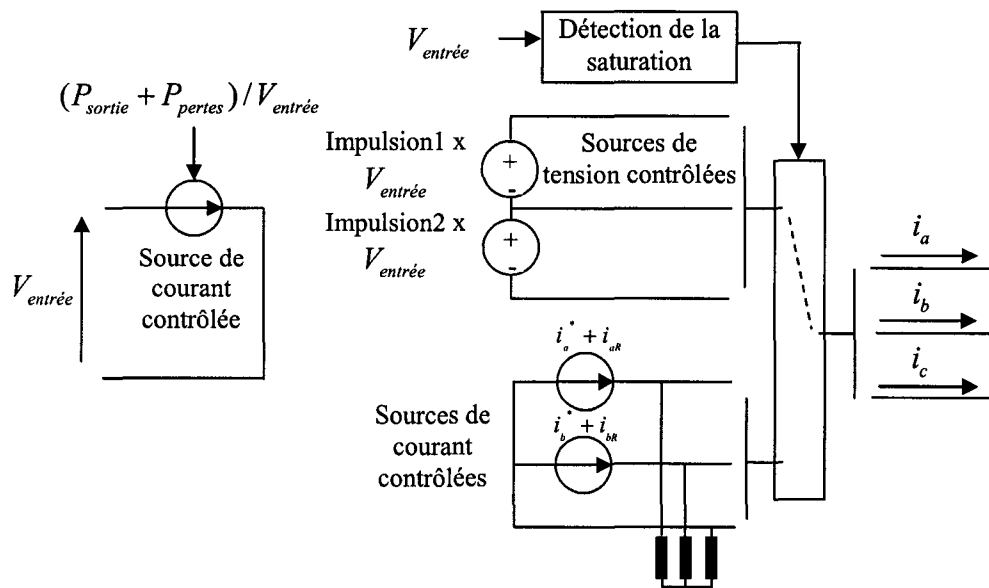


Figure 38 Onduleur triphasé

Du côté CA, il existe deux possibilités. L'onduleur peut fonctionner en mode saturé ou non. Dans le cas du fonctionnement normal, trois sources de courant correspondant aux courants moyens appliqués au stator de la machine synchrone sont utilisées. Une charge résistive est utilisée pour chaque phase uniquement afin d'éviter des oscillations numériques lors de la simulation. La valeur de la résistance doit alors être au minimum 2.5% de la puissance nominale de la machine et dépend du pas de calcul utilisé lors de la simulation. Pour corriger l'effet de la charge, des courants sont ajoutés aux sources de courant. Les courants appliqués au stator correspondent aux courants statoriques de la commande. L'onduleur utilise uniquement les références i_a^* et i_b^* . Le courant au stator i_c^* est obtenu d'après l'équation suivante :

$$i_c^* = -i_a^* - i_b^* \quad (4.10)$$

L'onduleur peut également fonctionner en mode saturé. Ce mode est utilisé lorsque la tension du bus CC n'est plus suffisante face à la tension interne de la machine synchrone et le courant demandé ne peut être fourni. Alors, deux sources de tension sont utilisées.

4.3.1.3 Contrôleur

Pour l'entraînement du moteur, une régulation de vitesse est choisie. Le schéma bloc du régulateur est décrit à la figure 39. Le régulateur de vitesse compare en entrée la vitesse du moteur mesurée à une vitesse de référence. La commande de vitesse est basée sur un régulateur de type PI. La sortie du régulateur est une référence de couple qui est ensuite appliquée à la commande vectorielle. Cette référence de couple est déterminée à partir du traitement proportionnel et intégral de l'erreur entre la référence de vitesse et la vitesse réelle de la machine synchrone.

Les rampes de vitesse appliquées à la référence de vitesse permettent de limiter les pentes d'un signal de type échelon, afin de réduire l'effort de commande lors d'un changement de référence. Deux saturations sont présentes dans la commande de vitesse. L'intégrateur possède une première saturation pour éviter que sa valeur de sortie ne soit trop élevée lorsque l'erreur ne peut être corrigée. La deuxième saturation appliquée à la sortie de la deuxième sommation permet d'éviter une référence de couple trop élevée.

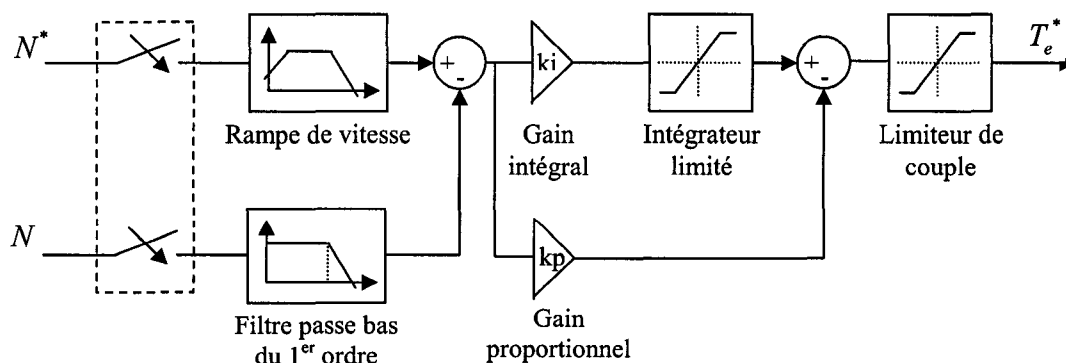


Figure 39 Régulateur de vitesse

4.3.1.4 Commande vectorielle

Le schéma bloc de la commande vectorielle est présenté à la figure 40. La commande vectorielle permet de calculer les courants de référence qui sont ensuite fournis à l'onduleur à partir du couple de référence provenant du contrôleur et de la position angulaire du rotor de la machine synchrone θ_r . Les courants i_{abc}^* sont obtenus en effectuant une transformée inverse de Park. Cette transformée convertit les deux composantes de courant orthogonales i_d^* et i_q^* vers le référentiel abc . L'équation de la transformée inverse de Park est la suivante :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) & 1 \\ \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \\ i_0^* \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

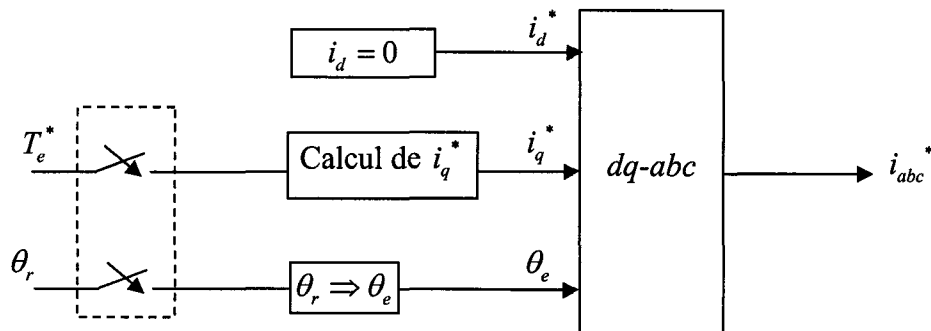


Figure 40 Commande vectorielle

Pour effectuer cette transformation, la position angulaire du flux rotorique est déterminée par l'équation 4.13 qui est obtenue par la relation entre la position angulaire mécanique du rotor et le nombre de paires de pôles de la machine. La référence pour la

composante directe des courants statoriques est égale à zéro ($i_d^* = 0$). Cette composante est nulle afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire (la puissance réactive créée et les pertes associées sont donc nulles). De plus les inductances sur les axes q et d étant égales ($L_d = L_q$), la composante i_d n'affecte pas le calcul du couple électromagnétique (équation 4.6). La composante i_q^* est obtenue par l'équation 4.12.

$$i_q^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{T_e^*}{\lambda} \quad (4.12)$$

$$\theta_e = p \cdot \theta_r \quad (4.13)$$

4.3.2 La génératrice et son entraînement électrique

Il s'agit d'une MSAP utilisée en mode génératrice principalement. Le MSAP est alors entraîné par le moteur à combustion et fournit une puissance au moteur électrique. Cependant pendant un très court instant (quelques dixièmes de seconde), lors du démarrage, la machine se comporte en fonctionnement moteur qui correspond au comportement d'un alterno-démarrreur. Ces résultats sont montrés dans le chapitre suivant. Le fonctionnement de l'entraînement est donc similaire à celui du moteur électrique. Une régulation de vitesse y est également effectuée. Les modèles de l'onduleur, de la commande vectorielle et du contrôleur sont parfaitement similaires à ceux de l'entraînement électrique du moteur.

4.3.2.1 Paramètres de la génératrice

L'entraînement électrique de la génératrice est le même que celui utilisé pour le moteur électrique (AC6). Les paramètres du moteur et de son entraînement ont donc été modifiés pour une machine de 30 kW. Sa vitesse nominale est de 3000 r/min.

Tableau IV

Paramètres de la génératrice (modèle série)

Distribution du flux	Sinusoïdale
Entrée, Sortie	Vitesse (rad/s), Couple (Nm)
Résistance statorique	0.005 Ω
Inductance sur l'axe q	0.3 mH
Inductance sur l'axe d	0.3 mH
Flux induit des aimants	0.192 Wb
Inertie	0.25 kg.m ²
Coefficient de friction	0.005 Nm.s
Nombre de paires de pôles	4

De la même manière que pour le moteur électrique, les valeurs des paramètres de la génératrice ont été estimées en s'inspirant des jeux de paramètres proposés dans la librairie des entraînements électriques SPS. Ces paramètres ne proviennent donc pas de la littérature ou de données des constructeurs.

4.3.2.2 Régulateur de vitesse

Une régulation de vitesse est également effectuée. La consigne est la vitesse de référence. Cette vitesse d'entrée correspond à la vitesse que l'on désire imposer au

moteur à combustion. Le fonctionnement de ce régulateur est identique à celui du moteur électrique (partie 4.3.1.3 et figure 39).

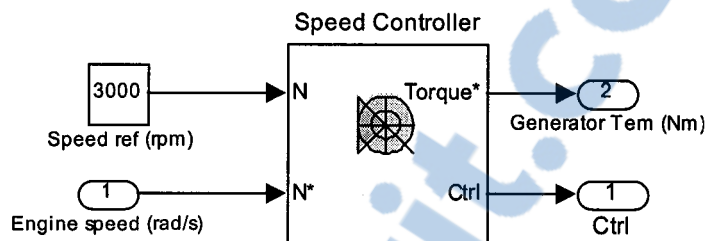


Figure 41 Détermination de la référence de vitesse

4.3.3 Le circuit d'alimentation haute tension

Le circuit d'alimentation haute tension permet d'élever la tension de la batterie pour alimenter la MSAP et son entraînement électrique à 500 V. Comme il a été vu dans le chapitre 3, le fait d'élever la tension permet d'utiliser un moteur de plus grande puissance sans augmenter les pertes Joule dans le circuit électrique.

Le circuit d'alimentation haute tension est composé d'un convertisseur CC/CC et d'un régulateur de type PI permettant de maintenir la tension du bus constante à 500 V (figure 42). Le régulateur calcule le rapport cyclique de chaque interrupteur de puissance.

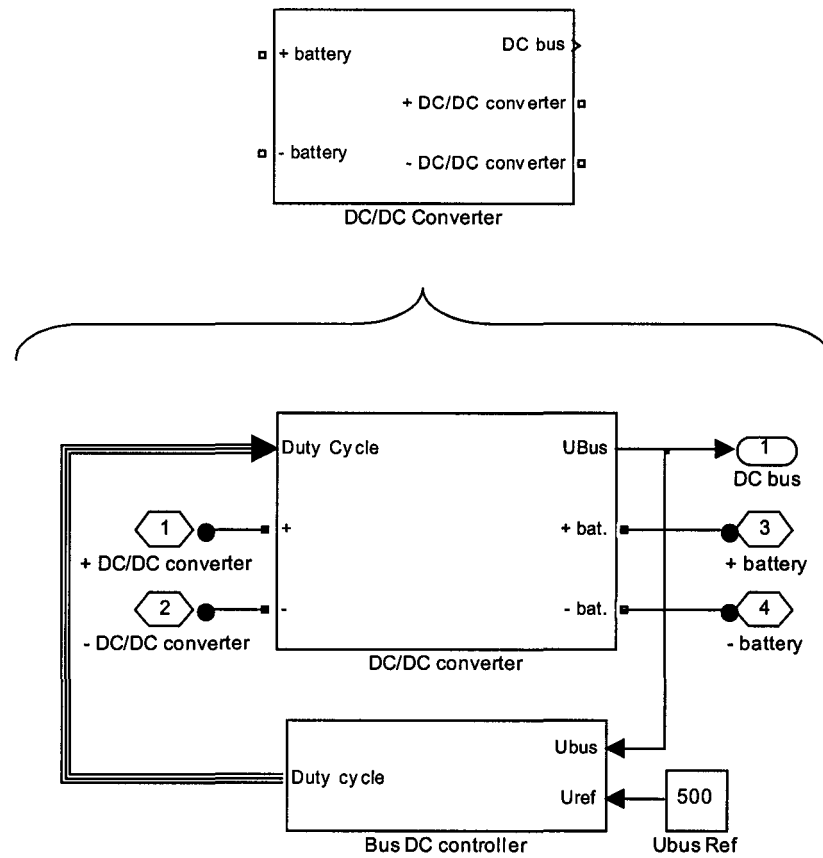


Figure 42 Circuit Simulink d'alimentation haute puissance

4.3.3.1 Le convertisseur CC/CC

Le convertisseur statique CC/CC, ou hacheur, permet de fournir à partir d'une source de tension fixe une source de tension de valeur moyenne réglable. La tension d'entrée du convertisseur CC/CC est la tension de la batterie (202 V). La tension de sortie est une tension régulée de 500 V. Le schéma de principe de base du convertisseur est représenté à la figure 43.

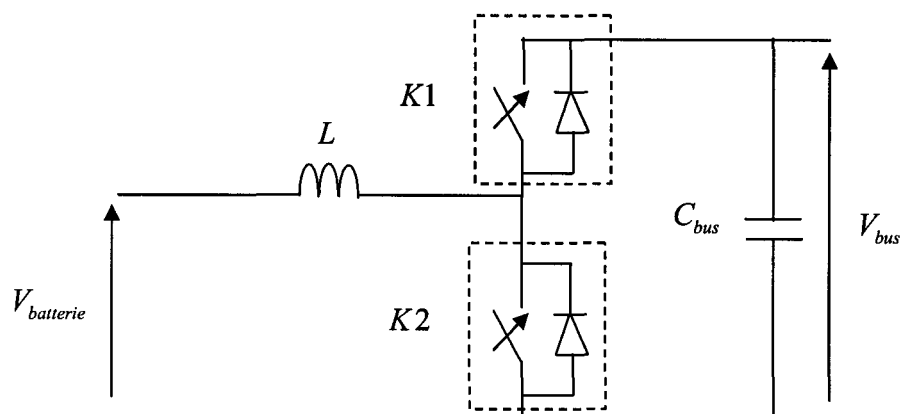


Figure 43 Schéma de principe d'un convertisseur CC/CC

Le convertisseur CC/CC est un convertisseur bidirectionnel. En effet, le courant traversant ce système peut circuler dans les deux sens selon le mode de fonctionnement du véhicule. Dans le cas où la batterie fournit de l'énergie, le courant circule de la batterie vers le moteur électrique. Dans ce cas la tension est élevée de 202V à 500V. Le courant circule en sens inverse si le moteur fournit de l'énergie à la batterie, tel le cas du freinage régénératif. La tension est alors abaissée de 500V à 202V.

Le principe de fonctionnement est le suivant. Si l'interrupteur K1 est fermé et l'interrupteur K2 est ouvert, la tension de sortie est égale à la tension d'entrée moins la tension aux bornes de l'inductance ($V_{batterie} = V_{bus} + V_L$). Le condensateur C_{bus} reçoit de l'énergie de la part de la batterie et de l'inductance L . Le courant circule donc dans l'étage supérieur du montage. Le circuit équivalent est une source de courant dépendant du rapport cyclique de l'interrupteur K1. Si l'interrupteur K2 est fermé et K1 est ouvert, le condensateur C_{bus} est isolé de la source. Le courant circule donc dans l'étage du bas. La batterie fournit de l'énergie à l'inductance L . Le condensateur C_{bus} se décharge par l'intermédiaire de la charge à laquelle il est connecté. Le condensateur C_{bus} est un condensateur de filtrage qui a une valeur suffisamment élevée pour que l'on puisse considérer que la tension de sortie disponible soit constante en régime permanent. Cette

valeur a été spécifiée à $C_{bus} = 35\mu F$ et trouvée par la méthode essai erreur. Le circuit équivalent est une source de tension dépendant du rapport cyclique de K2.

Afin de simplifier le modèle en réduisant les discontinuités à traiter dans les signaux, les interrupteurs K1 et K2 ont été remplacés par un modèle équivalent utilisant une source de tension commandée pour représenter l'interrupteur K2 et une source de courant commandée pour l'interrupteur K1. Le schéma équivalent est représenté par la figure 44.

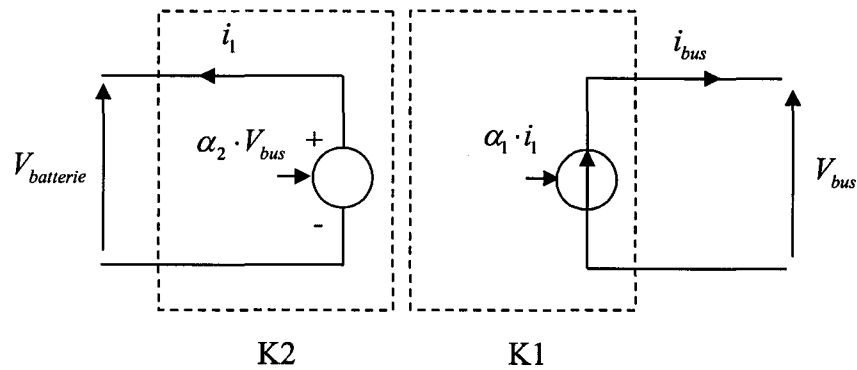


Figure 44 Schéma équivalent des interrupteurs K1 et K2

Ainsi la source de tension est commandée par l'équation (4.14) et la source de courant est commandée par l'équation (4.15).

$$V_{batterie} = \alpha_2 \cdot V_{bus} \quad (4.14)$$

$$I_{bus} = \alpha_1 \cdot i_1 \quad (4.15)$$

Les rapports entre la tension de la batterie, la tension du bus CC et les rapports cycliques des interrupteurs K1 et K2 sont donnés par les équations (4.16) et (4.17).

$$\frac{V_{bus}}{V_{batterie}} = \frac{1}{1 - \alpha_1} \quad (4.16)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (4.17)$$

4.3.3.2 Le régulateur de tension du bus CC

Le régulateur de tension du bus CC permet de maintenir la tension du bus CC constante indépendamment de la charge connectée en sortie du régulateur et quelque soit le sens du courant le traversant. L'objectif du régulateur est de fournir les rapports cycliques de la source de courant et de la source de tension modélisant les interrupteurs K1 et K2. La commande des rapports cycliques α_1 et α_2 est basée sur un régulateur de type PI. Les rapports cycliques sont ensuite déterminés (figure 45).

La référence E_c est déterminée par un traitement proportionnel et intégral de l'erreur entre la référence de tension du bus et la tension réelle du bus mesurée aux bornes du condensateur C_{bus} . Le système de régulation du bus CC comprend deux saturations. L'intégrateur possède une première saturation pour éviter que sa valeur de sortie ne soit trop élevée lorsque l'erreur mesurée ne peut pas être corrigée. La deuxième saturation permet de limiter la valeur de la consigne entre 1 et -1.

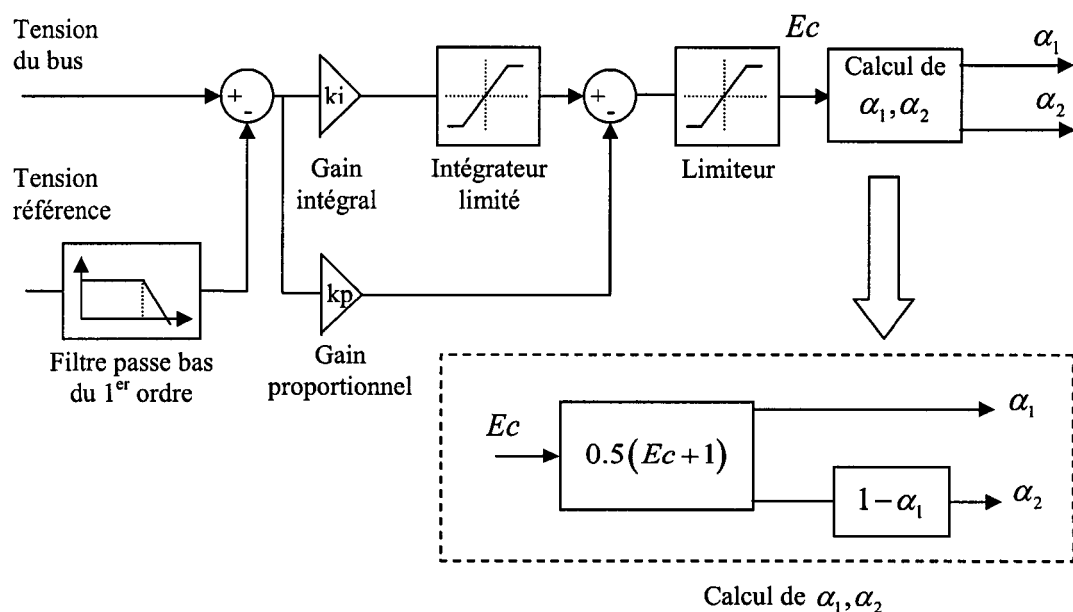


Figure 45 Régulateur du bus CC

De cette consigne sont donc déterminés les rapports cycliques de α_1 et α_2 . Le rapport cyclique α_1 est déterminé par l'équation (4.18) et α_2 par l'équation (4.19).

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}(Ec + 1) \quad (4.18)$$

$$\alpha_2 = (1 - \alpha_1) \quad (4.19)$$

Les valeurs de α_1 et α_2 ainsi obtenues permettent de commander la source de tension et la source de courant modélisant les interrupteurs K1 et K2. La figure 46 montre la tension du bus CC, sa référence et les valeurs des rapports cycliques α_1 et α_2 .

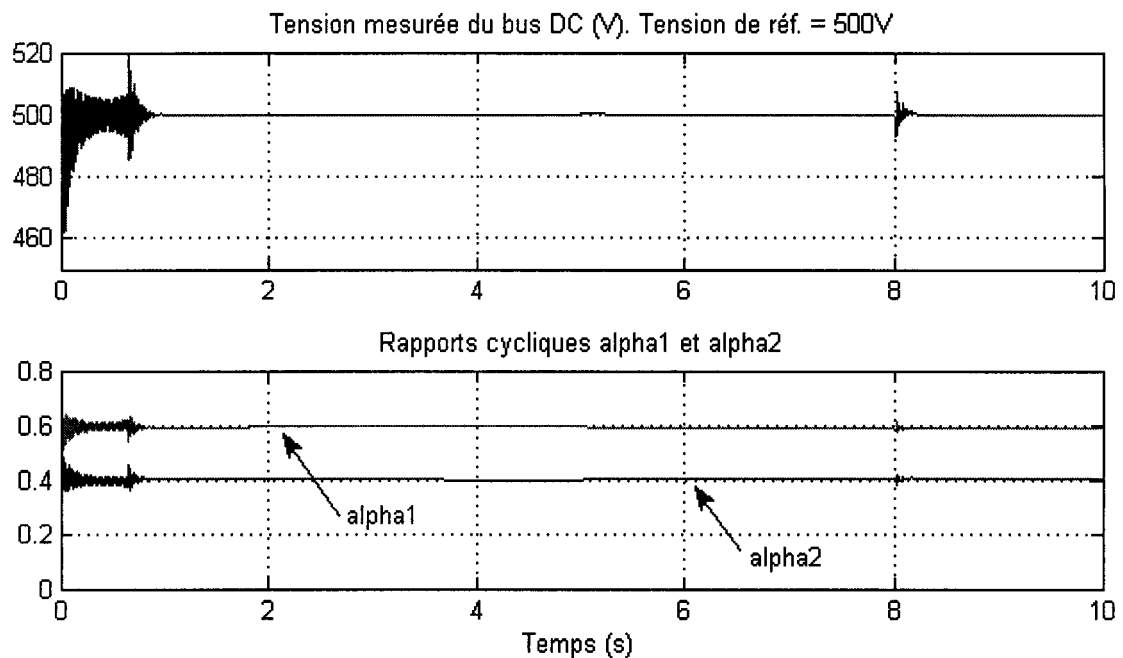


Figure 46 Tension du bus CC et valeurs des rapports cycliques α_1 et α_2 .

