

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR

délivré conjointement par

l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

et par

l'Université de Franche-Comté

Spécialité: Sciences pour l'ingénieur - Génie Électrique
PAR

AIMAN NOUH

CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT D'UN SIMULATEUR POUR LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES ROUTIERS

Thèse soutenue le 26 Mars 2008 devant le jury:

Maurizio CIRRINCIONE	Président Examineur	Professeur des Universités FC Lab, UTMB, Belfort
Mohammed EL BAGDOURI	Directeur de thèse	Professeur des Universités SeT, UTBM, Belfort
Abdesslem DJERDIR	Co-Directeur de thèse	Maître de Conférence, HDR FC Lab, UTBM, Belfort
François BADIN	Rapporteur	Directeur de recherches IFP Solaize, Lyon
Mohamed E. H. BENBOUZID	Rapporteur	Professeur des Universités LBMS, UBO, Brest
Mouhcine CHAMI	Examineur	Professeur Assistant INPT, Rabat, Maroc

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'équipe Évaluation et Conduite de Systèmes (ECS) du laboratoire Systèmes et Transports (SeT) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). La disponibilité et la passion des acteurs de mon quotidien m'ont permis de mener à bien ces travaux. Ces quelques remerciements témoignent donc de la reconnaissance que je porte à chacune de ces personnes.

Je suis reconnaissant à Monsieur Mohammed El-Bagdouri, Professeur à l'UTBM et Directeur de cette thèse, de m'avoir accordé sa confiance et laissé une grande liberté durant ces années de thèse. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour ses remarques et sa longue patience.

Je remercie sincèrement Monsieur Abdesslem Djerdir, Maître de Conférences et HDR à l'UTBM, Co-encadrant de la thèse, pour son aide tout au long de ce travail de recherche. Il m'a apporté son savoir et son expérience. Ses conseils pertinents et remarques m'ont été d'une grande utilité.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à Monsieur Mouhcine Chami, Professeur assistant à l'INPT de Rabat au Maroc, qui m'a suivi de près, qui a toujours été présent pour m'aider et me supporter, et qui a accepté la charge d'examineur. Très conscient de ce que je lui dois, je lui exprime toute ma reconnaissance.

Mes remerciements vont ensuite à Monsieur François Badin, Directeur de recherche à l'IFP Solaize, et Monsieur Mohamed E. H. Benbouzid, Professeur des universités du LBMS de l'Université de Bretagne Occidentale (UBO), qui m'ont fait le plaisir d'être mes deux rapporteurs, et qui ont pris le temps de relire mon travail et qui m'ont fait des remarques constructives et très intéressantes. Leurs questions et leurs commentaires pertinents m'ont permis de clarifier très sensiblement ma rédaction et m'ont donné de nouvelles pistes de réflexion.

Que Monsieur Maurizio Cirrincione, Professeur à l'UTBM, reçoive tout mon profond respect pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de thèse et d'être examinateur.

Je n'oublierai pas de remercier le Comité Général du peuple pour l'Enseignement Supérieur en Libye, qui m'a donné la chance d'être ici en finançant mes études. Je tiens également à exprimé toute ma gratitude au personnel du Consulat libyen et du Bureau Populaire de la Grande Jamahiriya Arabe Libyenne Populaire et Socialiste pour leur gentillesse, leur aide et leur disponibilité. Mes remerciements s'adressent aussi à mes professeurs au département Génie Electrique de l'Université Omar Al-Mukhtar à El-Beida en Libye, qui m'ont encouragé à suivre le chemin de la recherche.

Que mes collègues du laboratoire SeT trouvent ici l'expression de ma gratitude, leur gentillesse et leur disponibilité ont grandement contribué à rendre ce travail agréable.

Je ne puis terminer sans remercier ma famille, mon épouse et mes amis pour leur encouragement et leur soutien permanents malgré les multiples contraintes que ces travaux ont imposées.