La figure montre la régulation de tension effectuée pour le bus CC et les valeurs des rapports cycliques α_1 et α_2 . On peut observer que la tension du bus CC se stabilise rapidement en 0.8 s. La tension est alors constante et égale à la tension de référence de

500 V. La valeur de α_1 se stabilise à 0.6 et la valeur de α_2 se stabilise à 0.4. Les oscillations en début de simulation sont dues à la forte puissance transisant dans le convertisseur (de l'ordre de 50-60 kW) rendant la tension du bus difficile à réguler sur cette intervalle. Ainsi les équations (4.18) et (4.19) sont validées. À $t = 8$ secondes, une légère perturbation apparaît. Ceci est dû au fait que le courant traversant le convertisseur CC/CC a changé de sens (passage du mode traction de la voiture au mode freinage) provoquant de faibles oscillations. Ainsi les tests montrent la robustesse du régulateur indépendamment du sens du courant le traversant.

4.3.3.3 Le modèle de batterie

Le modèle de batterie utilisé est un modèle idéal. En effet il s'agit simplement d'une source de tension idéale de 202 V en série avec une résistance de 0.01Ω . La puissance maximale que peut fournir ou emmagasiner la batterie est donc infinie. En réalité cette puissance devrait être de 20 kW. La figure 47 représente la batterie électrique et son modèle idéal sous SPS.

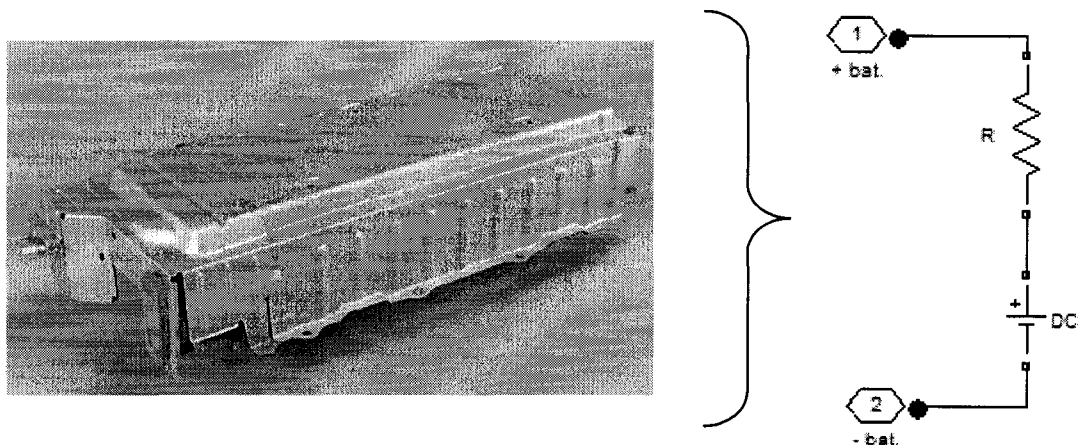


Figure 47 La batterie électrique et son modèle idéal sous SPS

4.4 Le système mécanique

Le système mécanique est composé du moteur à combustion interne ou MCI, de la boîte de vitesses, d'un différentiel, de la modélisation de la dynamique longitudinale du véhicule ainsi que de la modélisation du contact des roues avec le sol. Le rôle du système mécanique est de produire un couple par l'intermédiaire du moteur à combustion pour entraîner la génératrice, puis de transmettre le couple de sortie du moteur électrique aux roues avant. Les différents éléments sont présentés à la figure 48. Tous ces éléments ont fait l'objet d'une modélisation avec le module SimDriveline. Ce module proposant déjà de nombreux blocs pour chacun des éléments, l'étude en fut grandement facilitée.

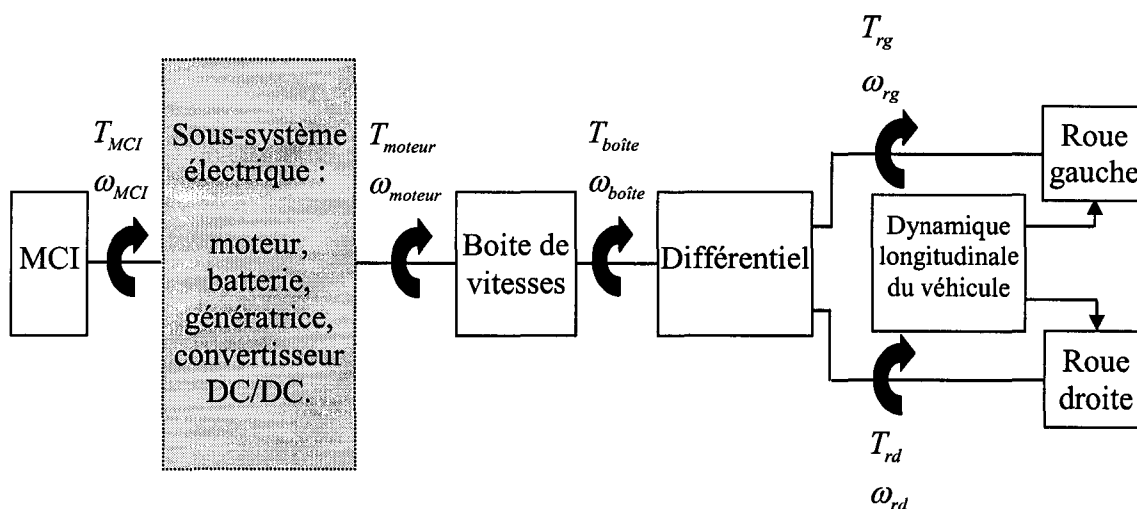


Figure 48 Le système mécanique

Le système de transmission du couple aux roues ne tient pas compte des pertes par frottement contenues dans la boîte de vitesses ou dans le différentiel. L'utilisation d'un modèle de boîte de vitesses tenant compte de ces pertes suivant différents paramètres est possible sous SimDriveline. D'autres blocs permettant de modéliser des éléments dynamiques peuvent également être utilisés. Les seules pertes du système de

transmission sont les pertes aérodynamiques associées au modèle de la dynamique longitudinale du véhicule.

4.4.1 Le moteur à combustion interne

Le moteur à combustion interne ou MCI, dans l'architecture hybride série, permet d'entraîner une génératrice. Cette dernière produit la puissance électrique alimentant le moteur. Le bloc SimDriveline du MCI contient une seule entrée qui est la consigne de couple du moteur et qui correspond à la position de la pédale d'accélérateur du véhicule. En sortie, un vecteur contenant le couple et la vitesse du moteur est disponible. Ce bloc est une modélisation très simple n'incluant pas la dynamique de la combustion et ne faisant pas apparaître de frottement ainsi que les pertes associées. Les paramètres spécifiés du moteur sont ceux correspondants au moteur de la Toyota Prius.

Tableau V

Paramètres du moteur à combustion interne

Puissance maximale	57000 W
Vitesse à la puissance max.	5000 r/min
Vitesse maximale	6000 r/min

La caractéristique puissance-vitesse ($P = f(\omega)$) et la caractéristique couple-vitesse ($T = f(\omega)$) sont représentées sur la figure suivante.

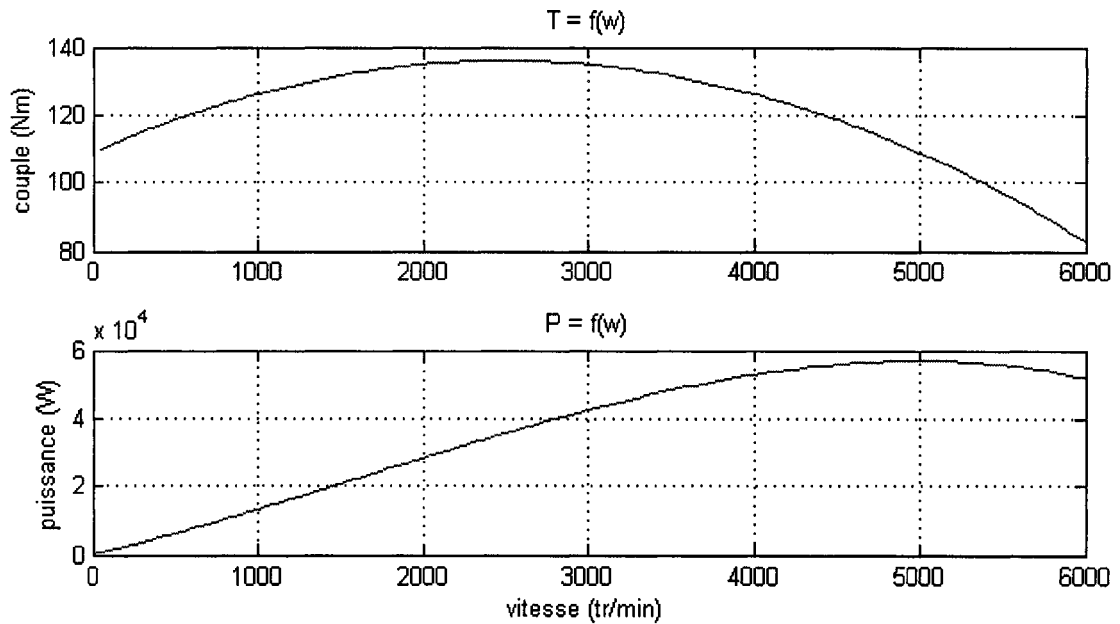


Figure 49 Caractéristiques $P = f(\omega)$ et $T = f(\omega)$ du MCI

4.4.2 La boîte de vitesses

En sortie de l'arbre du moteur électrique, un couple est disponible (figure 48). Ce couple est transmis aux roues par l'intermédiaire de plusieurs éléments mécaniques. Le premier est la boîte de vitesses. Celle de la Toyota Prius à transmission variable (CVT), dont le rapport de transmission est imposé par un système hydraulique qui change le diamètre des poulies. Cependant, dû à la complexité du système, le système modélisé est celui d'un réducteur de vitesse ayant un rapport de transmission fixe (figure 50).

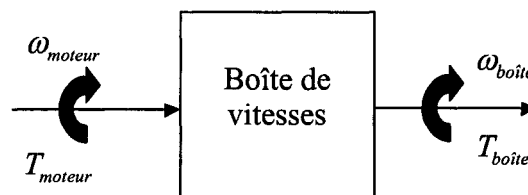


Figure 50 Boîte de vitesses

Ce rapport a été fixé à 5 de façon à obtenir une vitesse en sortie et un couple permettant l'étude des différents modes de fonctionnement. Les axes d'entrée et de sortie tournent dans la même direction. Aucune perte par frottement n'est prise en compte. Les équations des couples et des vitesses sont les suivantes :

$$\omega_{\text{moteur}} = 5 \cdot \omega_{\text{boîte}} \quad (4.20)$$

$$T_{\text{moteur}} = \frac{T_{\text{boîte}}}{5} \quad (4.21)$$

$$\omega_{\text{moteur}} \cdot T_{\text{moteur}} = \omega_{\text{boîte}} \cdot T_{\text{boîte}} \quad (4.22)$$

La figure suivante montre sur un cycle de 10 s les vitesses et les couples en entrée et en sortie de la boîte de vitesses qui confirment les équations (4.20) et (4.21).

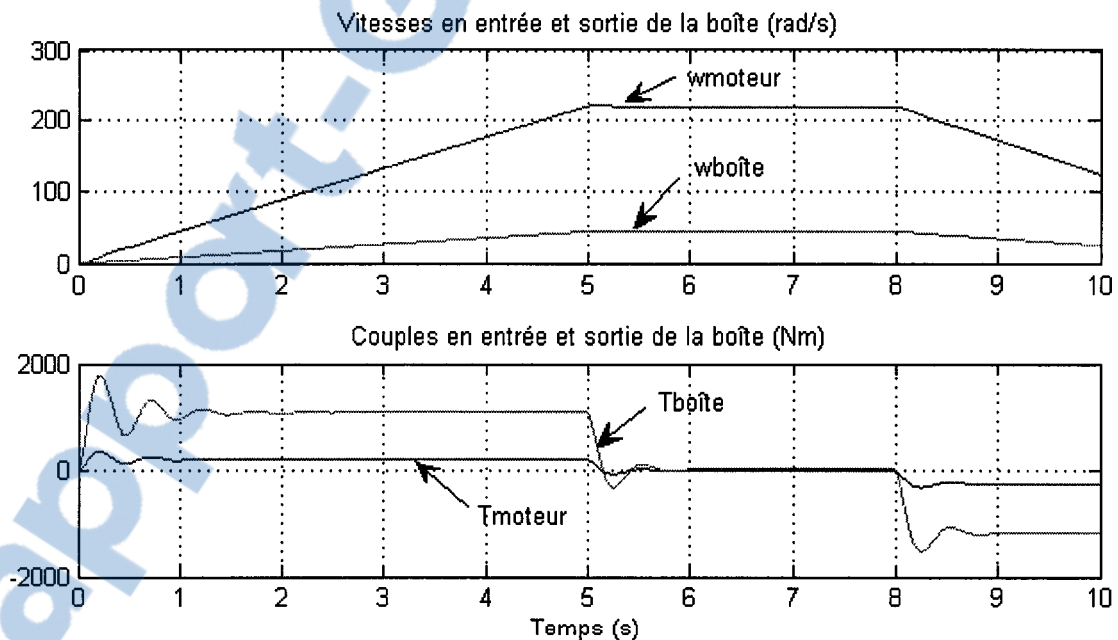


Figure 51 Couples et vitesses en entrée et sortie de la boîte

Sur tout le cycle de simulation les équations (4.20) et (4.21) sont vérifiées. Le couple est positif sur l'intervalle $0s < t < 5s$ approximativement, ce qui correspond à une

accélération du véhicule. Le couple est ensuite maintenu constant et pratiquement nul ($T_{boîte} = 21 \text{ Nm}$ environ) entre $t = 5 \text{ s}$ et $t = 8 \text{ s}$, correspondant à une vitesse constante du véhicule. Enfin, lors du freinage de ce dernier ($t > 8 \text{ s}$), le couple est négatif.

4.4.3 Le différentiel

Le second élément mécanique pour transmettre le couple aux roues est le différentiel. Cet élément relie l'arbre de transmission aux roues, permettant à chacune des roues de tourner à une vitesse différente l'une par rapport à l'autre. En ligne droite, les roues tournent à la même vitesse. Cependant dans un virage, afin d'éviter qu'une roue glisse sur le sol et les efforts de torsion sur les arbres, un dispositif différentiel est nécessaire.

Dans le cadre de ce rapport, on considérera que le véhicule roule toujours en ligne droite. Cependant, ce dispositif est important afin de répartir le couple équitablement et ce pour une même vitesse à chacune des roues (figure 52).

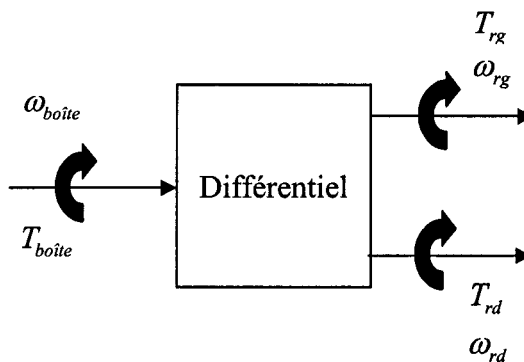


Figure 52 Différentiel

Comme pour la boîte de vitesses, aucune perte par frottement n'est prise en compte. Le modèle est supposé idéal. Les équations du système sont les suivantes :

$$\omega_{boite} = \omega_{rg} = \omega_d \quad (4.23)$$

$$T_{boite} = T_{rg} + T_{rd} \quad (4.24)$$

$$\omega_{boite} \cdot T_{boite} = \omega_{rg} \cdot T_{rg} + \omega_{rd} \cdot T_{rd} \quad (4.25)$$

La figure suivante montre, sur un cycle de 10 s, les vitesses et les couples en entrée et en sortie du différentiel qui confirment les équations (4.23) et (4.24). Les vitesses en entrée et en sortie sont exactement les mêmes. Les couples en sortie sont identiques et sont équivalents à la moitié du couple d'entrée.

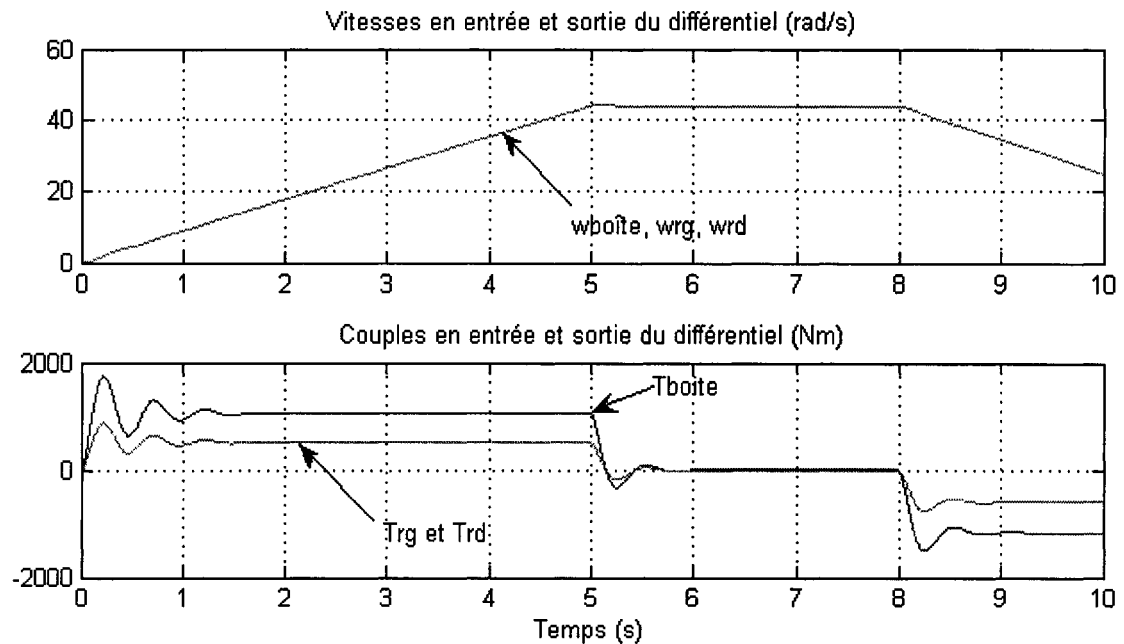


Figure 53 Couples et vitesses en entrée et sortie du différentiel

4.4.4 La dynamique longitudinale du véhicule

SimDriveline, par l'entremise d'un bloc spécialement dédié, permet de représenter la dynamique longitudinale (horizontale) du véhicule. Cette dynamique est fonction de

plusieurs paramètres tels que la masse du véhicule, sa cinématique et sa géométrie. Les paramètres à spécifier sont ceux de la Toyota Prius (tableau VI).

De ces paramètres, le bloc permet de déterminer les forces longitudinales F_{xf} et F_{xr} appliquées aux points de contact des roues avant et arrière. La vitesse de déplacement V_x est également déterminée, tout comme les forces verticales appliquées au point de contact avec le sol des roues avant (F_{zf}) et l'axe des roues arrière (F_{zr}). Ces différentes valeurs dépendent également de la pente de la route β comme le montre la figure 54.

Tableau VI

Paramètres du modèle de la dynamique du véhicule

Masse du véhicule	1325 kg
Distance entre le centre de gravité et l'axe des roues avant	1.35 m
Distance entre le centre de gravité et l'axe des roues arrière	1.35 m
Centre de gravité (CG)	0.5 m
Surface frontale	2.57 m ²
Coefficient aérodynamique	0.26
Vitesse initiale	0 m/s

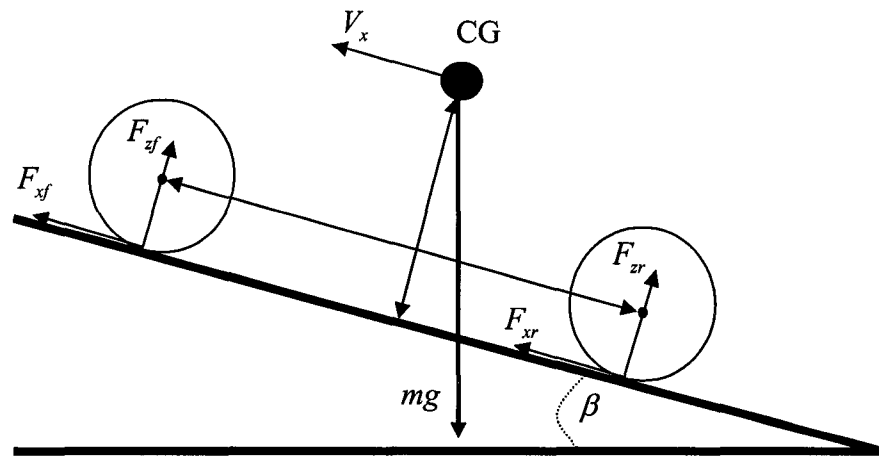


Figure 54 Dynamique du véhicule¹⁸

4.4.5 Le contact des roues avant au sol

Le dernier élément est la modélisation des roues avant sur lesquelles le couple provenant du différentiel est appliqué et leur contact avec le sol. Un phénomène de glissement intervient entre le contact de la roue au sol. Un bloc SimDriveline permet de rendre compte de ce phénomène.

Du modèle de la dynamique longitudinale du véhicule, on connaît la force verticale appliquée au point de contact de la roue avec le sol et la vitesse du véhicule. Le bloc SimDriveline permet alors de déterminer la vitesse angulaire de la roue et sa force longitudinale.

Différents paramètres tels que le rayon de la roue, le facteur de glissement, la charge verticale évaluée et sa charge horizontale et la longueur de relaxation du pneu doivent être spécifiés (tableau VII).

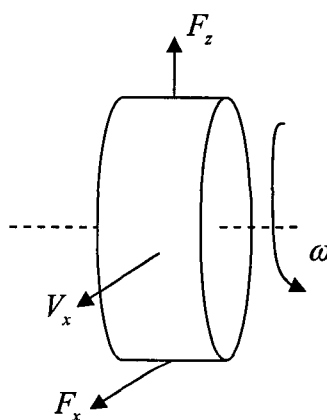
¹⁸ Ce graphique a été tiré et adapté de la documentation de SimDriveline [15].

Tableau VII

Paramètres de la dynamique de la roue

Rayon de la roue	0.3 m
Charge verticale évaluée	3000 N
Charge horizontale maximale à la charge verticale évaluée	3500 N
Facteur de glissement	10 %
Longueur de relaxation à la charge verticale évaluée	0.2 m

Les forces latérales exercées sur le pneumatique ainsi que celles exercées dans les virages ne sont pas prises en compte. À vitesse constante, le pneu agit comme un amortisseur alors qu'en freinage, il agit à la manière d'un ressort circulaire déformable.

Figure 55 Modèle de la roue¹⁹

¹⁹ Ce graphique a été tiré et adapté de la documentation de SimDriveline [15].

4.5 Conclusion

Ce chapitre a décrit le modèle série dans son ensemble. Ce système est composé d'une partie commande simple réalisée par des éléments Simulink, d'une partie mécanique incorporant des éléments SimDriveline et enfin d'une partie électrique réalisée principalement par des éléments SimPowerSystems.

La partie commande fournit le profil de vitesse du véhicule qui est également la consigne de vitesse du moteur électrique ainsi que la consigne de vitesse de la génératrice. Elle fournit enfin la consigne de couple du moteur à combustion (position de la pédale d'accélérateur).

Le sous-système électrique, composé du moteur électrique, de la génératrice, du convertisseur CC/CC et de la batterie, permet de délivrer une puissance suffisante afin de respecter la consigne de vitesse du véhicule. Cette puissance provient du moteur électrique alimenté par la batterie et/ou de la génératrice par l'intermédiaire du MCI. Les interrupteurs de puissance utilisés dans le système électrique ont été remplacés par des sources de tension ou de courant commandées, permettant d'utiliser un pas de calcul plus élevé ($T_s = 60\mu s$).

Enfin, la partie mécanique regroupant le moteur à combustion et le système de transmission permet de fournir un couple mécanique à la génératrice tournant à une vitesse constante, et permet de transmettre le couple en sortie du moteur électrique aux roues.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS DE SIMULATION DU MODÈLE SÉRIE

5.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de montrer les résultats obtenus avec le modèle série décrit dans le chapitre précédent. Le modèle est testé sur un cycle de 10 secondes pendant lequel tous les modes de fonctionnement sont couverts, à savoir le démarrage, la conduite normale, le cas d'une forte accélération, le freinage, la recharge de la batterie. Les résultats montrés pour chacun de ces modes mettent en évidence les transferts de puissance entre les différents sous-systèmes et particulièrement entre la batterie, la génératrice et le moteur électrique.

5.2 Définition des références des moteurs

Dans le chapitre précédent, il a été vu que la partie commande doit fournir les consignes de vitesse du moteur électrique et de la génératrice ainsi que la commande de couple du moteur à combustion.

La consigne de couple du MCI est définie comme une constante égale à 0.7 en mode traction, ce qui peut se traduire par le fait que la pédale d'accélérateur est enfoncée à 70% de sa valeur maximale. Elle est ensuite égale à 0 pendant le freinage du véhicule ($5s < t < 8s$) ce qui cette fois se traduit par l'extinction du MCI. La consigne de vitesse de la génératrice est, elle aussi, définie constante, et égale à 3000 r/min. La figure ci-après représente le profil de vitesse qui sert de référence au moteur électrique. Il s'agit d'une accélération constante pendant 5 secondes de 0 à 2100 r/min puis d'une vitesse constante égale à 2100 r/min pendant 3 secondes et enfin d'un freinage ou décélération pendant 2 secondes. Ce profil permet ainsi de couvrir tous les modes de fonctionnement

du véhicule. La vitesse atteinte par le véhicule est de l'ordre de 45-50 km/h sur l'intervalle $5s < t < 8s$.

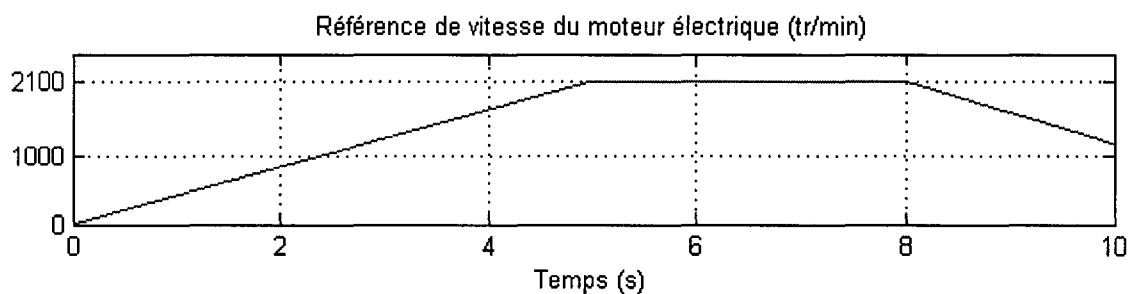


Figure 56 Référence de vitesse du moteur électrique

La simulation a été effectuée en utilisant un pas de calcul de $60\mu s$ ($T_s = 60\mu s$).

5.3 Résultats généraux

Avant d'analyser les signaux obtenus, pour chacun des modes de fonctionnement, cette partie présente les résultats généraux du système, à savoir le profil de vitesse obtenu du véhicule et du moteur électrique ainsi que le bilan des principaux flux de puissance.

5.3.1 Bilan des vitesses

L'un des résultats importants consiste en la vitesse linéaire du véhicule. L'arbre du moteur électrique étant directement connecté ou engrené sur l'arbre du système de transmission (connecté à la boîte de vitesses), le profil de vitesse obtenu du véhicule est lié à celui du moteur électrique (figure 57). On peut constater que la vitesse du moteur électrique est parfaitement régulée puisque parfaitement superposée à la référence. Le véhicule atteint la vitesse maximale de 47 km/h environ à $t = 5s$.

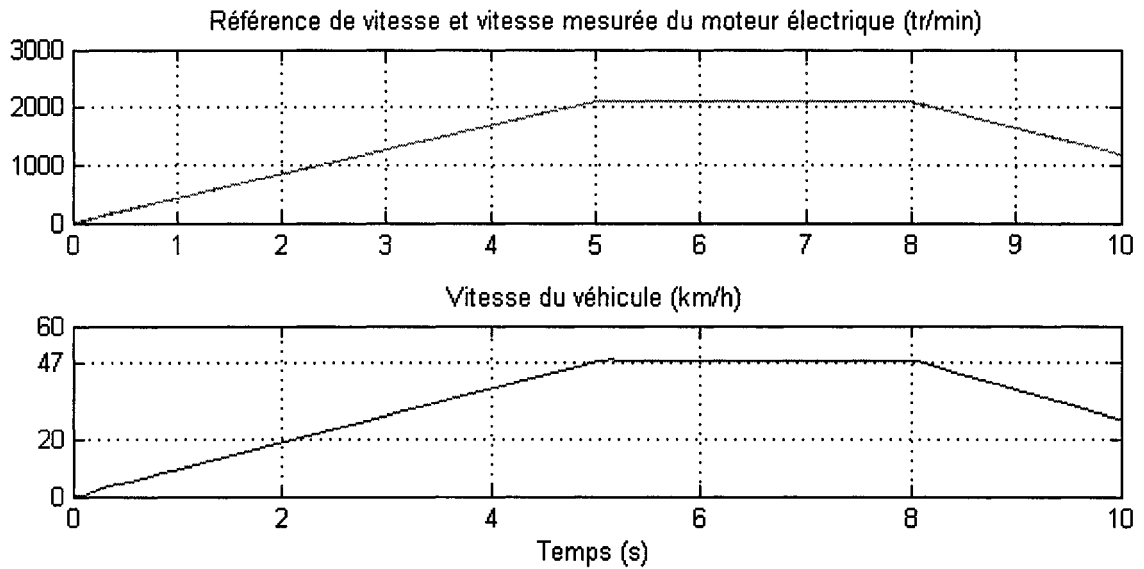


Figure 57 Profils de vitesse obtenus du moteur électrique et du véhicule

5.3.2 Bilan des puissances

Pour chacun des modes de fonctionnement, le bilan des puissances des différents organes du système doit être respecté. Ce bilan doit donc valider l'équation (4.2) du chapitre précédent durant toute la simulation. Cette équation stipule que la puissance en entrée du moteur électrique est égale à celle délivrée par la génératrice plus celle fournie à la batterie.

La figure suivante montre ces différentes puissances. On peut se rendre compte dans la dernière partie de la figure que, sur tout le cycle de simulation, la puissance du moteur électrique est l'addition des deux autres puissances. Les courbes se superposant parfaitement, l'équation (4.2) est alors vérifiée.

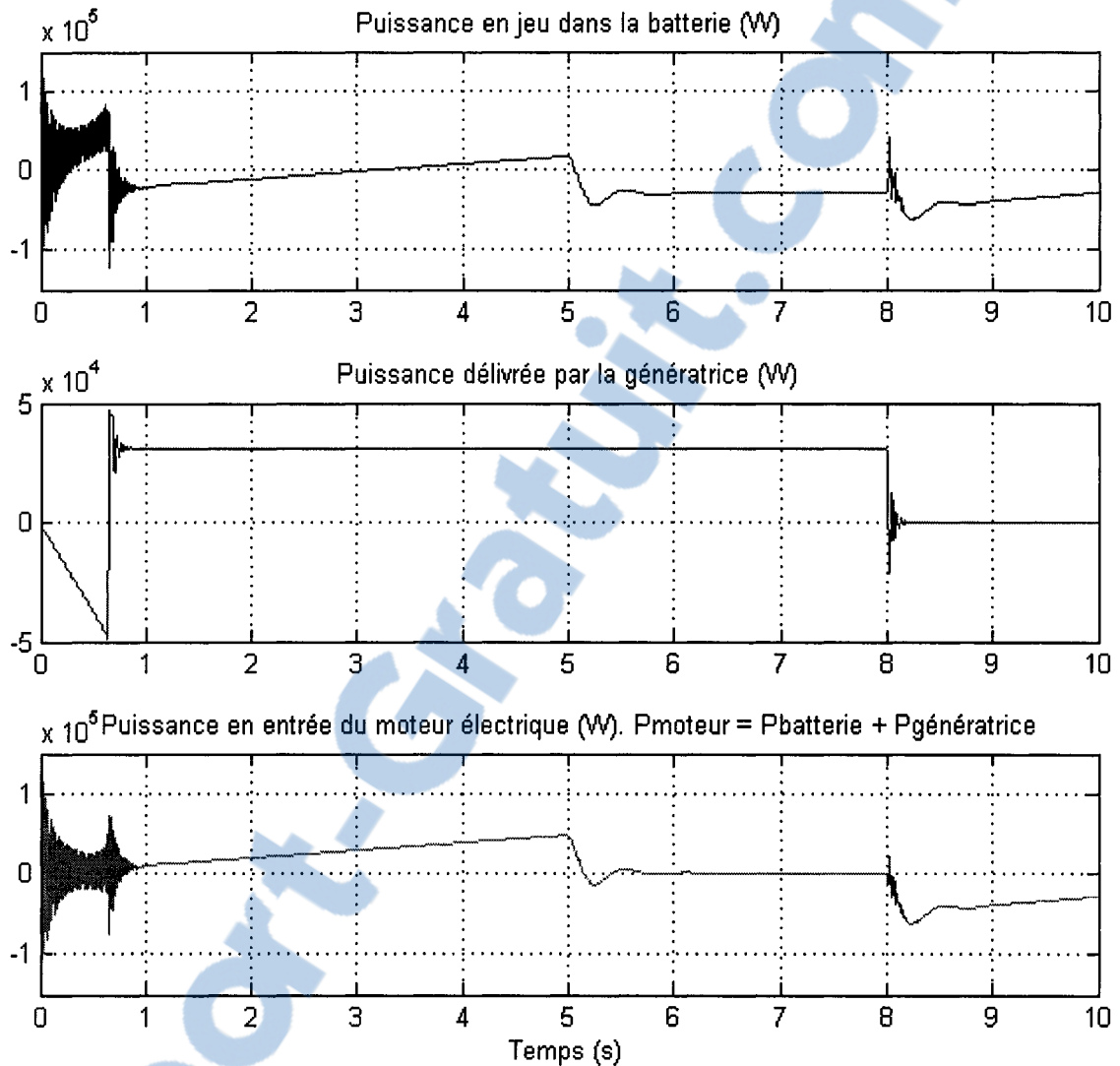


Figure 58 Bilan de puissance du système électrique

La figure 59 montre les puissances en entrée et en sortie du moteur électrique ainsi que les pertes engendrées dans le modèle de ce dernier. Ces pertes sont dues aux frictions des éléments mécaniques tournants ainsi qu'aux résistances internes incluses dans le modèle. Ces pertes sont plus importantes lors de l'accélération ($0\text{ s} < t < 5\text{ s}$) et lors du freinage (à partir de $t = 8\text{ s}$) où le courant circulant dans le moteur est plus élevé. Des pertes pour les mêmes motifs sont également présentes dans le modèle de la génératrice.

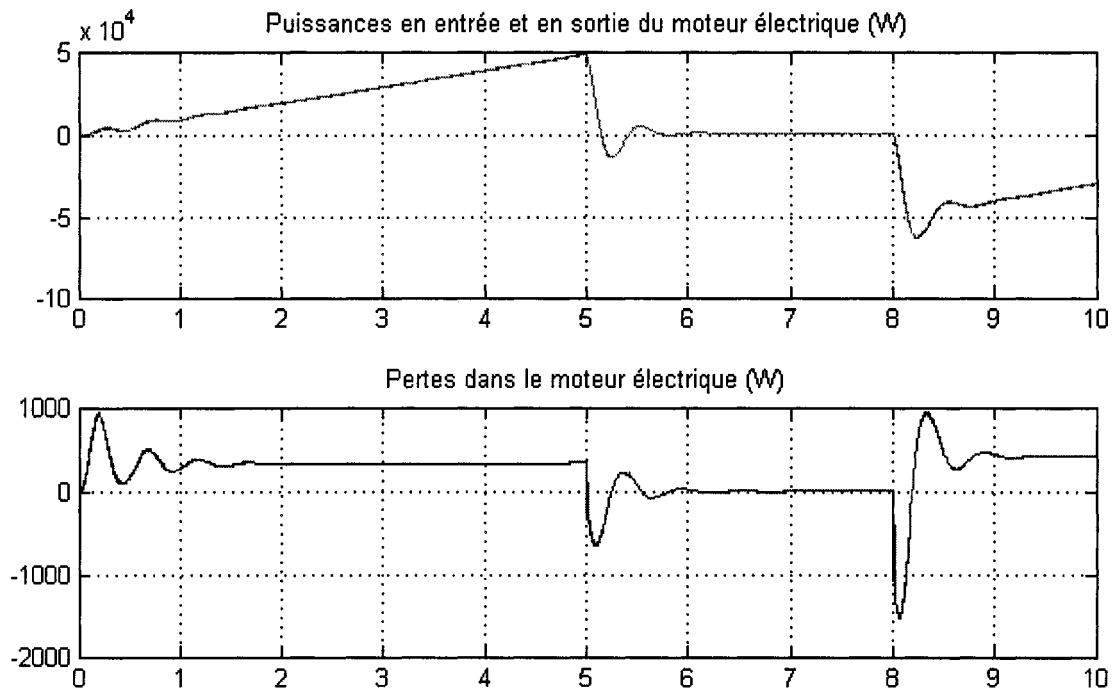


Figure 59 Bilan de puissance du moteur électrique

5.4 Analyse des différents modes de fonctionnement

Les résultats généraux ayant été présentés, le comportement des différents systèmes pour chacun des modes de fonctionnement du véhicule est étudié. L'analyse porte principalement sur les écoulements de puissance entre la batterie, le moteur électrique et la génératrice qui sont les organes principaux.

5.4.1 Démarrage, basses et moyennes vitesses

Le premier mode de fonctionnement rencontré est celui du mode démarrage, basses et moyennes vitesses entre $t = 0$ s et $t = 0.65$ s environ.

Durant cette période, le véhicule est mû uniquement par le couple lié à la puissance délivrée par la batterie, la génératrice adoptant un comportement moteur qui entraîne le

moteur à combustion. Ce comportement peut être assimilé à celui de l'alternateur d'un véhicule conventionnel. Dans ce cas, un moteur électrique entraîne le moteur à combustion afin de le démarrer (il y a compression alors) et peut aussi fournir de l'énergie électrique à la batterie en mode génératrice.

Sur la figure suivante, on remarque que la vitesse de référence de la génératrice est très élevée. Pour pouvoir suivre cette référence, le moteur électrique doit développer un couple positif et constant égal à 150 Nm. Ce couple est limité par la saturation du couple de sortie du contrôleur (effort de commande maximal). La vitesse de la génératrice ne peut pas, par conséquent, suivre la vitesse de référence qui elle suit une rampe d'accélération de 10000 r/min par seconde (chapitre 4.3.1.3). La génératrice fonctionne donc en régime moteur et entraîne le moteur à combustion (et son inertie attachée de 0.5 kg/m²) qui est vu comme une charge.

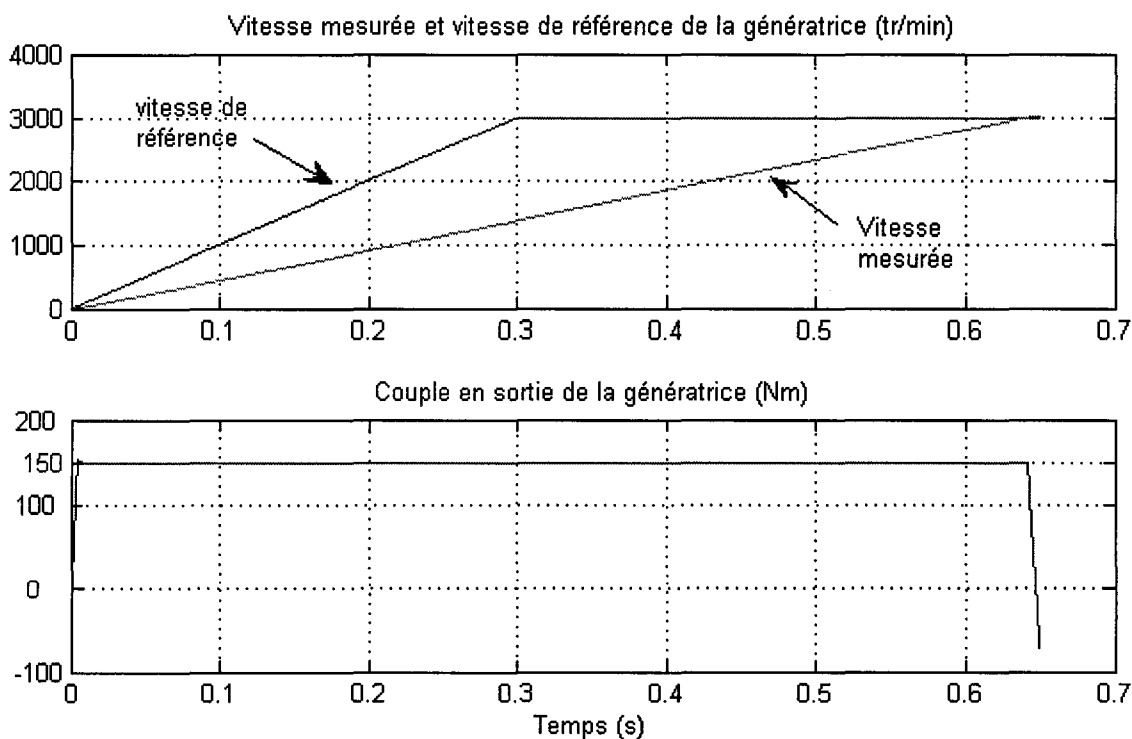


Figure 60 Vitesse et couple en sortie de la génératrice

À $t = 0.65$ s, la vitesse de référence de la génératrice est atteinte. L'effort de consigne (la consigne de couple) diminue brusquement (figure 60). Ce couple fourni par la génératrice est en même temps un couple de charge pour le MCI. C'est pourquoi ce dernier adopte le comportement d'un moteur en mode compression (couple négatif et vitesse positive) et sa puissance mécanique est négative. Lorsque l'effort de consigne de la génératrice est négatif (couple négatif), cette dernière est entraînée par le MCI et peut fournir une puissance électrique au reste du système.

La génératrice fonctionne en mode moteur et est alimentée par la batterie. Cette dernière fournit également la puissance nécessaire au moteur électrique pour satisfaire la consigne de vitesse appliquée à ce dernier. Le bilan des puissances s'écrit :

$$P_{batterie} = P_{inmoteur} - P_{générateur} \quad (5.1)$$

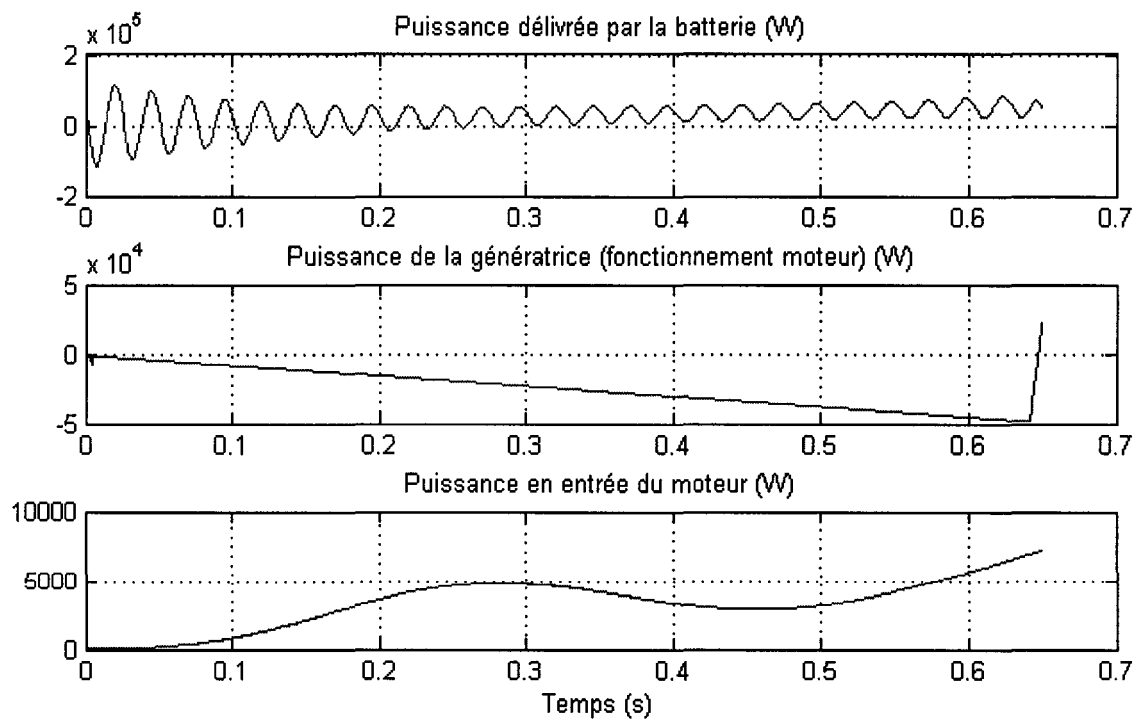


Figure 61 Bilan de puissance au démarrage, basses et moyennes vitesses

La puissance de la génératrice est négative, puisqu'elle fonctionne en mode moteur. La figure ci-dessus montre ces puissances et permet de vérifier l'équation (5.1).

La puissance de la batterie oscille du fait du régime transitoire lors de la régulation de la tension du bus CC en début de simulation.

5.4.2 Recharge de la batterie

Le second mode de fonctionnement rencontré lors de cette simulation est le mode de recharge de la batterie. Dans ce cas, la génératrice fournit intégralement la puissance nécessaire au moteur électrique mais également une puissance additionnelle permettant la recharge de la batterie.

Ce mode correspond à la période entre $t = 0.7 \text{ s}$ et $t = 3.25 \text{ s}$. Sur cet intervalle, la puissance de la génératrice est positive et est égale à la puissance en entrée du moteur électrique moins la puissance délivrée à la batterie.

$$P_{\text{générateur}} = P_{\text{inmoteur}} - P_{\text{batterie}} \quad (5.2)$$

La figure suivante confirme ce bilan de puissance. On observe que la puissance délivrée à la batterie est considérée comme négative puisque cette dernière reçoit de l'énergie. La vitesse de la génératrice est égale et constante à la vitesse de référence appliquée en entrée et son couple est également constant. La puissance délivrée par la génératrice est par conséquent constante ($P_{\text{gén}} = 31 \text{ kW}$ environ). Enfin, la puissance délivrée à la batterie diminue avec le temps, puisque la puissance demandée par le moteur électrique augmente afin de satisfaire le profil de vitesse du véhicule. Les oscillations au début de l'intervalle sont dues au fait que la génératrice fournit subitement de l'énergie, provoquant ainsi ce régime transitoire.

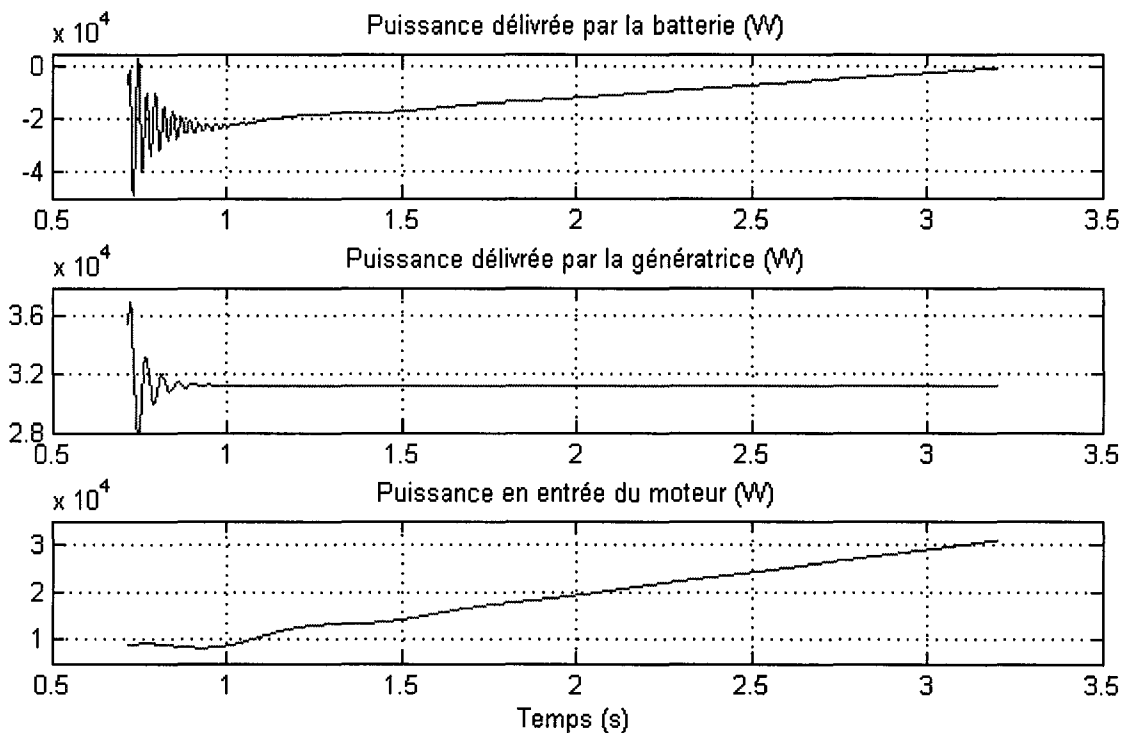


Figure 62 Bilan de puissance lors de la recharge de la batterie

5.4.3 Forte accélération

Le troisième mode de fonctionnement rencontré est celui du cas d'une forte accélération lorsque la puissance de la batterie est requise pour satisfaire le profil de vitesse du véhicule. Dans ce mode, la puissance délivrée aux roues provient de la batterie et de la génératrice alimentée par le moteur à combustion.