A la mémoire de ma mère Naïma

A mon père Abdulrhman

A ma sœur Sihame

A ma femme Nada

A mes frères :

Ashraf,

Tariq,

Mohaned,

et Wacime

Avec Amour

Avec Tendresse

***Quand on ne sait pas ce qu'on veut,
On prend le risque d'obtenir ce qu'on ne veut pas.***

Savoir ce que l'on veut est donc un préalable pour atteindre ses objectifs. Lapalissade, assurément, mais à défaut, on demeure avec des souhaits, des rêves, des envies, des espoirs peut être. Et à terme, rien n'ayant abouti ou dans un sens (trop) différent de ce que l'on pouvait imaginer, ce sont d'autres sentiments qui risquent d'apparaître : agacement, colère, frustration, impression d'impuissance ou d'échec, regret, découragement, etc.

Table des matières

Table des figures	xv
Liste des tableaux	xxi
Introduction générale	1
Chapitre 1 Enjeux et Problématiques du Véhicule Électrique	5
1.1 Introduction	5
1.2 Historique	6
1.3 La chaîne de traction	12
1.3.1 Définitions de base	12
1.3.2 Motorisation électrique dans le transport	13
1.3.3 Inconvénients et avantages des VE	13
1.4 Principales Configurations des Véhicules	15
1.4.1 Les véhicules hybrides	15
1.4.2 Le véhicule électrique	17
1.5 Solutions de transmission mécanique dans une chaîne de traction tout élec- trique	18
1.5.1 Solution avec boîte de vitesse mécanique	19
1.5.2 Solution avec réducteur mécanique à rapport fixe	19
1.5.3 Solutions multimoteurs	20
1.6 Les organes de traction électrique	21
1.6.1 Les moteurs électriques	22
1.6.1.1 Moteurs à courant continu (MCC)	23
1.6.1.2 Moteurs asynchrones (MAS)	23
1.6.1.3 Moteurs synchrones	24
1.6.1.4 Le fonctionnement à puissance maximale constante	26

1.6.2	Les convertisseurs électriques	29
1.6.2.1	Les redresseurs (AC-DC)	30
1.6.2.2	Les hacheurs (DC-DC)	31
1.6.2.3	Les onduleurs (DC-AC)	31
1.6.3	Source d'énergie électrique embarquée	32
1.6.3.1	Les batteries	32
1.6.3.2	Les piles à combustible	37
1.6.3.3	Autres sources d'énergie	40
1.7	La simulation	40
1.7.1	Problématique de l'approche système	41
1.7.1.1	La systématique d'un véhicule électrique	42
1.7.1.2	Outils de modélisation des systèmes électromécaniques	43
1.7.2	Logiciels de simulation pour le véhicule électrique	45
1.7.3	Notre simulateur ELEVES	47
1.8	Conclusion	48
Chapitre 2 Modélisation des Composants du Véhicule Electique		49
2.1	Introduction	49
2.2	Système étudié	50
2.2.1	Bilan des efforts appliqués au véhicule	50
2.2.1.1	Couple d'auto-alignement	50
2.2.1.2	Forces aux roues	51
2.2.2	Structure du véhicule électrique étudié	54
2.3	Modélisation mécanique	55
2.3.1	Dynamique du véhicule	56
2.3.2	Angle de glissement	59
2.3.3	Comportement d'une roue vis-à-vis du sol : glissement, patinage et adhérence	60
2.3.4	Modèle mécanique en vue de la simulation du véhicule	64
2.4	Modèle de la motorisation électrique	67
2.4.1	Méthodes de modélisation	67
2.4.2	Modèle de la machine utilisée	68
2.5	Couplage entre le modèle mécanique et celui de la motorisation	70
2.6	La commande du système	72
2.6.1	La Représentation Energétique Macroscopique (REM)	72

2.6.1.1	La REM du système	73
2.6.1.2	La REM globale du système étudié	80
2.6.2	La SMC du système étudié	80
2.7	Conclusion	83

Chapitre 3 Formalisme graphique en vue de développement de simulateurs pour des véhicules électriques **85**

3.1	Introduction	85
3.2	Le formalisme Bond Graph	86
3.2.1	Les variables généralisées	86
3.2.2	Les éléments bond graph	86
3.2.3	Les jonctions	88
3.2.4	Construction d'un modèle bond graph à partir d'un système physique	88
3.2.5	La causalité	89
3.2.6	Exemple	91
3.2.7	Modélisation des systèmes discrets	94
3.3	Le Réseau Dynamique Hybride à Composant	96
3.3.1	Réseau Dynamique Continu à Composant	96
3.3.2	Construction d'un modèle RDCC à partir d'un système physique .	98
3.3.3	Modélisation des systèmes hybrides	100
3.3.4	La causalité	101
3.3.5	La mise en équation	102
3.3.6	Exemple de mise en équation	103
3.3.7	Gestion des configurations	105
3.3.8	Méthodologie générale de simulation	108
3.3.8.1	Les topologies de simulation	108
3.3.8.2	Mode de changement de configuration	109
3.3.8.3	Les techniques de résolutions numériques	110
3.4	Comparaison entre les deux formalismes	110
3.5	RDHC du véhicule électrique	112
3.5.1	RDHC du véhicule électrique à deux roues motrices sans la com- mande de la vitesse du véhicule	112
3.5.2	RDHC du véhicule électrique à quatre roues motrices sans la com- mande de la vitesse du véhicule	114

3.5.3	RDHC du véhicule électrique à deux roues motrices avec la commande de la vitesse du véhicule	116
3.6	Conclusion	120
Chapitre 4 Le simulateur ELEVES : Présentation, Résultats de Simulation et Validation		121
4.1	Introduction	121
4.2	Présentation d'ELEVES	121
4.2.1	Structure du simulateur ELEVES	122
4.2.2	Organigramme d'ELEVES	123
4.2.2.1	Le paramétrage des composants	124
4.2.2.2	Les conditions d'expérience	125
4.2.2.3	Création et modification d'architectures	125
4.3	Simulations avec ELEVES	133
4.3.1	Système d'un véhicule à deux roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule	133
4.3.2	Système d'un véhicule à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule	140
4.3.3	Système d'un véhicule à deux roues motrices avec la commande de la vitesse du véhicule	145
4.4	Validation avec Matlab/Simulink	150
4.4.1	Système d'un véhicule à deux roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule	150
4.4.2	Système d'un véhicule à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule	155
4.4.3	Système d'un véhicule à deux roues motrice avec la commande de la vitesse du véhicule	159
4.5	Analyse	163
4.6	Synthèse comparative	163
4.7	Conclusion	165
Conclusion générale		167
Bibliographie		169
Annexe 1		177

Table des figures

1.1	La Jamais Contente	7
1.2	Motorisation hybride série	15
1.3	Motorisation hybride parallèle	16
1.4	Véhicule tout électrique	17
1.5	Solution monomoteur avec boîte de vitesse	19
1.6	Solution monomoteur avec réducteur fixe	19
1.7	Motorisation Multimoteurs	20
1.8	Moteur Roue	21
1.9	Caractéristique Effort/Vitesse d’engins moteurs dans le domaine du transport	27
1.10	Comparatif des rendements	27
1.11	L’énergie massique en fonction de puissance massique pour différents types d’accumulateurs	36
1.12	Pile à combustible de type PEM alimentée en hydrogène et en oxygène . .	39
1.13	Quelques couplages présents au sein d’un véhicule électrique	43
2.1	Déformation du pneu sous l’action d’une sollicitation latérale	51
2.2	Puissance requise aux roues pour une voiture urbaine à vitesse stabilisée .	53
2.3	Structure général du véhicule étudié	55
2.4	Mouvement du véhicule dans le système d’axes (X,Y)	56
2.5	Forces au niveau des roues du véhicule, dans le plan (x,y)	58
2.6	Contraintes à l’interface et glissement	60
2.7	Efforts sur une roue sous l’action d’un couple moteur	61
2.8	glissement latéral de la roue	62
2.9	Profil du coefficient d’adhérence longitudinal en fonction du glissement d’une roue	63
2.10	Courbes de l’adhérence pour différents revêtements de la route	64