Ce mode est rencontré sur la période $3.25 \text{ s} < t < 5 \text{ s}$. Sur cet intervalle, la puissance de la génératrice ne suffisant plus pour satisfaire le profil de vitesse du moteur électrique, une puissance additionnelle est fournie par la batterie au moteur électrique. D'autre part, la génératrice tourne toujours à sa vitesse de référence de 3000 r/min à un couple constant de 120 Nm. Ce couple est constant car lié à la consigne de couple du MCI ($T_{MCI}^* = 0.7$). La puissance en sortie est donc constante et égale approximativement

à 31 kW. Enfin, la puissance de la batterie est cette fois positive puisqu'elle délivre de l'énergie au moteur électrique. La figure suivante permet de visualiser ces différentes puissances.

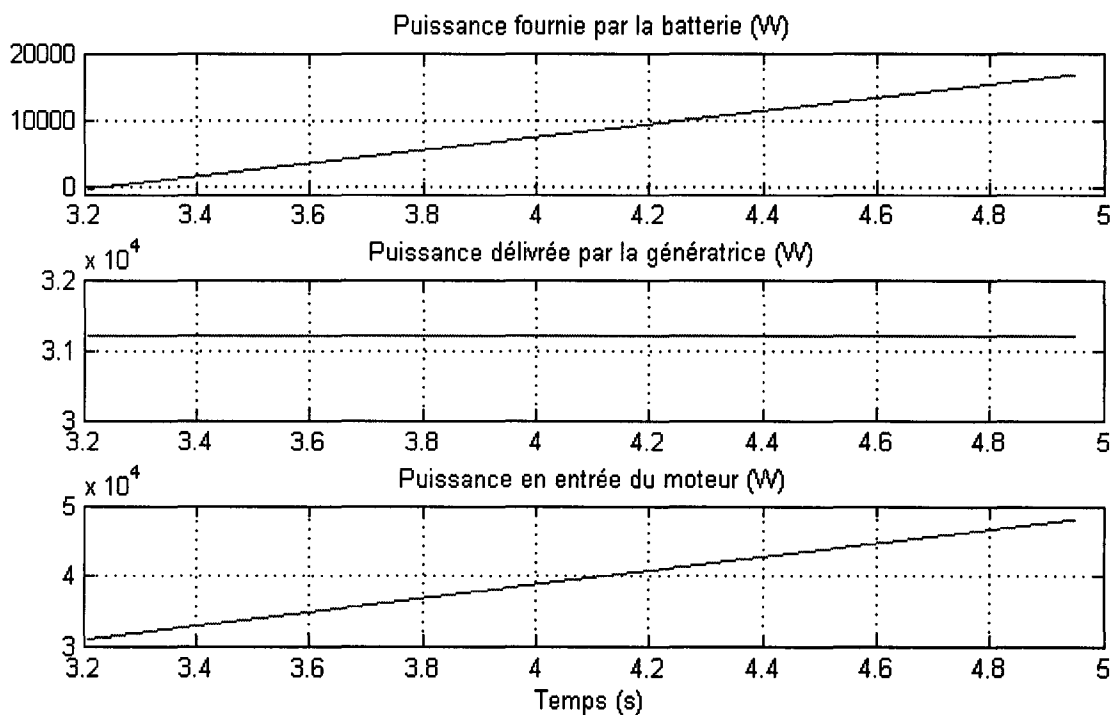


Figure 63 Bilan de puissance lors d'une forte accélération

5.4.4 Conduite normale

Lors d'une conduite normale, le véhicule est mû par le moteur électrique alimenté exclusivement par la génératrice, cette dernière étant entraînée par le MCI. Ce quatrième mode de fonctionnement est rencontré sur l'intervalle $5\text{ s} < t < 8\text{ s}$ (figure 64).

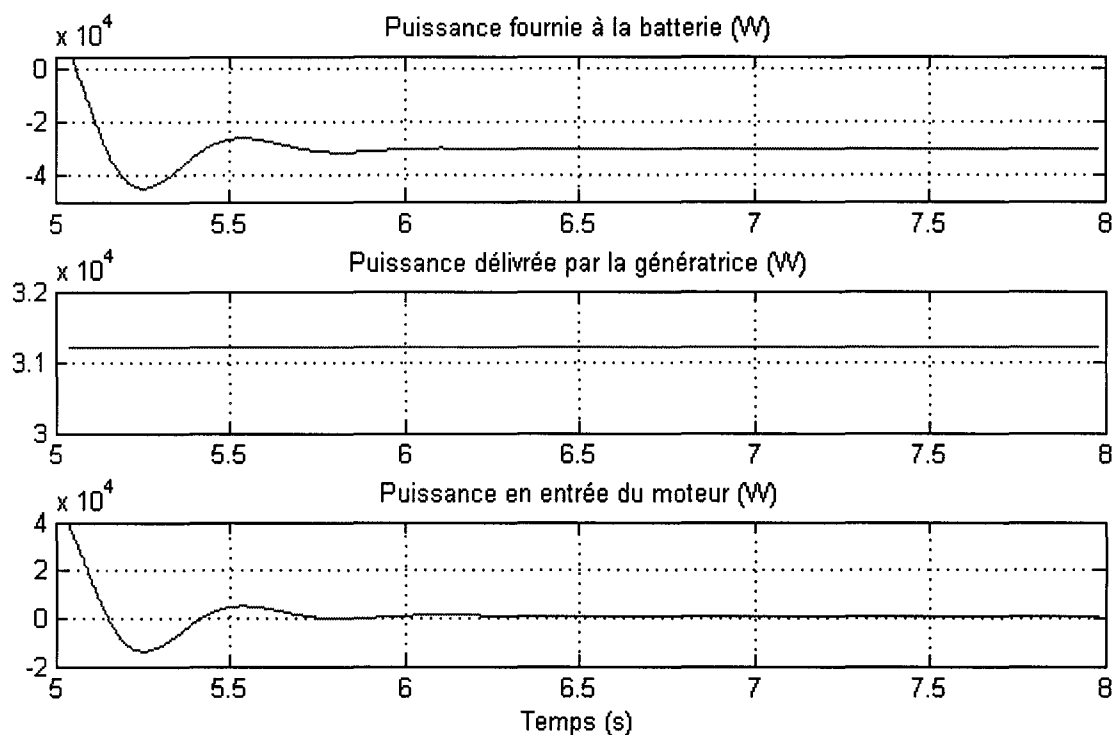


Figure 64 Bilan de puissance dans le cas d'une conduite normale

Dans cet intervalle, la vitesse du moteur électrique est maintenue constante et égale à 2100 r/min. Par conséquent la vitesse du véhicule est également constante (égale à 47 km/h). La puissance en entrée du moteur électrique est de seulement 900 W car aucune perte dans le système de transmission (boîte de vitesses, différentiel) n'est prise en compte dans le modèle. Les seules pertes sont les pertes aérodynamiques du véhicule, contenues dans le modèle de la dynamique longitudinale de ce dernier. La voiture est donc entraînée principalement par son inertie. La figure 64 montre que la puissance de la génératrice est en presque totalité transmise à la batterie, ce qui permet de recharger cette dernière.

5.4.5 Freinage

En fin de simulation ($8 s < t < 10 s$), le dernier mode de fonctionnement du véhicule rencontré est celui du freinage. Dans ce cas, l'énergie cinétique du véhicule est retournée à la batterie par l'intermédiaire du moteur électrique en fonctionnement génératrice.

Sur la figure 65, on observe que la puissance de la génératrice est nulle. La génératrice tourne à vide à sa vitesse de référence puisque le moteur à combustion est éteint (consigne de couple nulle). Ainsi aucune puissance n'est générée par la génératrice. Le moteur électrique tourne à une vitesse positive mais son couple est négatif, correspondant à un couple de freinage (figure 66). Le moteur fonctionne en mode génératrice et la puissance ainsi générée est accumulée par la batterie. Le bilan des puissances est le suivant :

$$P_{\text{inmoteur}} = P_{\text{batterie}} \quad (5.3)$$

La puissance P_{inmoteur} correspond à la puissance générée par le moteur électrique.

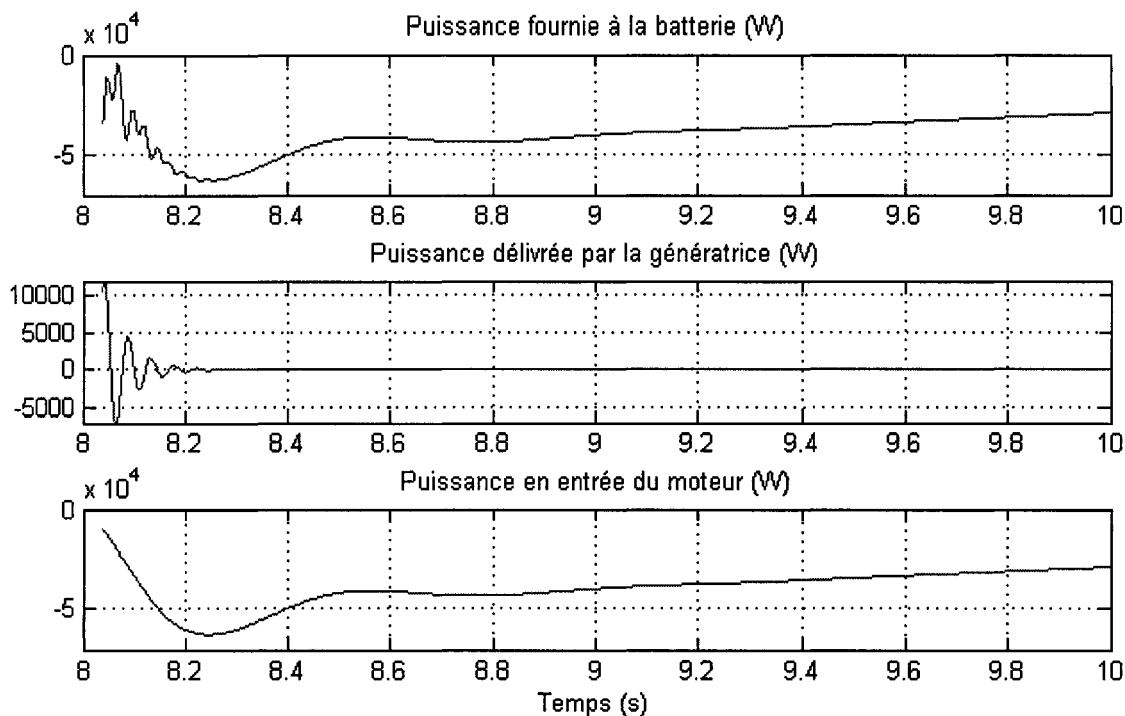


Figure 65 Bilan de puissance lors du freinage

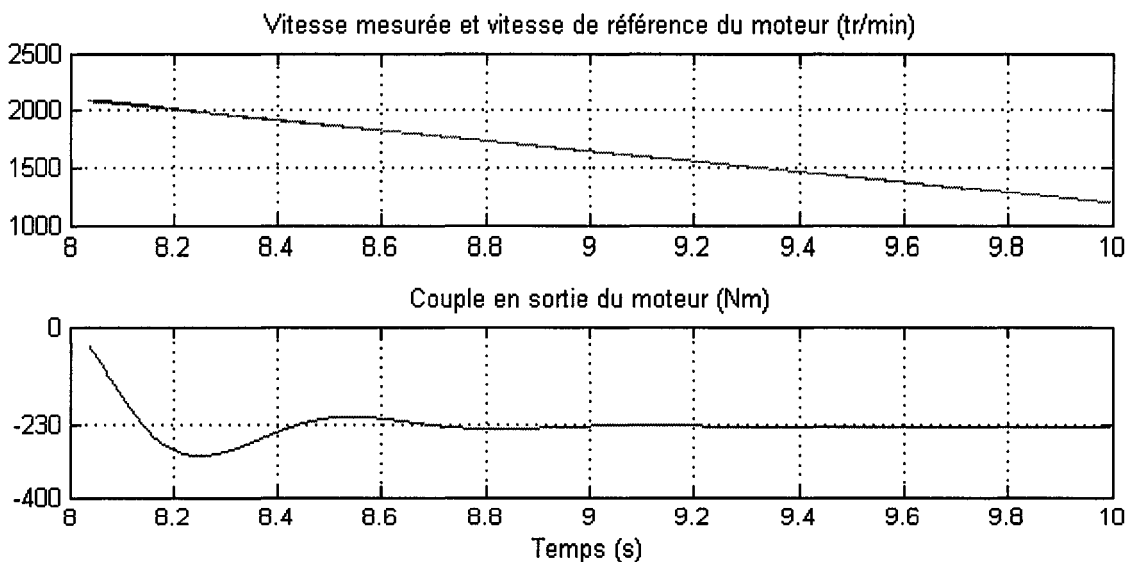


Figure 66 Vitesse et couple du moteur électrique

5.5 Temps de simulation

Les analyses des signaux ayant été effectuées, on s'intéresse maintenant aux temps de simulation. La simulation d'un cycle de 10 s du modèle série a été effectuée en 35 secondes. On peut donc dire que la simulation de ce système multi-domaines complet en utilisant un pas de calcul de $60\mu s$ ($T_s = 60\mu s$), est relativement bon. Ce résultat est dû notamment à la méthode d'analyse du module SimDriveline dont les éléments ne peuvent tourner qu'autour d'un seul axe, ce qui allège considérablement les calculs comparativement au module SimMechanics utilisé dans le modèle de la bobineuse du chapitre 2. Ces temps de simulation sont limités par le pas de calcul utilisé et défini par la modélisation des entraînements électriques sous SimPowerSystems.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une simulation sur une période de 10 secondes permettant de couvrir les différents modes de fonctionnement a été effectuée. Les résultats ont montré que le comportement du système hybride série était respecté et notamment que les écoulements de puissance entre chacun des différents sous-systèmes étaient conformes aux prévisions selon le mode de fonctionnement parcouru.

Les temps de simulation, en utilisant un pas de calcul de $60\mu s$, se sont avérés relativement bons compte tenu de la complexité du modèle. SimDriveline étant un module dédié et optimisé pour les systèmes d'entraînement mécanique et de transmission, il s'agit des éléments du module SimPowerSystems qui allonge ces temps de simulation par l'utilisation d'un pas de calcul de $60\mu s$. La simulation du sous-système électrique a pourtant été optimisée afin d'augmenter ce pas de calcul au maximum en utilisant des modèles d'entraînements électriques ainsi qu'un convertisseur CC/CC dits à valeurs moyennes (interrupteurs remplacés par des sources de courant ou de tension).

CHAPITRE 6

DESCRIPTION DU MODÈLE SÉRIE/PARALLÈLE

6.1 Introduction

Le modèle série étudié, ce chapitre décrit maintenant le modèle série/parallèle. Cette architecture conserve tous les éléments du système précédent auquel sont ajoutés deux éléments. Le premier est un train planétaire permettant de répartir la puissance du moteur à combustion et le second est un dispositif de gestion de l'énergie permettant de faire fonctionner chaque moteur dans sa plage de haut rendement. Ce dispositif de gestion de l'énergie est la retranscription sous Matlab/Simulink de l'algorithme proposé dans l'article de B. Jeanneret, R. Trigui, F.Badin, et F.Harel [3].

Ce chapitre décrit dans un premier temps le modèle série/parallèle dans son ensemble et particulièrement les flux de puissance circulants entre les différents éléments du modèle. Ce chapitre montre également les modifications apportées au sous-système électrique, et le train planétaire ajouté au sous-système mécanique. Enfin, une analyse détaillée du système de gestion de l'énergie est effectuée.

6.2 Le modèle série/parallèle dans son ensemble

L'architecture série/parallèle basée sur celle de la Toyota Prius a précédemment été décrite dans la seconde partie du chapitre 2. Le couple transmis aux roues provient du moteur électrique et/ou du moteur à combustion. Le moteur électrique est alimenté par une batterie et/ou une génératrice entraînée par le moteur à combustion. La commande du système dans son ensemble est représentée par la figure ci-après.

De la position de la pédale d'accélérateur et de la vitesse angulaire de la roue, le sous-système de gestion de l'énergie détermine une consigne de vitesse pour la génératrice et deux consignes de couple pour le moteur électrique et le moteur à combustion. Ce sous-système détermine également si le véhicule doit fonctionner en mode hybride (moteur à combustion allumé) ou en mode électrique seul (véhicule mû exclusivement par le moteur électrique entraîné par la puissance de la batterie). Le train planétaire permet de répartir le couple de ce dernier à la génératrice via le pignon soleil et aux roues via la couronne. Le moteur électrique alimenté par la batterie et/ou la génératrice est relié à la couronne et transmet son couple aux roues.

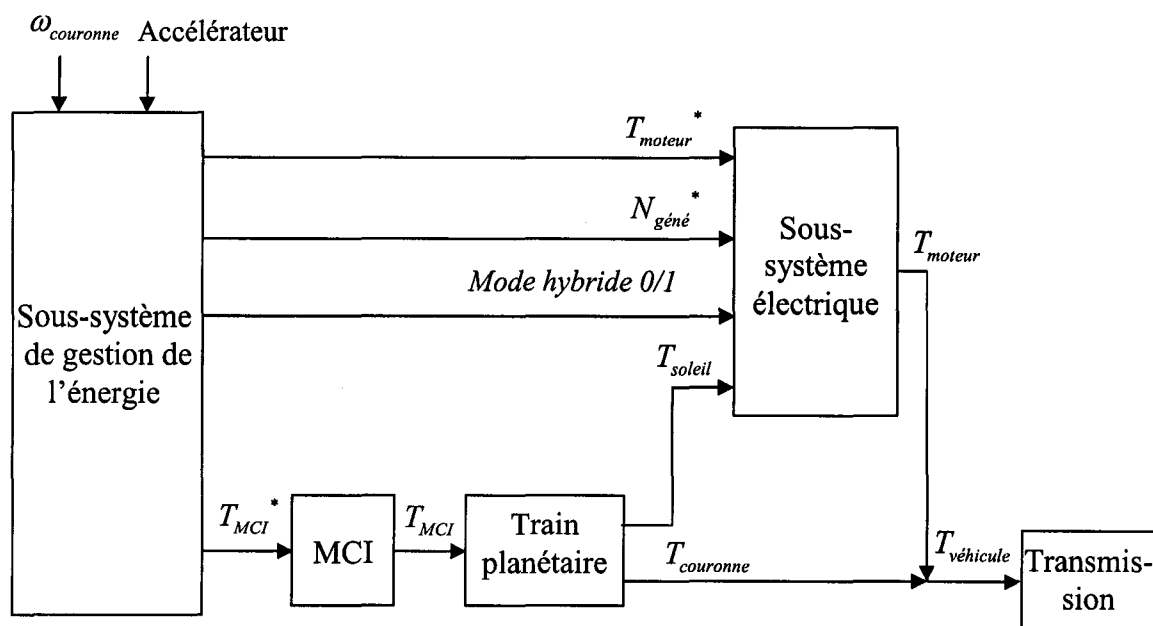


Figure 67 Vue d'ensemble du modèle série parallèle

D'un point de vue puissance (figure 68), la circulation des différents flux de puissance repose sur les équations suivantes :

$$P_{\text{porte-sat}} + P_{\text{soleil}} = P_{\text{couronne}} \quad (6.1)$$

$$P_{batterie} + P_{géné} = P_{moteur} \quad (6.2)$$

$$P_{couronne} + P_{moteur} = P_{véhicule} \quad (6.3)$$

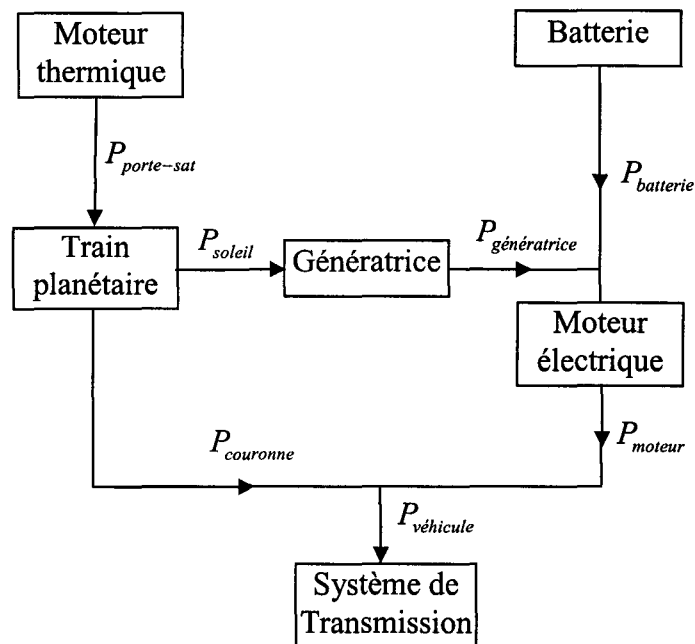


Figure 68 Flux de puissance dans le modèle série/parallèle

6.3 Le sous-système électrique

Le sous-système électrique de l'architecture hybride série/parallèle reprend les mêmes éléments que celui de l'architecture hybride série. Il est composé de deux moteurs synchrones à aimants permanents dont l'un fonctionne en mode génératrice, d'une batterie et d'un convertisseur bidirectionnel CC/CC.

Dans ce modèle, seules les caractéristiques de la génératrice sont modifiées. La génératrice du modèle série/parallèle est une génératrice de 30 kW dont la vitesse nominale est cette fois égale à 10000 r/min. Les caractéristiques correspondant à ce moteur sont les suivantes :

Tableau VIII

Paramètres de la génératrice (mode série/parallèle)

Distribution du flux	Sinusoïdale
Entrée, Sortie	Vitesse (rad/s), Couple (Nm)
Résistance statorique	0.05 Ω
Inductance sur l'axe q	635 mH
Inductance sur l'axe d	635 mH
Flux induit des aimants	0.192 Wb
Inertie	0.011 kg.m ²
Coefficient de friction	0.00047 Nm.s
Nombre de paires de pôles	1

Ces paramètres ont été estimés à partir de ceux du bloc AC6 de la librairie des entraînements électriques de SPS. Le nombre de paires de pôles a notamment été diminué afin d'obtenir une vitesse de rotation se rapprochant des spécifications demandées.

Dans le modèle série, une régulation de vitesse était effectuée pour les deux moteurs électriques. Dans le modèle série/parallèle, seule la génératrice est en régulation de vitesse. Le moteur électrique est quant à lui en régulation de couple. La référence de couple du moteur est calculée par le sous-système de gestion de l'énergie.

Sur la figure suivante, la consigne est le couple de référence dans le modèle de l'entraînement électrique. Ce couple est donc tout simplement le couple électromagnétique de référence en sortie.

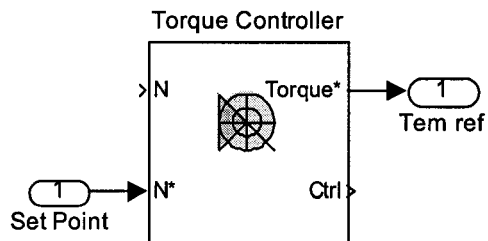


Figure 69 Référence de couple du moteur électrique

6.4 Le sous-système mécanique

Le sous-système mécanique est identique à celui du modèle série. Les caractéristiques de chaque sous-système le composant sont les mêmes. Cependant, dans l'architecture hybride série/parallèle, un dispositif pour transmettre le couple aux roues et à la génératrice est utilisé. Ce dispositif est un train planétaire épicycloïdal décrit succinctement au chapitre 3 (figure 29).

6.4.1 Train planétaire épicycloïdal : détermination des vitesses

Comme il a été vu dans le chapitre 3, le train planétaire est composé de quatre éléments :

- la couronne sur laquelle le moteur électrique est fixé;
- le porte-satellites sur lequel le moteur à combustion est connecté;
- le pignon soleil sur lequel la génératrice est connectée;
- les satellites qui sont des arbres intermédiaires supportant des roues dentées et qui assurent le lien entre le pignon soleil et la couronne.

La formule générale de Willis [22] donne la relation qui existe entre les trois vitesses angulaires en jeu à savoir :

- ω_{soleil} : la vitesse angulaire du pignon soleil (génératrice);
- $\omega_{couronne}$: la vitesse angulaire de la couronne (moteur électrique);
- $\omega_{porte-sat}$: la vitesse angulaire du porte-satellites (moteur à combustion).

$$\frac{\omega_{soleil} - \omega_{porte-sat}}{\omega_{couronne} - \omega_{porte-sat}} = K \quad (6.4)$$

K est la raison du train planétaire qui est égale à -2,6. Cette constante peut être calculée par la formule suivante :

$$K = - \frac{\text{nombre de dents de la couronne}}{\text{nombre de dents du pignon soleil}} \quad (6.5)$$

Le train planétaire étant composé de quatre éléments tournant à des vitesses différentes, il est difficile de comprendre et de visualiser les différentes possibilités de fonctionnement. Pour résoudre ces problèmes de compréhension, une méthode graphique est utilisée. Cette méthode est la méthode Ravigneaux expliquée dans le livre de Georges Henriot [22]. Elle permet de visualiser les vitesses de chacun des engrenages et ce pour différents modes de fonctionnement (figure 30).