2.11	Schéma représentatif des grandeurs mécaniques du véhicule étudié	64
2.12	Coefficient d'adhérence longitudinal	66
2.13	Représentation Symbolique de la machine triphasée étudiée	68
2.14	Couplage entre mécanique et motorisation	70
2.15	Forces agissant sur un véhicule dans un cas général de mouvement	71
2.16	Bibliothèque de la REM et sa SMC	73
2.17	REM des sources, électrique et mécanique	75
2.18	REM de l'onduleur	76
2.19	REM du MSAP	78
2.20	REM de la roue	78
2.21	REM du couplage mécanique	79
2.22	REM du châssis	79
2.23	REM du système d'application	80
2.24	REM et sa SMC du système d'application	81
2.25	L'inversion du MSAP	82
3.1	Bond graph : transfert de puissance de A vers B	86
3.2	Tétraèdre de Paynter	88
3.3	Moteur à courant continu	92
3.4	Bond graph du moteur à courant continu	92
3.5	Bond graph causal du moteur à courant continu	93
3.6	Type de jonctions contrôlées	95
3.7	Circuit représentant un hacheur et son bond graph hybride	95
3.8	Les configurations ON/ON et OFF/OFF du hacheur	96
3.9	Éléments d'un RDCC	97
3.10	RDCC d'une bobine	98
3.11	Exemple électrique	99
3.12	RDCC d'une source de tension (Modèle source effort)	99
3.13	RDCC d'une résistance (Modèle résistance)	99
3.14	RDCC d'une source de courant (Modèle source flux)	100
3.15	RDCC global du circuit électrique	100
3.16	Schéma, modèle électrique et RDHC d'une diode	101
3.17	Circuit RLC en série	104
3.18	Hacheur	105
3.19	Modèle RDHC du Hacheur de la figure (FIG. 3.18)	106

3.20	Modèle RDHC du Hacheur : Transistor passant et Diode Bloquée	106
3.21	Modèle RDHC du Hacheur : Transistor bloqué et Diode passante	107
3.22	Modèle RDHC du Hacheur : Transistor bloqué et Diode Bloquée	107
3.23	Organigramme de traitement des configurations	108
3.24	Le changement entre deux configurations réelles	110
3.25	Composant représentant la dynamique du véhicule et son modèle RDHC équivalent	114
3.26	Composant représentant la motorisation électrique et le modèle RDHC équivalent	115
3.27	Onduleur utilisé	115
3.28	Composant représentant la partie dynamique du véhicule et le modèle RDHC équivalent	116
3.29	Le MSAP	117
3.30	RDHC du modèle- dq du MSAP	117
3.31	RDHC de l'inversion du MSAP	118
3.32	RDHC du couplage mécanique, de la roue et du châssis	118
3.33	RDHC de l'inversion du châssis, du couplage mécanique et des roues	119
4.1	Interface graphique d'ELEVES	122
4.2	Organigramme de simulation dans ELEVES	123
4.3	Le paramétrage du système par composant	124
4.4	Le gestion de simulation et la bibliothèque des composants	125
4.5	Bibliothèques du logiciel SimRDHC	126
4.6	L'assistant de création de nouveau composant	127
4.7	Attribuer une image à un composant	128
4.8	Développement de RDCC effort	128
4.9	Développement de RDCC flux	128
4.10	Paramétrage du composant	129
4.11	Phase d'initialisation de la simulation	129
4.12	Champs d'un composant	130
4.13	Procédure de la simulation	131
4.14	L'éditeur d'image	132
4.15	Schéma de simulation ELEVES du VE à 2 moteurs	133
4.16	La consigne de l'angle de braquage	134
4.17	La vitesse longitudinale du véhicule v_x	135