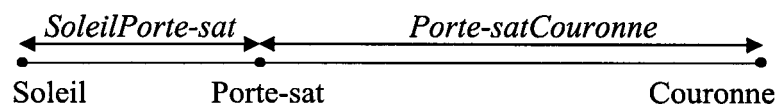


Figure 70 Clé de la méthode Ravigneaux

Cette figure montre la méthode Ravigneaux. Sur une droite sont portés les points correspondant aux éléments du train planétaire (soleil, porte-satellites et couronne). La longueur $SoleilPorte-sat$ correspond au nombre de dents du pignon soleil et la longueur $Porte-satCouronne$ correspond au nombre de dents de la couronne.

6.4.2 Train planétaire épicycloïdal : détermination des couples

Les couples appliqués aux différents organes du train planétaire sont les suivants :

- T_{soleil} : couple sur le pignon soleil de vitesse angulaire ω_{soleil} ;
- $T_{couronne}$: couple sur la couronne de vitesse angulaire $\omega_{couronne}$;
- $T_{porte-sat}$: couple sur le porte-satellites de vitesse angulaire $\omega_{porte-sat}$.

L'équation de l'équilibre des forces appliquées au train planétaire est la suivante :

$$T_{soleil} + T_{couronne} + T_{porte-sat} = 0 \quad (6.6)$$

Le couple du pignon soleil et le couple de la couronne peuvent être calculés par les équations suivantes :

$$T_{soleil} = -\frac{1}{K-1} T_{porte-sat} \quad (6.7)$$

$$T_{couronne} = \frac{K}{K-1} T_{porte-sat} \quad (6.8)$$

Selon le théorème de la conservation de l'énergie, la somme des puissances motrices et résistantes est nulle, c'est à dire :

$$T_{soleil} \cdot \omega_{soleil} + T_{couronne} \cdot \omega_{couronne} + T_{porte-sat} \cdot \omega_{porte-sat} = 0 \quad (6.9)$$

Le modèle du train planétaire dans SimDriveline ne faisant pas intervenir de pertes par frottement, cette équation ainsi que la formule de Willis [22] permettent de dresser le bilan des vitesses et des couples appliqués au train planétaire et ce pour chaque mode de fonctionnement du véhicule.

La couronne du train planétaire est l'élément connecté directement à la boîte de vitesses. Sur cet élément se trouve le couple transmis par le moteur à combustion. Le couple délivré à la boîte de vitesses ($T_{véhicule}$) est égal au couple sur la couronne ($T_{couronne}$) plus le couple du moteur électrique T_{moteur} .

$$T_{véhicule} = T_{couronne} + T_{moteur} \quad (6.10)$$

Ainsi, $T_{couronne}$ est le couple du mode parallèle, T_{moteur} , le couple du mode série et enfin $T_{véhicule}$, le couple du mode série/parallèle au complet.

6.5 Le sous-système de gestion de l'énergie

Le sous-système de gestion de l'énergie présenté ci-après correspond à l'algorithme présenté dans l'article de B. Jeanneret, R. Trigui, F.Badin, F.Harel [3] et fut retranscrit sous l'environnement Matlab/Simulink.

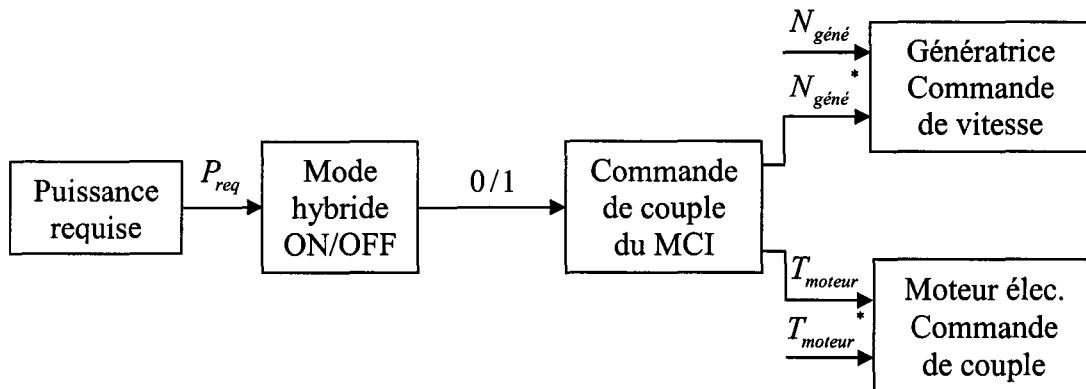


Figure 71 Algorithme général²⁰

Le sous-système de gestion de l'énergie a pour objectif de déterminer, selon la position de la pédale d'accélérateur et la vitesse du véhicule, les commandes de vitesse ou de couple des différents moteurs. Ceci vise à augmenter le rendement énergétique du véhicule. La détection du mode hybride permet de faire fonctionner le moteur à combustion ou non, selon la puissance requise par le conducteur.

6.5.1 Détermination de la puissance requise

La puissance requise par les roues est déduite de la vitesse du véhicule ainsi que la position de la pédale d'accélérateur comme le montre la figure suivante. Cette puissance est calculée de la manière suivante :

$$P_{req} = T_{req} \cdot \omega_{veh} \quad (6.11)$$

La vitesse du véhicule est exprimée en r/min, qui correspond à la vitesse de rotation de la couronne du train planétaire.

²⁰ Ce graphique a été tiré et adapté de l'article de B. Jeanneret, R. Trigui, F.Badin, F.Harel [3].

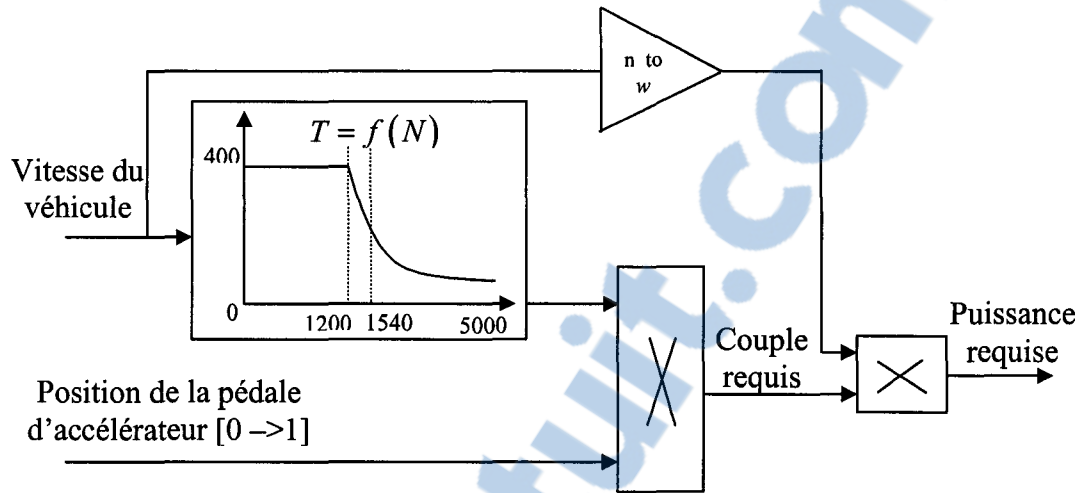


Figure 72 Détermination de la puissance requise²¹

Le couple requis provient de la caractéristique couple-vitesse $T = f(N)$ du moteur électrique. Connaissant la vitesse, le couple peut donc en être déduit. Cette caractéristique est définie par :

- un couple constant entre 0 et 1200 r/min;
- une puissance constante de 50 kW entre 1200 et 1540 r/min;
- une vitesse maximale de 5000 r/min.

Entre 1200 et 1540 r/min, la puissance du moteur est constante (50 kW). Ainsi la courbe a pour caractéristique $T(\omega) = \frac{50000}{\omega}$, qui a l'allure d'une exponentielle décroissante.

Entre 1540 et 5000 r/min, la puissance délivrée par le moteur décroît sensiblement jusqu'à 45 kW [17]. Il s'agit donc là encore de l'allure d'une exponentielle décroissante, légèrement plus marquée, qui justifie l'allure de la caractéristique $T = f(N)$.

²¹Ce graphique a été tiré et adapté de l'article de B. Jeanneret, R. Trigui, F. Badin, F. Harel [3].

6.5.2 Détermination du mode hybride

Au démarrage, le véhicule est mû exclusivement par le moteur électrique alimenté par la batterie. Si la puissance requise est supérieure à 15 kW, le moteur à combustion est allumé et fournit une puissance additionnelle. Pour éviter les oscillations au démarrage, le mode hybride ne peut être activé qu'au bout de 0.5 s. De plus ce mode est désactivé par la suite si la puissance requise est inférieure à 5 kW.

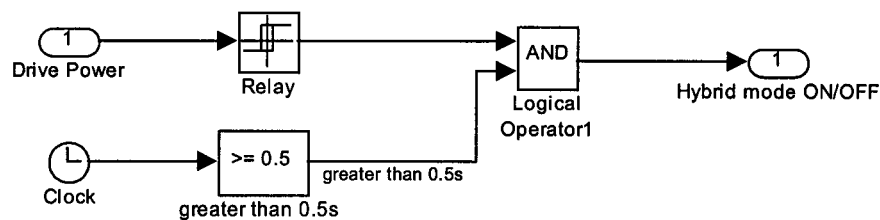


Figure 73 Détermination du mode hybride : schéma Simulink

6.5.3 Commande de couple du MCI et de vitesse de la génératrice

Une fois la puissance requise déterminée et le mode hybride activé, la commande de couple du moteur à combustion doit être calculée (T_{MCI}^*) ainsi que la consigne de vitesse de la génératrice ($\omega_{géné}^*$).

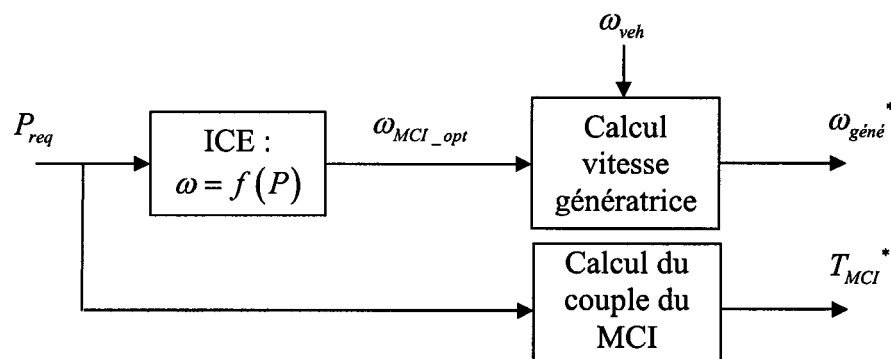


Figure 74 Commande de couple du MCI et de vitesse de la génératrice

6.5.3.1 Calcul de $\omega_{\text{gén}}^*$

La première étape consiste à calculer la vitesse optimale du moteur à combustion (ω_{MCI_opt}) connaissant la puissance requise du véhicule (P_{req}). Cette caractéristique est déterminée par le bloc SimDriveline du moteur à combustion. Elle correspond à l'équation d'un polynôme de degré 3 tel que :

$$P(\omega) = p_1 \cdot \omega + p_2 \cdot \omega^2 - p_3 \cdot \omega^3 \quad (6.12)$$

Selon la documentation du bloc SimDriveline du moteur à combustion, les termes $p_1 = p_2 = p_3 = 1$, sont choisis de façon à satisfaire les équations suivantes :

$$p_1 + p_2 - p_3 = 1 \quad (6.13)$$

$$p_1 + 2p_2 - 3p_3 = 0 \quad (6.14)$$

Ces équations permettent d'ajuster l'allure des courbes des caractéristiques puissance-vitesse et couple-vitesse du MCI. Ainsi, connaissant les valeurs de la caractéristique $P(\omega)$, pour n'importe quelle valeur de P , on peut connaître sa vitesse angulaire ω correspondante. Chaque élément (MCI, moteur électrique et génératrice) est relié au train planétaire. La vitesse de référence de la génératrice peut alors être déterminée des équations (6.7) et (6.8) faisant intervenir la raison du train planétaire (K).

$$\omega_{\text{gén}}^* = K \cdot \omega_{\text{veh}} + (1 - K) \cdot \omega_{MCI_opt} \quad (6.15)$$

Le terme $\omega_{\text{gén}}^*$ correspond à la vitesse angulaire du pignon soleil (ω_{soleil}), ω_{veh} à la vitesse angulaire de la couronne (ω_{couronne}), et le terme ω_{MCI_opt} correspond à la vitesse

angulaire du porte-satellites ($\omega_{porte-sat}$). L'équation du bilan des vitesses du train planétaire (4.30) est vérifiée.

6.5.3.2 Calcul de T_{MCI}^*

La commande de couple T_{MCI}^* du moteur à combustion est le ratio de la puissance maximale de ce dernier (P_{MCI_max}) par rapport à la puissance requise du véhicule (P_{req}). La puissance maximale étant de 57 kW.

$$0 \leq T_{MCI}^* = \frac{P_{req}}{P_{MCI_max}} \leq 1 \quad (6.16)$$

6.5.4 Commande de couple du moteur électrique T_{moteur}^*

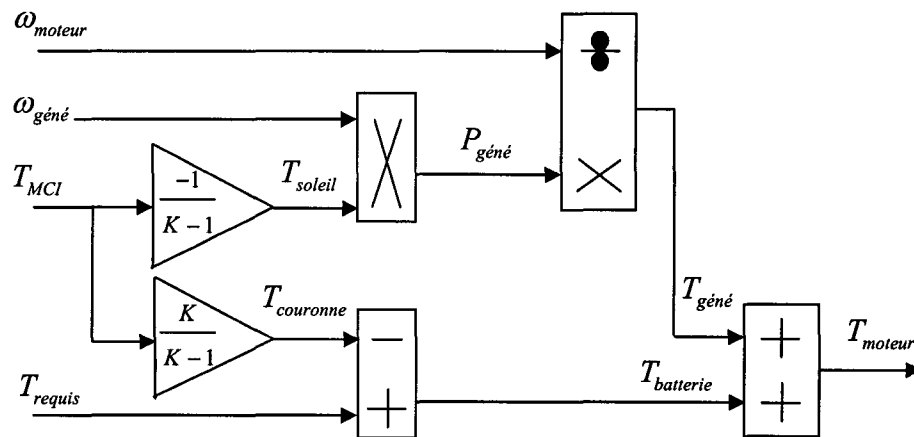


Figure 75 Commande de couple du moteur électrique²²

²² Ce graphique a été tiré et adapté de l'article de B. Jeanneret, R. Trigui, F.Badin, F.Harel [3].

Les équations (6.7) et (6.8) associées au train planétaire permettent dans un premier temps de déterminer les couples transmis à la génératrice par le pignon soleil ($T_{géné}$) et directement au système de transmission par l'intermédiaire de la couronne ($T_{couronne}$) connaissant le couple du moteur à combustion (couple du porte-satellites ou T_{MCI}). Le couple de référence du moteur électrique (T_{moteur}^*) est égal au couple résultant de la puissance fournie par la génératrice $T_{géné}$ plus celui résultant de la puissance transmise par la batterie ($T_{batterie}$). Ce dernier peut être vu comme un couple additionnel dans le cas où le conducteur demande soudainement une puissance supplémentaire (forte accélération dans le cas d'un dépassement par exemple). Le moteur à combustion ne pouvant pas fournir toute la puissance, la batterie fournit alors une puissance additionnelle au moteur électrique donc un couple additionnel au véhicule ($T_{batterie}$). Ce couple est la différence entre le couple requis au total par le véhicule (T_{requis}) et le couple transmis par le moteur à combustion directement aux roues par l'intermédiaire de la couronne du train planétaire ($T_{couronne}$).

6.6 Conclusion

L'architecture série/parallèle reprend les mêmes éléments que l'architecture série étudiée aux chapitres 4 et 5, à laquelle s'ajoute un dispositif de gestion de l'énergie et un train planétaire épicycloïdal. Ce train planétaire permet de répartir la puissance du moteur à combustion à la génératrice et aux roues.

La génératrice étant connectée au pignon soleil qui est l'élément mécanique du train planétaire comportant le moins de dents, cette dernière doit pouvoir tourner à des vitesses élevées. De nouveaux paramètres ont été déterminés pour la génératrice et son entraînement pour disposer d'une puissance nominale de 30 kW et d'une vitesse

maximale de 10000 r/min. Les paramètres du moteur électrique, et de l'entraînement et ceux de tout le système de transmission sont identiques à ceux du modèle série.

Un sous-système de gestion de l'énergie a également été implanté. Ce sous-système permet de calculer, connaissant la vitesse du véhicule (vitesse de rotation de la couronne du train planétaire plus exactement) et la position de la pédale d'accélérateur, les consignes de couple du moteur électrique et du moteur à combustion, la consigne de vitesse de la génératrice et enfin la détection du mode hybride du véhicule. Ce modèle comporte des éléments Simulink pour la partie commande (système de gestion de l'énergie), des éléments SimPowerSystems pour les systèmes électriques (moteur, génératrice et convertisseur CC/CC), et des éléments SimDriveline pour le système mécanique (MCI, système de transmission et train planétaire).

CHAPITRE 7

RÉSULTATS DE SIMULATION DU MODÈLE SÉRIE/PARALLÈLE

7.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de décrire les résultats du modèle série/parallèle du véhicule hybride. La simulation est effectuée sur un cycle de 14 secondes permettant de passer à travers chacun des modes de fonctionnement du véhicule de la même façon qu'au chapitre 5 pour la simulation du modèle série. Les résultats présentés traitent principalement là encore des écoulements de puissance entre les différents sous-systèmes et particulièrement de ceux entre le MCI et les éléments composant le train planétaire, la batterie ainsi que la génératrice et le moteur électrique.

La simulation a été effectuée avec un pas de calcul de $60\mu s$ ($T_s = 60\mu s$).

7.2 Définition des consignes

Le sous-système de gestion de l'énergie, étudié dans le chapitre précédent, doit fournir pour le modèle série/parallèle deux consignes de couple : une pour le moteur à combustion interne et une seconde pour le moteur électrique. Ce sous-système doit également fournir une consigne de vitesse pour la génératrice et enfin détecter le fonctionnement hybride. Ces différentes consignes sont calculées principalement en fonction de la position de la pédale d'accélérateur ainsi que de la vitesse du véhicule et plus exactement la vitesse de la couronne du train planétaire. Le moteur y est connecté et le système de transmission (boîte de vitesses) est engrené.

La position de la pédale d'accélérateur est égale à 0,7 durant toute la simulation.

Cependant, dans le but de parcourir tous les modes de fonctionnement sur le même cycle de simulation, les entraînements électriques des moteurs doivent pouvoir être allumés ou éteints. La figure 76 montre les états logiques de chaque moteur. Un état '0' représente un moteur ou un entraînement électrique éteint tandis qu'un état '1' représente un moteur ou un entraînement électrique allumé.

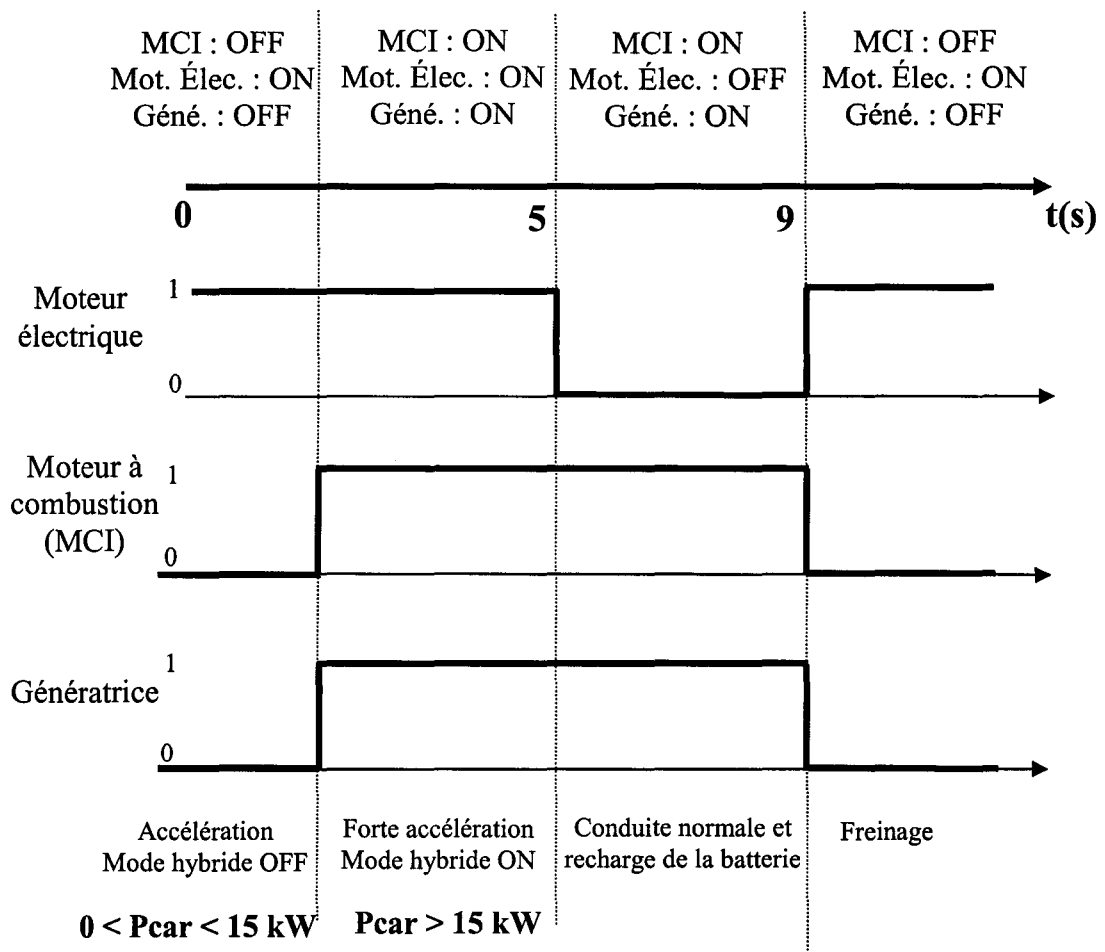


Figure 76 États logiques des moteurs durant la simulation²³

²³ Le terme moteur employé pour le moteur électrique et la génératrice désigne plus précisément leur entraînement électrique associé.

Au démarrage, le fonctionnement est purement électrique, puis lorsque la puissance requise par ce dernier est supérieure à 15 kW, le mode série/parallèle est activé (forte accélération) puis le mode parallèle seul est utilisé (conduite normale). Enfin le mode série est à nouveau sollicité lors du freinage.

L'arrêt ou la mise en marche des entraînements électriques est réalisée en multipliant le signal d'entrée (couple mesuré ou vitesse mesurée) et le signal de consigne par 0. Ainsi aucun effort de commande n'est demandé au régulateur de l'entraînement et il peut donc être considéré comme arrêté.

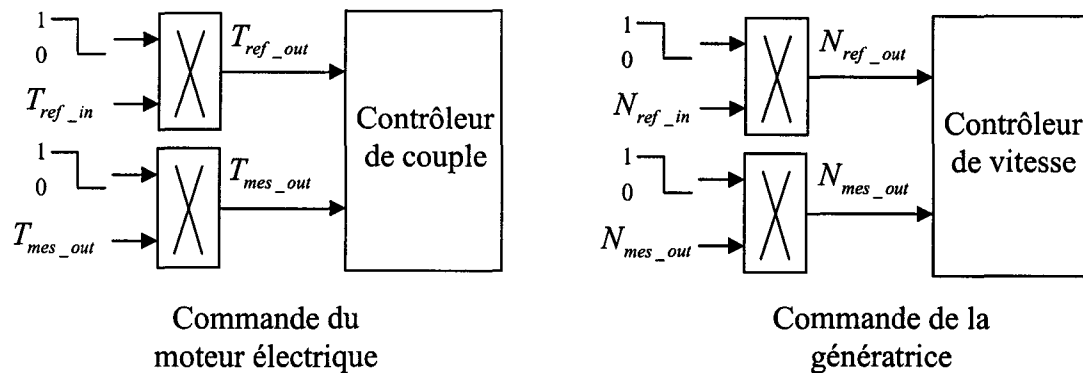


Figure 77 Extinction et mise en marche des entraînements électriques

7.3 Résultats généraux

Avant d'analyser les différents écoulements de puissance pour chaque mode de fonctionnement, cette partie présente les résultats généraux du système sur le cycle complet de simulation, à savoir les performances dynamiques du véhicule (accélération, vitesse linéaire), le bilan de puissance global du système, le bilan de puissance et de vitesse du train planétaire.

7.3.1 Performances dynamiques du véhicule

La vitesse du véhicule est directement liée à la vitesse de la couronne du train planétaire où l'arbre du moteur électrique est connecté. La figure suivante représente la vitesse linéaire du véhicule (km/h) et la vitesse de la couronne du train planétaire (rad/s) pour une accélération constante de 0.7 (pédale d'accélérateur enfoncée à 70%).

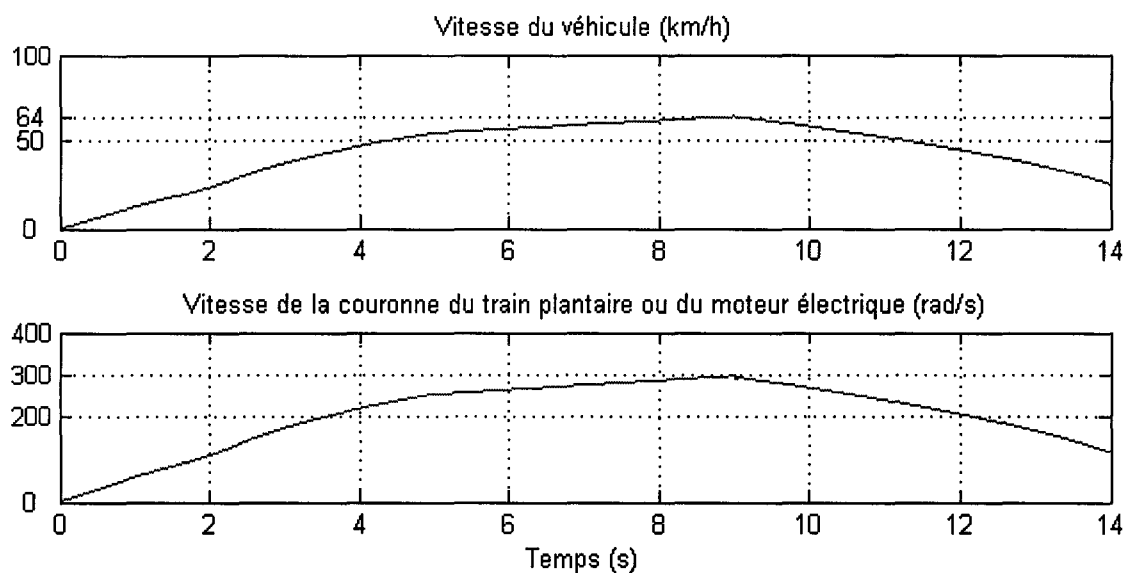


Figure 78 Vitesse linéaire du véhicule et vitesse angulaire de la couronne

On peut remarquer que l'accélération n'est pas constante malgré que la position de l'accélérateur le soit. Ceci, est dû au sous-système de gestion de l'énergie, qui fait fonctionner le véhicule dans différents modes de fonctionnement. On peut remarquer que l'accélération se fait sans perturbation jusqu'à la valeur de 64 km/h environ à $t = 9$ s. À $t = 5$ s, l'accélération se fait moins forte à cause du passage du mode série/parallèle au mode parallèle seul. Le profil de vitesse de la couronne du train sur laquelle est connecté le moteur électrique possède par conséquent le même profil de vitesse.

7.3.2 Bilan de puissance

Le bilan des puissances circulant dans le système doit vérifier les équations (6.1) (6.2) et (6.3). L'équation (6.2) montre que la puissance délivrée au moteur électrique est égale à la puissance délivrée par la génératrice plus celle de la batterie. L'équation (6.3) montre que la puissance du véhicule (ou puissance transmise au système de transmission) est égale à la puissance fournie par le moteur électrique plus celle transmise par la couronne du train planétaire. Cette dernière correspond à la puissance transmise par le MCI moins celle transmise à la génératrice (équation (6.1)).

L'équation (6.2) est illustrée par la figure suivante. Sur tout le cycle de simulation, on peut voir que cette équation est vérifiée et ce pour tous les modes de fonctionnement.

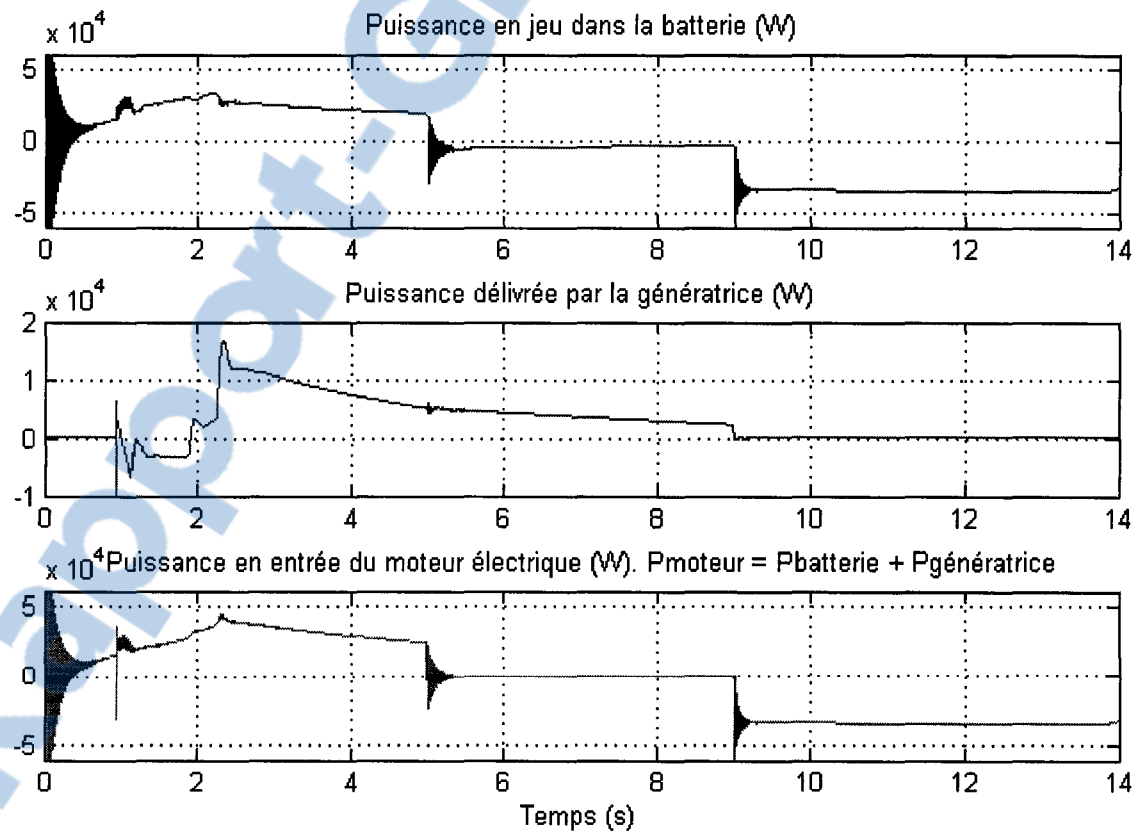


Figure 79 Bilan de puissance : génératrice, batterie, moteur électrique

Les oscillations à $t = 0.93\text{ s}$, $t = 5\text{ s}$ et $t = 9\text{ s}$, sont causées par la mise en marche ou l'arrêt d'un entraînement électrique.

La figure 80 illustre cette fois l'équation (6.3). Dans la dernière partie de la figure, la courbe de la puissance en entrée du moteur électrique est parfaitement superposée à celle de la puissance fournie par la batterie additionnée à celle en sortie de la génératrice. On peut également remarquer que cette puissance provient à basse vitesse (en début de simulation) principalement de la batterie et que pour des vitesses plus élevées elle provient de la génératrice. Le moteur à combustion est principalement utilisé. Ceci caractérise pleinement le comportement d'un système hybride.

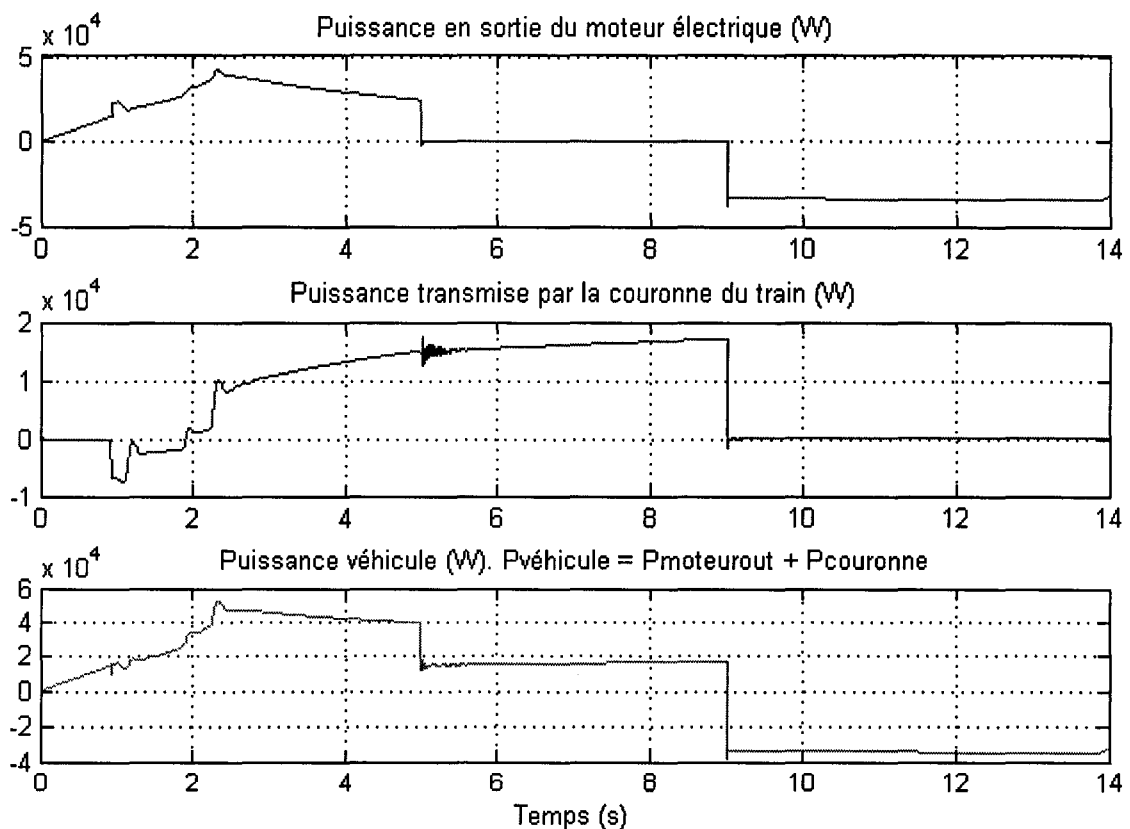


Figure 80 Bilan de puissance du véhicule

La figure 81 illustre pour finir l'équation (6.1). Dans la dernière partie de la figure, la courbe de la puissance du véhicule est parfaitement superposée à celle de la puissance de la couronne du train additionnée à celle du moteur électrique. La puissance de la batterie fournit une puissance additionnelle lors d'une forte accélération ($2 s < t < 5 s$).

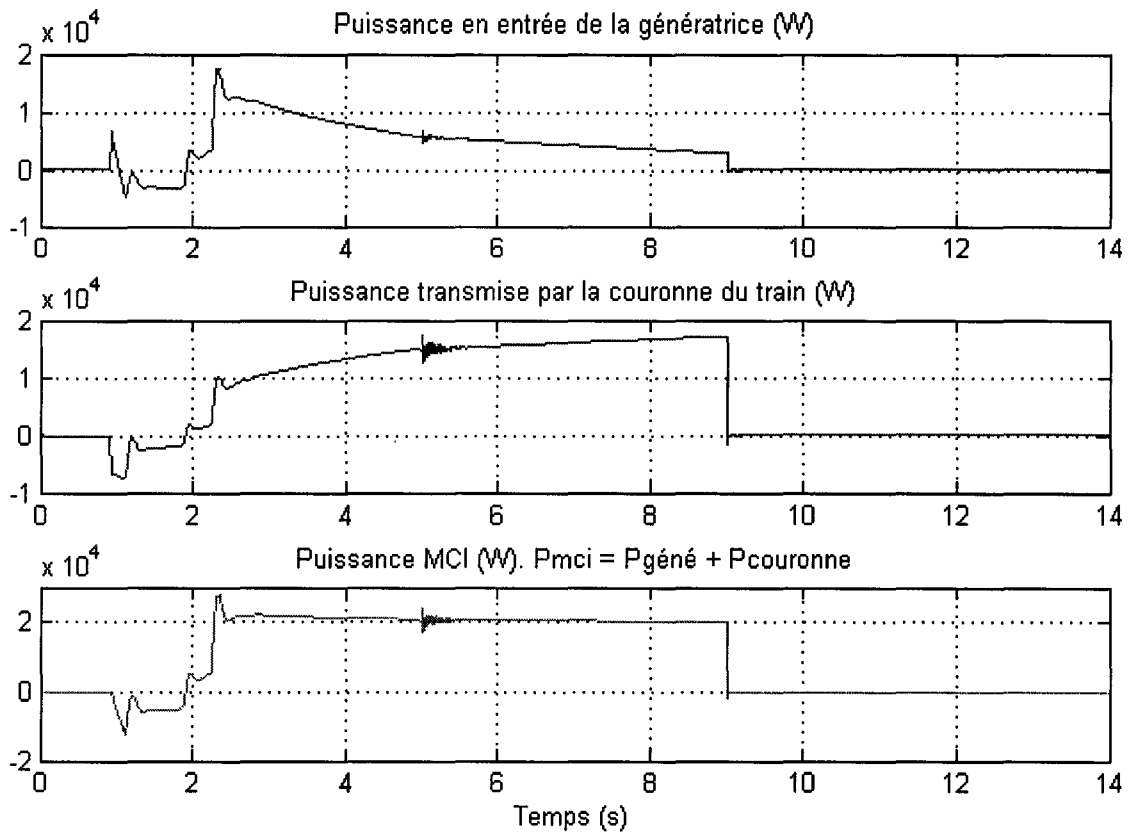


Figure 81 Bilan de puissance : MCI, génératrice, couronne du train

7.3.3 Bilan du train planétaire

Dans le chapitre 6, il a été montré que le train planétaire était un des éléments principaux du système série/parallèle et que son comportement devait vérifier deux équations. Celle de la loi de conservation de l'énergie (6.9) et la formule de Willis (6.4). Les deux figures ci-après montrent le bilan des vitesses (formule de Willis) du train planétaire. On y présente, les vitesses angulaires de la couronne, du pignon soleil et du porte-satellites.

La deuxième figure montre le résultat de la formule de Willis. On peut voir que ce résultat sur tout le cycle de simulation est toujours égal à -2.6 qui est égal à la raison du train planétaire. Le comportement des parties mobiles du train planétaire du point de vue vitesse angulaire est également conforme à celui décrit au sujet du train planétaire dans le chapitre 2, figure 30.

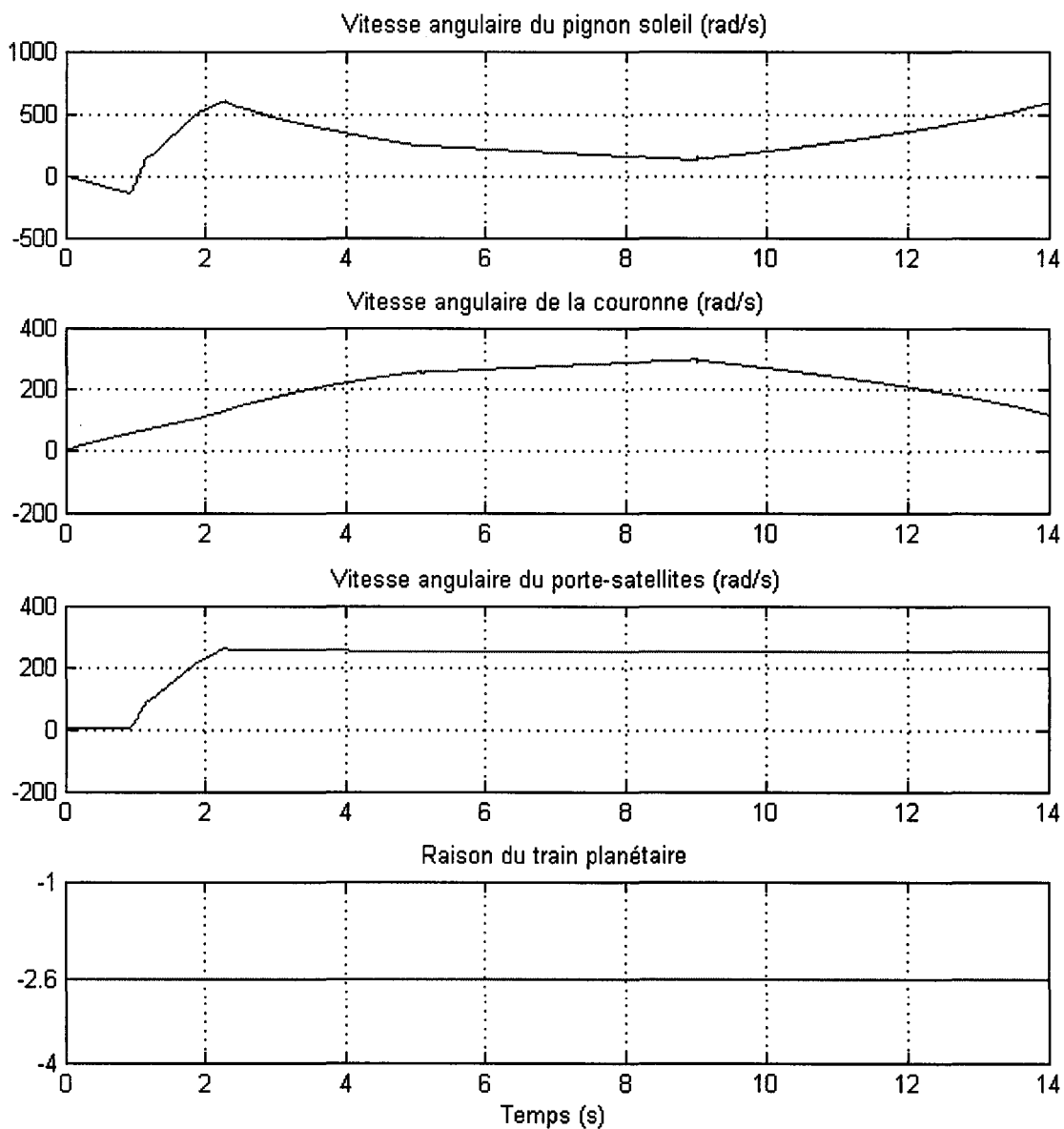


Figure 82 Vitesses angulaires du train planétaire : formule de Willis

L'équation de la loi de conservation de l'énergie est illustrée par la figure ci-après. Cette figure montre que la somme de chacune des puissances des éléments du train planétaire est nulle, ce qui vérifie donc l'équation.

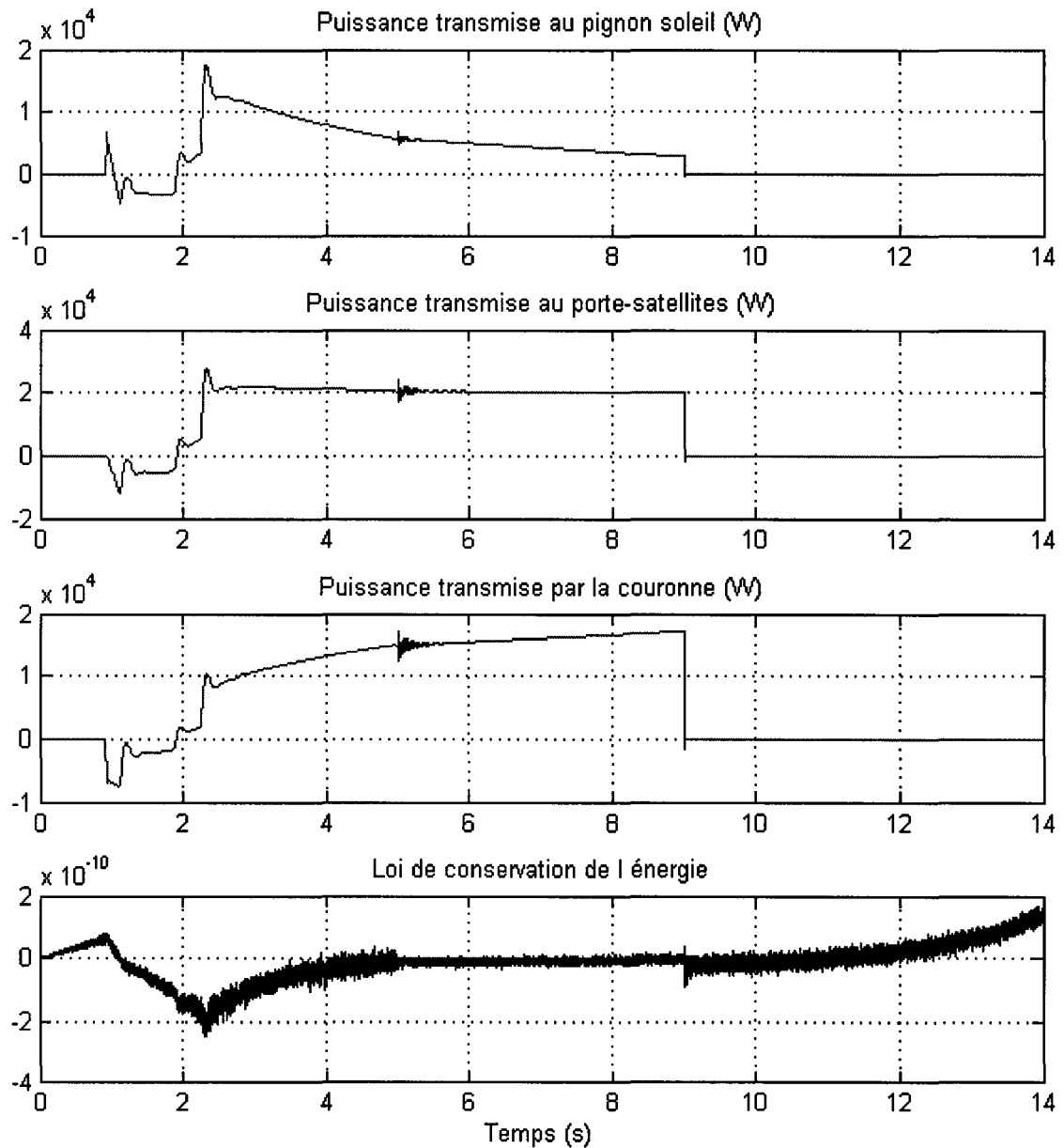


Figure 83 Bilan de puissance du train planétaire

7.4 Analyse des résultats selon les différents modes de fonctionnement

Cette partie traite des résultats obtenus lors de chaque mode de fonctionnement. Le cycle de simulation est divisé en intervalle pour chacun des modes parcourus. Comme pour le modèle série, l'analyse porte essentiellement sur les écoulements de puissance entre les principaux sous-systèmes du modèle.

7.4.1 Démarrage, basses et moyennes vitesses

Le premier mode de fonctionnement rencontré est celui du démarrage, basses et moyennes vitesses. Il s'agit de l'intervalle $0\text{ s} < t < 0,93\text{ s}$ exactement. Le véhicule est mû uniquement par la puissance délivrée par la batterie au moteur électrique.