Table des figures

4.18	La vitesse latérale du véhicule v_y	136
4.19	La vitesse angulaire du véhicule r	136
4.20	Trajectoire tracée par le véhicule	136
4.21	Forces de traction générées par les moteurs	137
4.22	Vitesses de rotation de moteurs	137
4.23	Couples électromagnétiques de moteurs	138
4.24	Tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2	139
4.25	Courants du MSAP2	139
4.26	Système simulé sous ELEVES	140
4.27	Angle de braquage δ	141
4.28	Vitesse longitudinale v_x du véhicule	141
4.29	Vitesse latérale v_x et angulaire r du véhicule	142
4.30	Trajectoire tracée par l'automobile	142
4.31	Forces de traction des moteurs	143
4.32	Vitesses de rotation de moteurs	143
4.33	Couples résistants de moteurs	143
4.34	Tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2	144
4.35	Courants du MSAP2	144
4.36	Système simulé sous ELEVES (2-moteurs avec commande)	145
4.37	Vitesse de référence	146
4.38	Consignes du virage	146
4.39	Fonction de modulation de l'onduleur gauche	147
4.40	La vitesse de référence et celle du véhicule	148
4.41	Vitesses angulaires des roues	148
4.42	Couple électromagnétique du MSAP gauche	148
4.43	Tensions du MSAP gauche dans le repère dq	149
4.44	Tensions statoriques (U_a, U_b, U_c) du MSAP gauche	149
4.45	Système simulé sous Matlab/Simulink (2-Moteurs)	150
4.46	Modèle Simulink du MSAP2	151
4.47	Modèle Simulink de l'onduleur	151
4.48	Vitesse longitudinale v_x	152
4.49	Vitesse latérale v_y	152
4.50	Vitesse angulaire du véhicule r	152
4.51	Distance parcourue par le véhicule	153

4.52	Forces de traction générées par les moteurs	153
4.53	Vitesses angulaires de moteurs	153
4.54	Couples électromagnétiques de moteurs	153
4.55	Tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2	154
4.56	Courants du MSAP2	154
4.57	Système simulé sous Matlab/Simulink	155
4.58	Vitesse longitudinale du véhicule	156
4.59	Vitesse latérale et vitesse angulaire du véhicule	156
4.60	Trajet parcouru par le véhicule	157
4.61	Forces de traction de moteurs	157
4.62	Vitesses de rotation de moteurs	158
4.63	Couples résistants de moteurs	158
4.64	Tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2	158
4.65	Courants du MSAP2	159
4.66	Modèle Matlab/Simulink du VE à 2-moteurs avec commande	160
4.67	Fonction de modulation pour le MSAP gauche	160
4.68	Vitesses de rotation des roues	161
4.69	La vitesse de référence et celle du véhicule	161
4.70	Couple électromagnétique du MSAP gauche	161
4.71	Tensions du MSAP gauche dans le repère dq	162
4.72	Tensions statoriques du MSAP gauche	162
1	Ouvrir une nouvelle application	179
2	Réalisation du schéma global	180
3	Le fichier (*.cir)	181
4	Le fichier (*.net)	181
5	Visualisation du RDCC	182
6	Module de modification	183
7	Modifier les paramètres	183
8	Lancement de Tcourbe	184