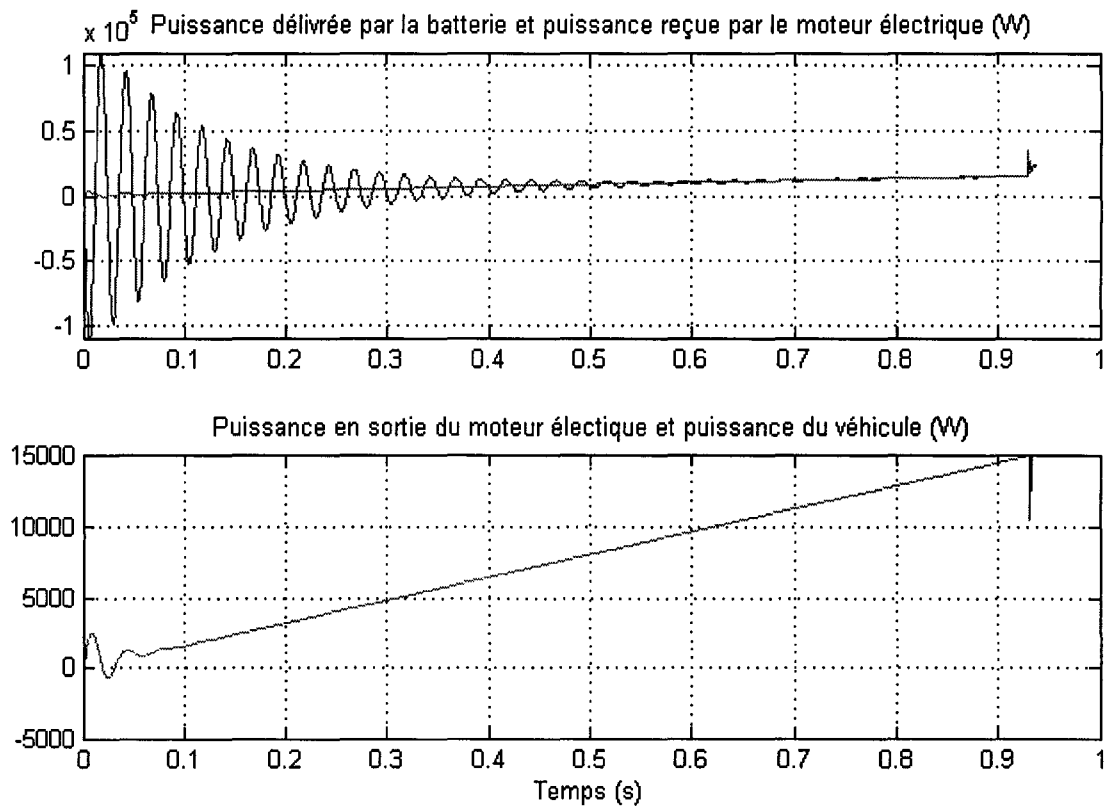


Figure 84 Bilan de puissance lors du démarrage ($P_{req} < 15kW$)

Tant que la puissance requise par le véhicule (P_{req}) > 15 kW, le moteur à combustion et l'entraînement électrique de la génératrice sont arrêtés. Ainsi le bilan des puissances peut s'écrire :

$$P_{batterie} = P_{inmoteur} \quad (7.1)$$

$$P_{outmoteur} = P_{véhicule} \quad (7.2)$$

Sur la figure précédente, les résultats obtenus confirment ces deux équations. Les courbes de la puissance moyenne de la batterie et celle en entrée du moteur électrique se superposent ainsi que les courbes de la puissance transmise par le moteur électrique et celle reçue en entrée du système de transmission. À $t = 0.94$ s, la puissance du véhicule atteint 15 kW, ce qui met fin au mode tout électrique.

7.4.2 Forte accélération

Lorsque la puissance demandée est supérieure à 15 kW, le véhicule fonctionne en mode hybride. La puissance requise par le véhicule est transmise par le moteur électrique alimenté par la batterie et la génératrice, ainsi que par le MCI par l'intermédiaire de la couronne du train planétaire.

Ce mode est compris sur l'intervalle 0.94 s < t < 5 s. La figure suivante vérifie l'équation (6.3). Sur la dernière partie de la figure, on observe que la puissance du véhicule est superposée à la puissance en sortie du moteur électrique plus la puissance transmise par la couronne du train planétaire.

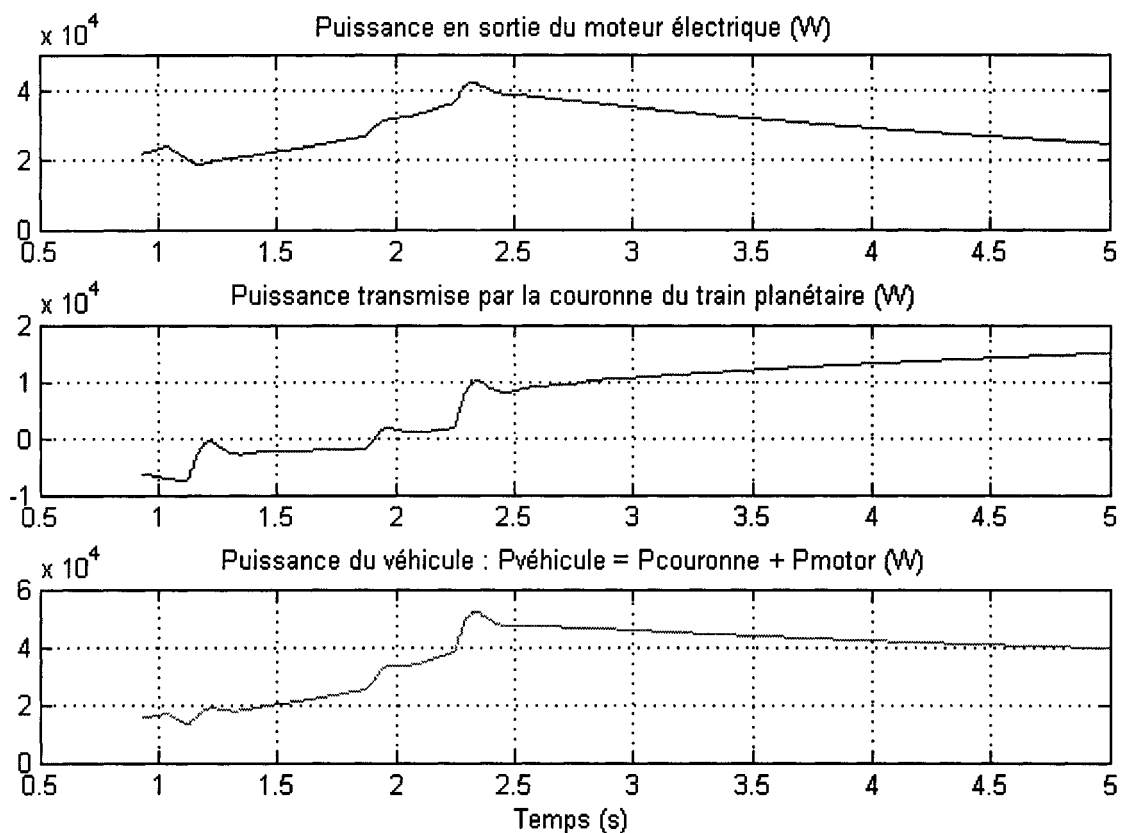


Figure 85 Bilan de puissance lors d'une forte accélération

La puissance en entrée du moteur électrique est égale à la puissance délivrée par la batterie et la puissance fournie par la génératrice. Cependant, lors d'un court instant, la génératrice fonctionne en mode moteur (couple et vitesse positifs) correspondant au comportement de l'alternateur déjà rencontré dans la simulation du modèle série (partie 5.4.1). La génératrice fonctionne en mode moteur pour satisfaire la consigne de vitesse en entrée et l'effort de commande (commande de couple) est maximal. La génératrice entraîne le MCI (correspondant au mode compression de ce dernier) jusqu'à ce que la vitesse de référence soit atteinte par la génératrice et que l'effort de commande soit négatif (commande de couple négative) ce qui correspond à l'intervalle $0.93 \text{ s} < t < 1.71 \text{ s}$.

Après $t = 1.7 \text{ s}$, le moteur à combustion est entraîné, et entraîne à son tour la génératrice qui délivre une puissance au moteur électrique. La figure suivante montre la puissance de la batterie, celle en entrée du moteur électrique et celle fournie dans un premier temps à la génératrice et ensuite délivrée par cette dernière.

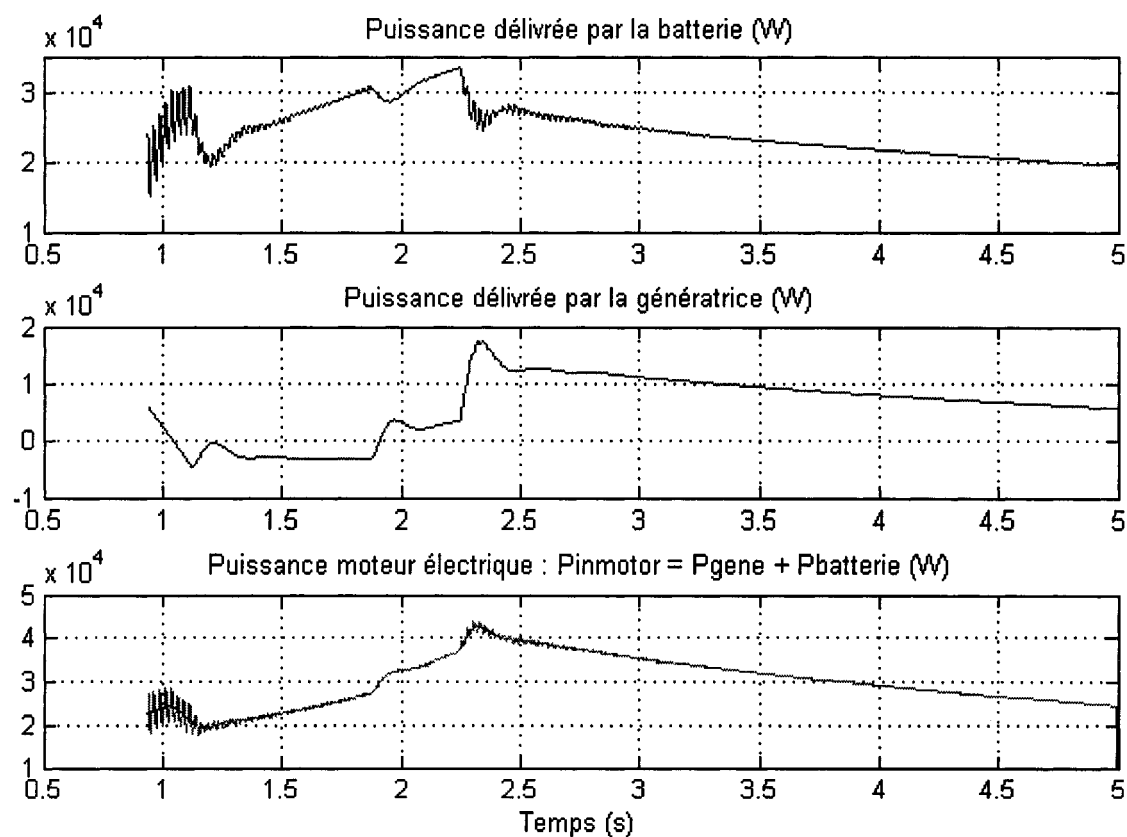


Figure 86 Fonctionnement en mode moteur de la génératrice

7.4.3 Conduite normale et recharge de la batterie

À $t = 5 \text{ s}$, l'entraînement du moteur électrique est coupé. Le moteur continue à tourner mais aucun effort de commande n'est appliqué. Aucun couple, et par conséquent, aucune puissance ne sont délivrés en sortie. Le véhicule est mû uniquement par le moteur à combustion qui transmet le couple nécessaire aux roues par l'intermédiaire de la

couronne du train planétaire. Ce dernier entraîne également la génératrice qui recharge alors la batterie. Ce mode est utilisé durant l'intervalle $5\text{ s} < t < 9\text{ s}$. Le bilan des puissances peut donc s'écrire de la façon suivante :

$$P_{MCI} = P_{véhicule} + P_{géné} \quad (7.3)$$

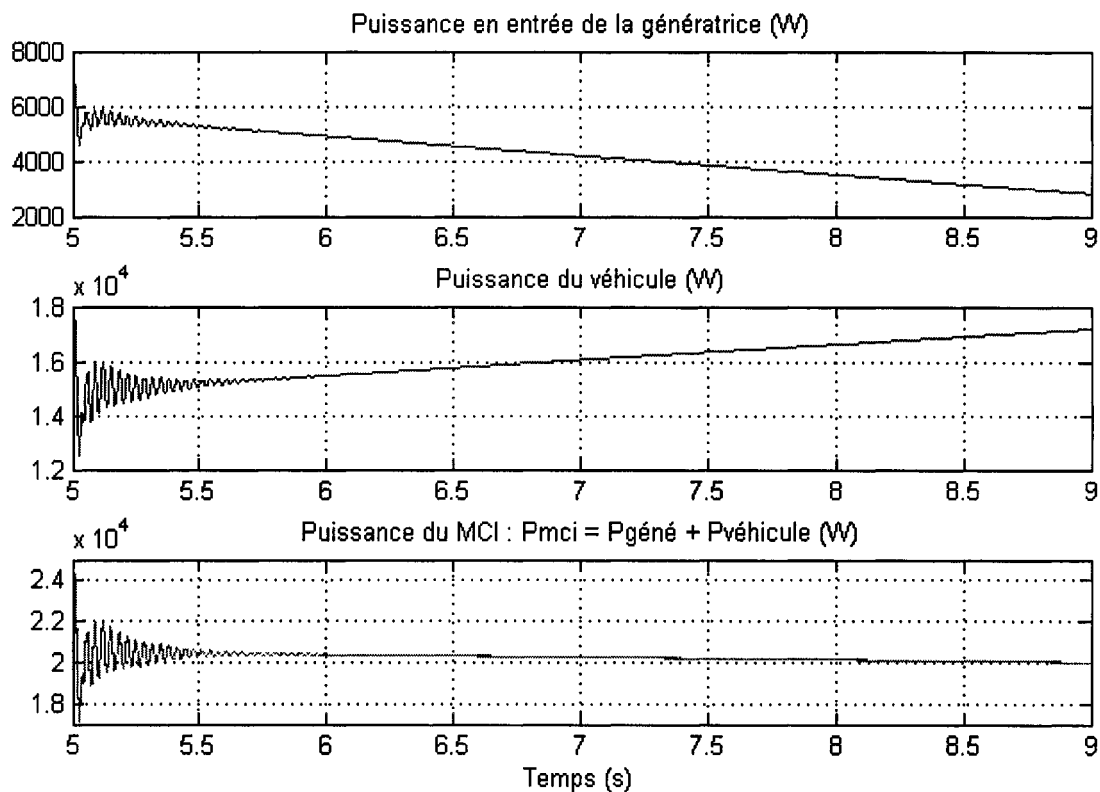


Figure 87 Bilan de puissance en conduite normale et recharge de la batterie

7.4.4 Freinage

Le dernier mode de fonctionnement du cycle de simulation est celui du freinage. Durant ce mode, l'énergie cinétique du véhicule est retournée à la batterie par l'intermédiaire du moteur électrique en mode génératrice.

À $t > 9$ s, l'entraînement de la génératrice est coupé et la consigne de couple du moteur à combustion est mise à zéro. Le couple de référence du moteur électrique, calculé par le sous-système de gestion de l'énergie, est multiplié par -1 afin de faire fonctionner le moteur en mode génératrice. Le moteur fournit donc une puissance cette fois à la batterie. La figure suivante montre qu'aucune puissance n'est délivrée par la génératrice. Le bilan de puissance est le suivant :

$$P_{moteur} = P_{batterie} \quad (7.4)$$

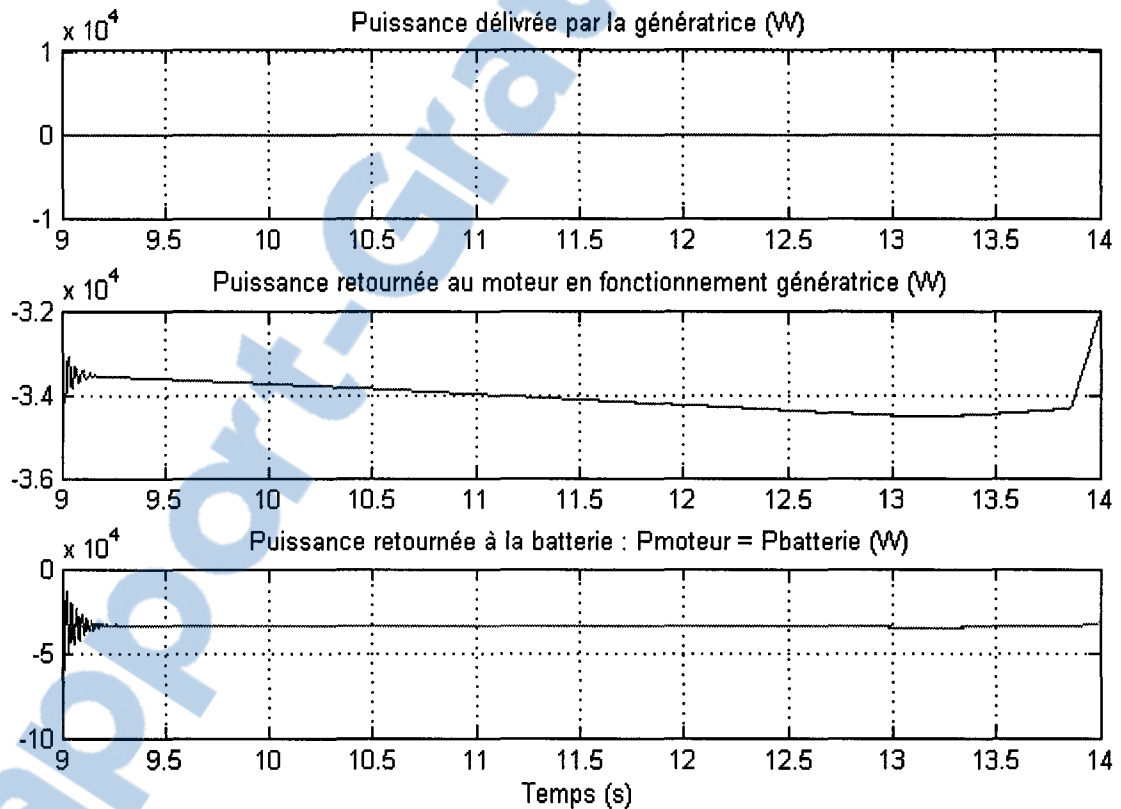


Figure 88 Bilan de puissance en mode freinage

7.5 Temps de simulation

Le cycle de simulation de 14 secondes a été effectuée en 50 secondes environ en utilisant un pas de calcul de $60\mu s$, ce qui veut dire que le temps réel de simulation est approximativement 3.57 fois le cycle de simulation. Ce résultat est donc comparable à celui obtenu pour le modèle série. Le modèle série/parallèle est plus complexe, intégrant un sous système de gestion de l'énergie et un train planétaire. Ces temps de simulation montrent clairement que SimDriveline est un outil complémentaire pour simuler des systèmes électromécaniques complexes et notamment l'élaboration d'un système de propulsion hybride et de son système de gestion de l'énergie. Le tableau suivant résume les temps de simulation obtenus pour le modèle série et le modèle série/parallèle.

Tableau IX

Temps de simulation : modèles série et série/parallèle

	Modèle série	Modèle série/parallèle
Cycle de simulation	10 s	14 s
Temps réel de simulation obtenu	35 s	50 s
Rapport temps réel / cycle de simulation	3.5	3.6

7.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire dans un premier temps les signaux de référence appliqués aux moteurs et leurs entraînements à chaque instant du cycle de simulation. Le fonctionnement du modèle série/parallèle pour différents modes de fonctionnement du véhicule a ensuite été décrit.

Les résultats ont montré que le modèle respectait le principe de fonctionnement du système THS II et notamment que les écoulements de puissance entre les différents sous-systèmes étaient cohérents. Le bilan des vitesses et des puissances pour le train planétaire s'est montré conforme à la théorie. Le sous-système de l'énergie utilisé a montré une bonne stabilité dans les signaux de commande pour chacun des moteurs ainsi que les signaux obtenus. Les performances dynamiques de la voiture (vitesse linéaire et accélération) (figure 78) se sont montrées cohérentes avec celles d'un véhicule de ce type.

En ce qui concerne les temps de simulation, ils sont comparables à ceux du modèle série. Le modèle hybride série/parallèle est pourtant plus complexe car il intègre un sous-système de gestion de l'énergie et un modèle de train planétaire épicycloïdale. Ces temps se sont avérés ainsi relativement bons. Ceci a montré que SimDriveline et SimPowerSystems sont deux modules complémentaires pour la modélisation et la simulation de systèmes électromécaniques complexes et de leurs commandes associées.

CONCLUSION

Ce projet a consisté à la modélisation et à la simulation d'un système multi-domaines complexe sous un unique environnement de travail. L'environnement de travail utilisé fut celui de Matlab/Simulink et de ses modules contenus dans Physical Modeling. Le système étudié est le système de propulsion d'un véhicule hybride électrique, de la Toyota Prius. En effet, l'étude des systèmes multi-domaines est particulièrement intéressante puisqu'elle pose des problèmes de stabilité et de non-linéarités importantes. L'objectif était de concevoir un modèle comportemental du système. Ce dernier est composé d'une partie mécanique, d'une partie électrique et d'une partie commande.

Le premier système multi-domaines étudié est celui de la bobineuse en utilisant le module SimMechanics pour la modélisation des forces appliquées à la bobineuse. Les simulations ont montré des résultats identiques à ceux du modèle original. Par contre les temps de simulation obtenus ont été multipliés par 10 par rapport à ceux du modèle entièrement Simulink.

Par la suite, l'architecture série d'un véhicule hybride a été modélisée en utilisant les modules SimPowerSystems pour la partie électrique et le module SimDriveline pour les éléments mécaniques. Le comportement de ce modèle a pu être vérifié à l'aide de résultats analytiques et graphiques. Cette étude est axée sur les échanges de flux de puissance entre les différents sous-systèmes.

Finalement, un modèle de l'architecture série/parallèle a été constitué. Cette architecture est la même que celle du modèle série, à laquelle est ajoutée un système de gestion de l'énergie, afin que chaque moteur fonctionne dans sa plage de haut rendement, ainsi qu'un système de répartition de la puissance du moteur à combustion. L'étude analytique et graphique des principaux flux de puissances a permis de valider le comportement du modèle selon différents modes de fonctionnement du véhicule. Les

temps de simulation se sont avérés relativement bons ce qui a montré la complémentarité des modules SimPowerSystems et SimDriveline pour cette étude (3,5 fois le temps réel). Ces temps de simulation ont pu être obtenus en utilisant des entraînements électriques à valeurs moyennes. Ces derniers permettent de remplacer les interrupteurs de puissance par des sources de courant et de tension commandées qui ont permis de multiplier par 30 le pas de calcul.

Les contributions personnelles apportées à ce projet furent diverses. En ce qui concerne la modélisation multi-domaines, ce modèle fut le premier système multi-domaines réalisé sous Matlab/Simulink composé d'éléments provenant de différents modules de l'ensemble Physical Modeling. Ce travail a permis de montrer que la complémentarité des modules de Physical Modeling dépendait du système étudié. Le modèle complet de l'architecture série/parallèle a également montré une bonne stabilité et robustesse malgré les nombreux sous-systèmes et paramètres à prendre en compte. Le passage d'un domaine à un autre ainsi que l'étude des signaux se fait assez simplement en utilisant des capteurs ou des actionneurs.

En ce qui concerne le modèle du véhicule hybride lui-même, le comportement du système et particulièrement celui du sous-système de gestion de l'énergie s'est montré conforme par rapport à la réalité. Un cycle de simulation parcourant chacun des modes de fonctionnement a été mis en place. Les résultats ont démontré que la puissance aux basses vitesses provient principalement de la batterie, alors que pour des vitesses plus élevées le moteur à combustion est principalement mis à contribution. C'est un comportement typique du véhicule hybride et de son architecture série/parallèle. Ce modèle comporte les éléments clés d'un tel système qui peut être repris et servir de base pour l'élaboration et le test d'un sous-système de gestion de l'énergie plus avancé pour le contrôle de chaque moteur et l'étude de la réduction des émissions de particules polluantes.

RECOMMANDATIONS

Le projet de maîtrise a pu être complété dans son intégralité et les résultats obtenus ont été conformes aux prévisions et aux hypothèses de départ. Cependant le modèle a été réalisé suivant différentes hypothèses simplificatrices et par conséquent a montré certaines limites. Plusieurs améliorations pourraient rendre le modèle encore plus précis.

La première chose que le modèle proposé pourrait inclure, est un modèle de batterie plus conforme à la réalité. En effet, la batterie a été modélisée par une source de tension idéale. Or la tension d'une batterie varie selon la charge et dispose d'une résistance interne variable. Les temps de charge et de décharge ne sont pas les mêmes et forment plutôt ceux d'un cycle d'hystérésis. Il serait donc très pertinent de pouvoir inclure un modèle précis de batterie.

Dans la partie transmission mécanique de la Toyota, la boîte de vitesses a été modélisée en utilisant un rapport fixe. Or dans le système réel de la Prius, il s'agit d'une transmission variable en continu (CVT) dont le rapport de réduction est géré électroniquement. Également, dans le système de transmission, des pertes pourraient être représentées pour obtenir un bilan énergétique du véhicule plus précis.

Enfin le sous-système de gestion de l'énergie pourrait prendre en compte l'état de charge de la batterie ainsi que le rapport de transmission de la boîte de vitesses. L'objectif du véhicule hybride étant l'amélioration du rendement énergétique du véhicule ainsi que la diminution de ses émissions polluantes, une étude sur ces sujets pourrait être entreprise. Par conséquent, le système de gestion de l'énergie pourrait être plus fidèle à la réalité en tenant compte de ces paramètres afin de compléter ces objectifs.

ANNEXE 1

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE LA TOYOTA PRIUS

Moteur à combustion interne	
Type de moteur	Moteur 1.5l 16 soupapes VVT-i
Nombre de cylindres	4
Distribution	2 ACT
Alésage x Course	75 mm x 84.7 mm
Taux de compression	13.0
Cylindrée	1497 cm ³
Puissance maxi.	57 kW à 5000 r/min
Couple maxi.	115 Nm à 4000 r/min
Moteur électrique	
Type de moteur	Moteur synchrone à aimants permanents
Puissance maxi.	50 kW de 1200 r/min à 1540 r/min
Vitesse maxi.	5000 r/min
Couple maxi.	400 Nm de 0 à 1200 r/min
Génératrice électrique	
Type de moteur	Moteur synchrone à aimants permanents
Puissance nominale	30 kW
Vitesse nominale	10000 r/min
Batterie	
Puissance maxi.	20 kW
Tension	202 V
Type de batterie	Nickel-métal hydrure (Ni-MH)
Moteur thermique et électrique combinés	
Puissance maxi.	82 kW à partir de 85 km/h
Couple maxi.	478 Nm de 0 à 22 km/h

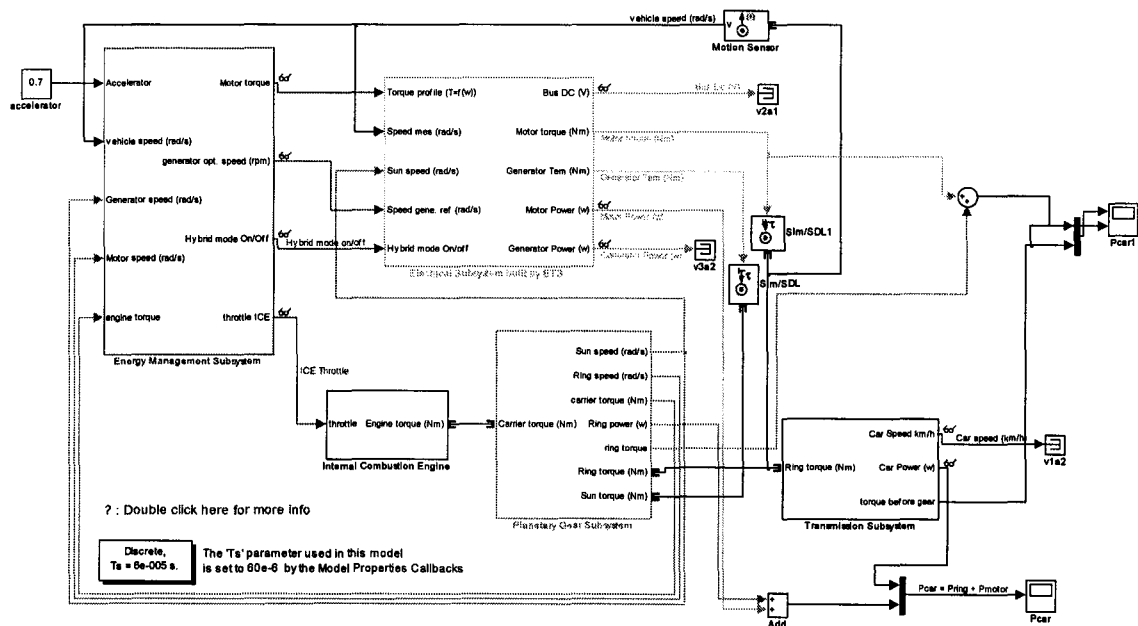
Transmission	
Boîte de vitesses	Variable en continu
Performances	
Vitesse maxi. sur circuit	170 <i>km/h</i>
Accélération de 0 à 100 <i>km/h</i>	10.9 <i>s</i>
Départ arrêté de 0 à 400 <i>m</i>	17.6 <i>s</i>
Consommation	
Cycle extra-urbain (normes CE)	4.2 <i>l / 100 km</i>
Cycle urbain (normes CE)	5 <i>l / 100 km</i>
Cycle mixte (normes CE)	4.3 <i>l / 100 km</i>
Émissions CO2	104 <i>g/km</i>
Réservoir de carburant	45 <i>l</i>
Freins	
Freins avant	Disques ventilés
Freins arrière	Disques
Châssis	
Suspension avant	Indépendante type Mac-Phersor
Suspension arrière	Essieu de torsion
Nombre de portes	5
Nombre de places assises	5
Pneumatiques	
Dimensions	16 x 6 JJ alliage
Jantes	195/55 R 16
Capacité	
Poids à vide en ordre de marche total	1300 <i>kg</i> / 1325 <i>kg</i>

Poids total autorisé en charge	1725 <i>kg</i>
Volume du coffre mini. / maxi.	408 <i>l</i>
Dimensions	
Longueur x largeur x hauteur	4450 <i>mm</i> x 1725 <i>mm</i> x 1490 <i>mm</i>
Empattement	2700 <i>mm</i>
Voie avant	1510 <i>mm</i>
Voie arrière	1480 <i>mm</i>
Rayon de braquage entre trottoirs	5.1 <i>m</i> / 5.5 <i>m</i>

ANNEXE 2

PARAMÈTRES DU MODÈLE SÉRIE/PARALLÈLE

Rapport-Gratuit.com



1 Propriétés du modèles : initialisation

```
clc
clear all
```

```
Ts = 6e-5; % time step
Kb = -2.6; % planetary gear ratio
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% caractéristique du moteur à combustion
```

```
p1 = 1; % initialisation p1,p2,p3 pour le polynome de degre 3
p2 = 1; % de facon a ce que: p1 + p2 - p3 = 1
p3 = 1; % et que : p1 + 2*p2 - 3*p3 = 0
power = 0; % puissance normalisée
j = 1000; % nbre de points
i = 1; % numero itération
w = 1; % vitesse normalisée
pmax = 57000; % puissance maximale du moteur thermique
rad0 = (5000*2*pi)/60; % vitesse du moteur a pmax (rad/s)
radmax = (6000*2*pi)/60; % vitesse maximale du moteur (rad/s)
wmax = radmax/rad0; % vitesse maximale normalisée
```

```

for w = 0:(1*j) % pour 0 a vitesse maximale normalisee
    power = (p1*(w/j)) + (p2*((w/j)*(w/j))) - (p3*((w/j)*(w/j)*(w/j))); % calcul de p(w)
    powermatr(i,1)= power; % mise des valeurs dans une matrice
    g(i,1) = (pmax/rad0)*(power/(w/j)); % calcul de g(w) qui le calcul du couple(w)
    abscisse(i,1) = (w/j); % matrice de l'echelle des abscisses
    i = i+1; % on itere
end
abscisserpm = abscisse*((rad0*60)/(2*pi));
ordonnee = powermatr*pmax;
ordonnee(1,1) = 1;

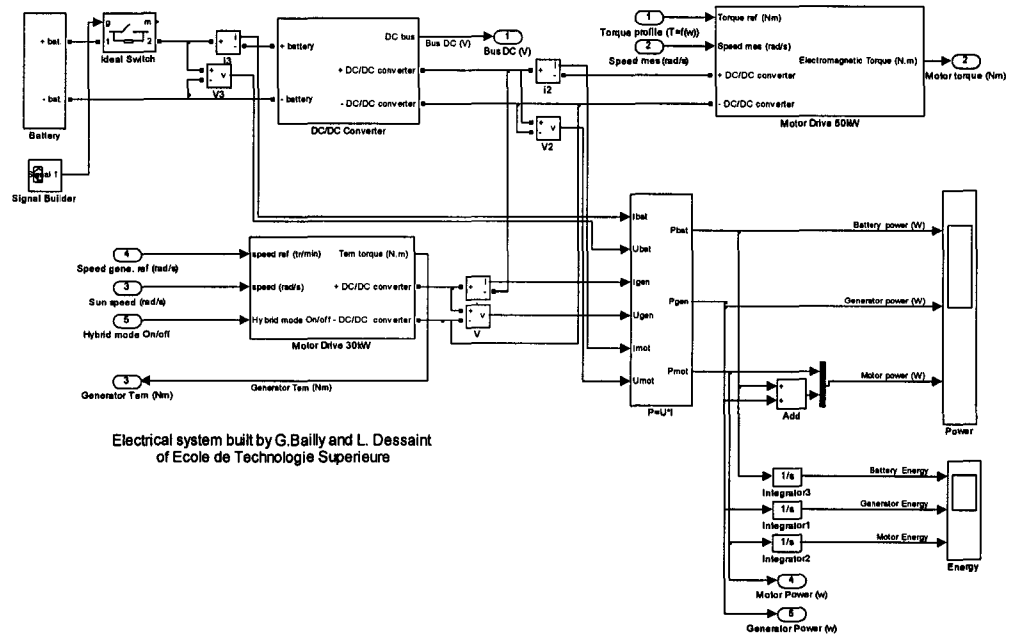
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% caractéristique du moteur électrique

w1 = 126; %1200 r/min
w2 = 161; %1540 r/min
w3 = 524; %5000 r/min
for k = 1:w1
    N(k,1) = k;
    couple(k,1) = 400; % de 0 a 1200r/min, couple constant
end
for m = w1:w2
    N(m,1) = m;
    couple(m,1) = 50000/m; % de 1200 à 1540 r/min, puissance constante
end
for k = w2:w3
    N(k,1) = k;
    couple(k,1) = ((-13.77*k) + 52215)/k; % 1540 a 5000 r/min, P décroit jusqu' 45kW
end

N = (N(:,1)*60)/(2*pi);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

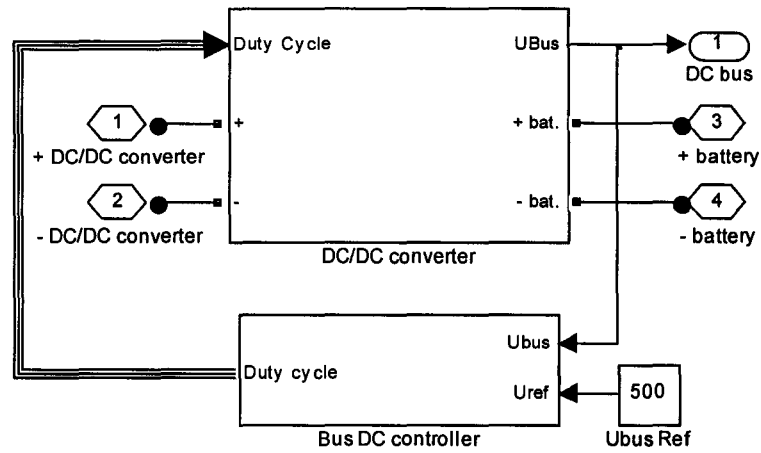
2 Le sous-système électrique



2.1 Modèle de la batterie

Tension	202 V
Résistance	0.01 Ω

2.2 Convertisseur CC/CC



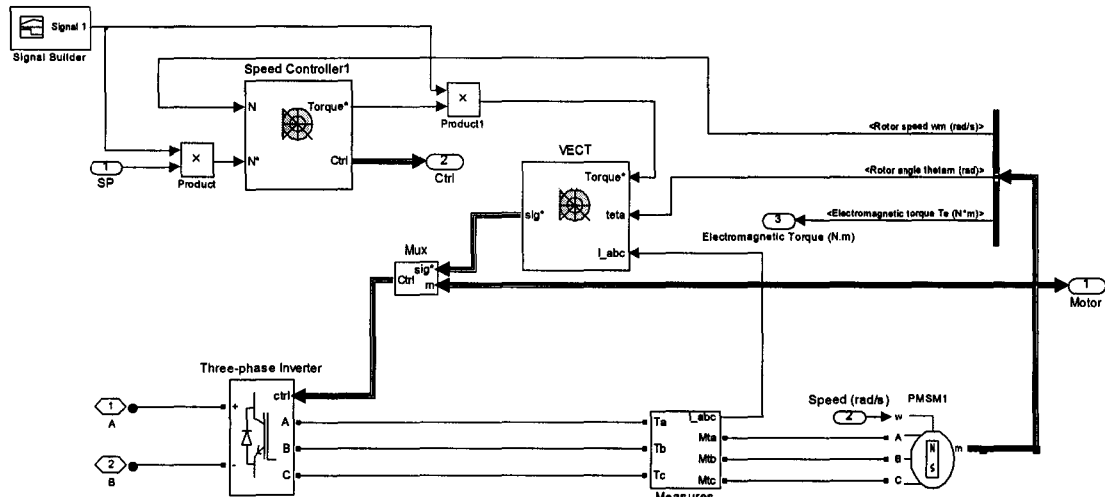
Convertisseur CC/CC :

Branche RC	Résistance : 0.01Ω
	Condensateur : 35 mF
	Tension initiale du bus CC : 500 V
Inductance de lissage	$300 \mu\text{H}$

Régulateur du bus CC :

Gain K_i	0.1
Gain K_p	0.005
Tension de référence	500 V
Filtre passe-bas	$\frac{1}{0.0001s + 1}$
Fréquence du signal d'échantillonnage en dents de scie	10 kHz

2.3 Moteur électrique et son entraînement (modèle à valeurs moyennes)



Moteur synchrone à aimants permanents

Distribution du flux	Sinusoïdale
Entrée	Couple (Nm)
Résistance statorique	0.005Ω
Inductance sur l'axe q	$0.3 mH$
Inductance sur l'axe d	$0.3 mH$
Flux induit des aimants	$0.192 wb$
Inertie	$0.25 kg \cdot m^2$
Coefficients de friction	$0.005 Nm \cdot s$
Nombre de paires de pôles	4

Commande vectorielle

Nombre de paires de pôles	4
Flux induit des aimants	$0.192 wb$
Pas d'échantillonnage	T_s

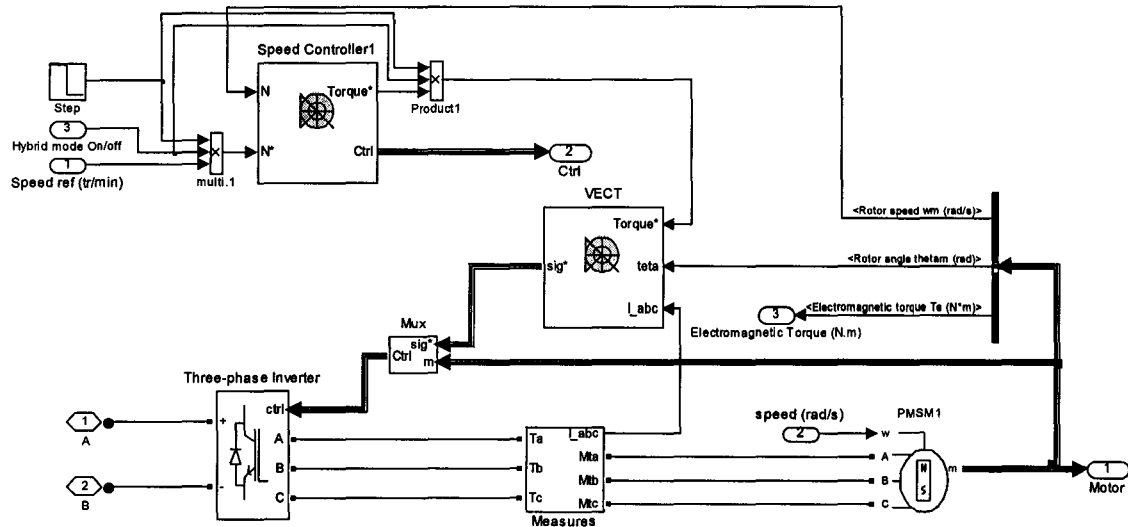
Convertisseur triphasé

Ron	0.001 Ω
Fréquence de la source	60 Hz
Inductance sur l'axe q	0.3 mH
Inductance sur l'axe d	0.3 mH
Nombre de paires de pôles	4
Flux induit des aimants	0.192 wb
Résistance statorique	0.005 Ω

Contrôleur

Type de régulation	Régulation de couple
Rampe d'accélération	10000 r/min/s
Rampe de décélération	-10000 r/min/s
Gain Kp	0.2
Gain Ki	10
Fréquence de coupure du filtre passe bas	100 Hz
Saturation positive du couple	400 Nm
Saturation négative du couple	-400 Nm
Pas d'échantillonnage	4 * T_s

2.4 Génératrice et son entraînement (modèle à valeurs moyennes)



Moteur synchrone à aimants permanents

Distribution du flux	Sinusoidale
Entrée	Vitesse (rad/s)
Résistance statorique	0.05Ω
Inductance sur l'axe q	$635 \mu H$
Inductance sur l'axe d	$635 \mu H$
Flux induit des aimants	$0.192 wb$
Inertie	$0.011 kg \cdot m^2$
Coefficients de friction	$0.000472259 Nm \cdot s$
Nombre de paires de pôles	1

Commande vectorielle

Nombre de paires de pôles	1
Flux induit des aimants	$0.192 wb$
Pas d'échantillonnage	T_s

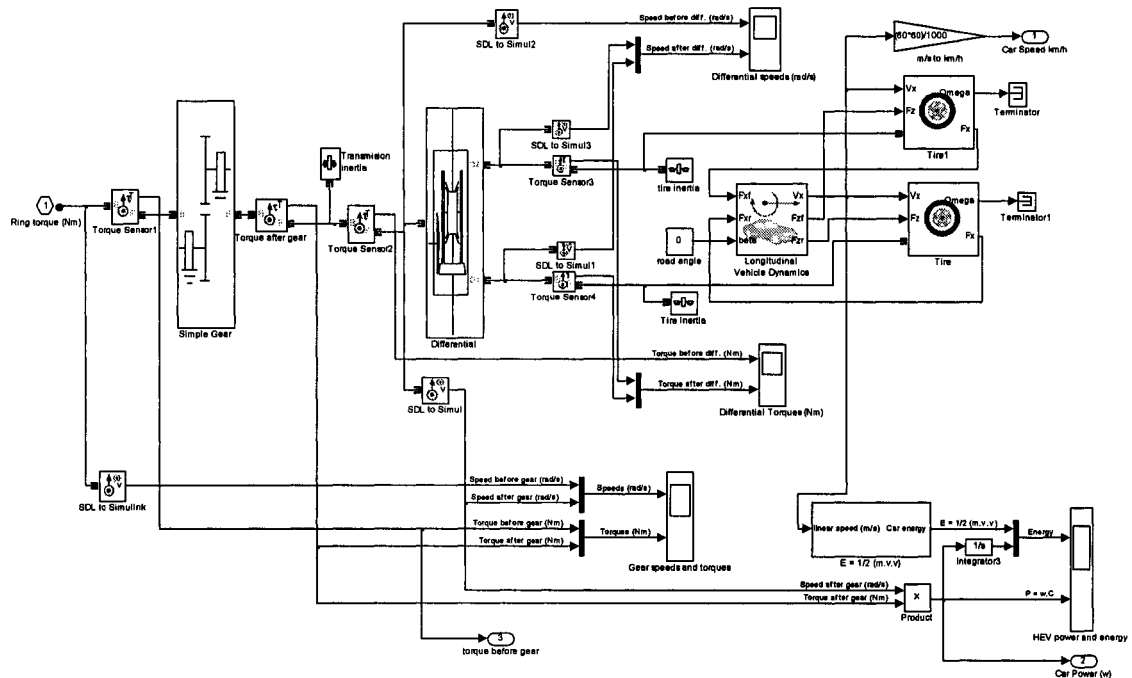
Convertisseur triphasé

Ron	0.001 Ω
Fréquence de la source	60 Hz
Inductance sur l'axe q	635 μH
Inductance sur l'axe d	635 μH
Nombre de paires de pôles	1
Flux induit des aimants	0.192 wb
Résistance statorique	0.05 Ω

Contrôleur

Type de régulation	Régulation de vitesse
Rampe d'accélération	5000 r/min/s
Rampe de décélération	-5000 r/min/s
Gain Kp	0.1
Gain Ki	2.5
Fréquence de coupure du filtre passe bas	50 Hz
Saturation positive du couple	45 Nm
Saturation négative du couple	-45 Nm
Pas d'échantillonnage	4* T_s

3 Le sous-système mécanique



3.1 Train planétaire

Rapport couronne / pignon soleil	2.6
----------------------------------	-----

3.2 Moteur à combustion interne (MCI)

Puissance maximale	57000 W
Vitesse à puissance maximale	5000 r/min
Vitesse maximale	6000 r/min
Inertie	0.5 kg.m ²

3.3 Boîte de vitesses

Rapport de réduction	5
Inertie	2 kg.m^2

3.4 Différentiel

Rapport de réduction	1
----------------------	---

3.5 Dynamique longitudinale du véhicule

Masse du véhicule	1325 kg
Distance entre le centre de gravité et l'axe des roues avant	1.35 m
Distance entre le centre de gravité et l'axe des roues arrière	1.35 m
Centre de gravité	0.5 m
Surface frontale	2.57 m^2
Coefficient aérodynamique	0.26
Vitesse initiale	0 m/s
Inertie sur chaque axe de sortie	0.5 kg.m^2

3.6 Dynamique du contact de la roue avec le sol

Rayon de la roue	0.3 <i>m</i>
Charge verticale évaluée	3000 <i>N</i>
Charge horizontale maximale à la charge verticale évaluée	3500 <i>N</i>
Facteur de glissement	10 %
Longueur de relaxation à la charge verticale évaluée	0.2 <i>m</i>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Bouscayrol, X. Guillaud, Ph. Delarue, "*Hardware in-the-loop simulation of a wind energy conversion system using Energetic Macroscopic Representation*", Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 32nd Annual Conference of IEEE.
- [2] A. Bouscayrol, "*Formalismes de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs*", thèse présentée à l'université des sciences et de technologies de Lille, 22 décembre 2003.
- [3] B. Jeanneret, R. Trigui, F.Badin, F.Harel, "*New Hybrid concept simulation tools, evaluation on the Toyota Prius car*", The 16th International electric vehicle symposium, October 13-16, 1999 – Beijing – China.
- [4] Powell B.K, Bailey K.E, Cikanek S.R, "*Dynamic modeling and control of hybrid electric vehicle powertrain systems*", Control Systems Magazine, IEEE, Volume 18, Issue 5, Oct. 1998, pages 17-33.
- [5] Fellini R, Michelena N, Papalambros P, Sasena M, "*Optimal design of automotive hybrid powertrain systems*", Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999. Proceedings. EcoDesign '99, Pages 400-405.
- [6] Dean C. Karnopp, Donald L. Margolis, Ronald C. Rosenberg, "*System dynamics : a unified approach*", 2nd edition, Wiley-Interscience publication.
- [7] Donald Margolis, "*Bond graphs, modeling, and simulation in industry : some examples where costly mistakes could have been avoided*", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2002.

- [8] A. Emadi, K. Rajashekara, S.S. Williamson, S.M. Lukic, “*Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations*”, IEEE Transactions on vehicular technology, Volume 54, No 3, May 2005, Pages 763-770.
- [9] Karen L. Butler, Mehrdad Ehsani, Preyas Kamath, “*A Matlab-based Modeling and Simulation Package for Electric and Hybrid Electric Vehicle design*”, IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 48, No. 6, novembre 1999.
- [10] Lee J.M, Cho G.H, “*Modeling and simulation of electric vehicle power system*”, Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97. Volume 3, pages 2005-2010.
- [11] Karin Jonasson, “*Analysing Hybrid Drive System Topologies*”, Thèse présentée à l’université de Lund, Suède, 2002.
- [12] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, “*Analysis of electric machinery and drive systems*”, 2nd edition, Wiley-Interscience publication.
- [13] www.mathworks.com
- [14] www.mathworks.com/products/simmechanics
- [15] www.mathworks.com/products/simdrive
- [16] www.mathworks.com/products/simpower
- [17] Toyota Motor Corporation, Public Affair Division, “Toyota Hybrid System THSII”, may 2003, <http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/ths2/index.html>

- [18] Kawahashi A, "*A new-generation hybrid electric vehicle an dits supporting power semiconductor devices*", Power Semiconductor Devices and ICs, 2004, Proceedings. ISPSD '04. The 16th International Symposium on, Pages 23-29.
- [19] S. Sasaki, "*Toyota's Newly Developed Hybrid Powertrain*" , Proceedings of 1998 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Kyoto, 1998.
- [20] Sébastien Delprat, "*Évaluation de strategies de commande pour véhicules hybrides parallèles*", thèse présentée à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, France, le 4 janvier 2002.
- [21] Serge Campeau, "*Conception et analyse d'un véhicule hybride à configuration parallèle*", rapport de maîtrise, École de Technologie Supérieure, 1997.
- [22] George Henriot, "*Traité théorique et pratique des engrenages : tome 1*", 5^{ème} édition, Dunod.
- [23] A. Di Napoli, F. Crescimbin, F. Giulii Capponi, L. Solero, "*Control Strategy for Multiple Input DC-DC Power Converters Devoted to Hybrid Vehicle Propulsion Systems*", Industrial Electronics, 2002. ISE 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium. Volume 3, pages 1036-1041.