Liste des tableaux

1.1	Historique	7
1.2	Evolution des trois filières de traction aux Etats-Unis	9
1.3	Composants et caractéristiques de Electrovair I et II	10
1.4	Composants et caractéristiques GM EV	10
1.5	Caractéristiques des composants pour différents VE	11
1.6	Résumé des avantages et inconvénients des diverses architectures présentées	18
1.7	Comparatif des technologies moteurs électriques	29
1.8	Caractéristiques des différentes batteries pour une application VE	36
1.9	Les différents types de pile à combustible	39
2.1	Glossaire des variables utilisées lors du bilan des efforts	52
2.2	Puissance maximale nécessaire pour divers véhicules	54
2.3	Facteur de glissement : lois et valeurs	62
3.1	Équivalences des variables généralisées dans des domaines physiques	87
3.2	Éléments de jonction de bond graph	89
3.3	Règles d'affectation de la causalité aux éléments	90
3.4	Règles d'affectation de la causalité aux jonctions	91
3.5	Equations des jonctions et des éléments	94
3.6	RDCC effort, RDCC flux et lois du circuit RLC	104
4.1	Paramètres des moteurs	135
4.2	Paramètres du véhicule	135
4.3	Comparaison entre ELEVES et Matlab/simulink	165
1	Véhicules hybrides ou assistés électriquement	177
2	Petits véhicules de transport et de convoyage	177
3	Véhicules deux ou trois-roues	178

4 Bateaux de plaisance tout électriques 178

Introduction générale

Dans le contexte énergétique actuel (pénurie et pollution des énergies fossiles), l'automobile occupe l'univers quotidien de notre société. En effet, les pollutions sonores et par gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation de carburant en constante augmentation, impliquent de plus en plus cet objet de consommation au cœur des débats autour de l'énergie. Le véhicule électrique (VE) est l'une des solutions préconisées, par les constructeurs automobiles et les organismes de recherche, pour remplacer peu à peu les véhicules classiques notamment dans les centres villes. Le devenir de l'automobile dans les prochaines années est donc un sujet de recherche d'actualité. Ces dernières années, ce sont la recherche d'une meilleure qualité de vie, les contraintes environnementales et économiques ainsi que l'économie de l'énergie qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement du véhicule électrique. La réussite dans ce domaine proviendra d'un subtil mélange entre une vision scientifique de haut niveau et une maîtrise de la technologie. Dans cette combinatoire, l'électricité jouera un rôle fondamental et contribuera à atteindre les nouveaux objectifs de l'automobile en termes d'économie d'énergie et d'environnement.

Contrairement aux applications monodisciplinaires, la difficulté de la modélisation énergétique et dynamique d'un véhicule réside dans la représentation d'un système complexe pluridisciplinaire. Cette difficulté est d'autant plus importante que le véhicule dispose de plusieurs sources d'énergie embarquées qui, soit participent à son mouvement, soit assurent des fonctions autres que la traction. De plus, un système est un ensemble complexe d'éléments en interaction. Cette définition met en évidence le mot interaction (ou couplage) qui prend, dans le contexte d'étude, une importance toute particulière. En effet, ces couplages sont eux-aussi à la source de la complexité des systèmes et peuvent être présents sous différentes formes (couplages entre les éléments, couplages entre les disciplines, couplages avec l'environnement).

La simulation est devenue un passage obligé pour concevoir, caractériser, comman-

der ou surveiller un processus quelconque. La conjonction des moyens de calcul et du progrès importants dans le domaine de l'analyse numérique, a permis le développement de plusieurs outils de simulation numérique qui ont remplacé petit à petit les simulateurs analogiques. Dans le domaine des transports, la technique de la modélisation présente un intérêt économique considérable étant donné le coût que représente la réalisation d'un prototype de véhicule et la complexité grandissante des architectures innovantes à prendre en compte. C'est dans ce contexte que nous développons dans ce mémoire notre simulateur ELEctric VEhicle Simulator (ELEVES). Ce simulateur permet d'une part de reproduire de façon fiable le comportement dynamique et électrique du véhicule, d'autre part de proposer de nouvelles solutions d'agencement et de gestion de l'énergie pour des architectures plus complexes.

La présentation de l'outil de modélisation et simulation, ainsi que ses applications sont progressivement introduites. Pour cela, nous avons décomposé le rapport de thèse en quatre chapitres.

Le premier chapitre a pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant sur ce vaste domaine qui est le véhicule électrique. Il commence par une présentation de l'état de l'art de la traction électrique (le choix du type de configuration, le choix du moteur et la source d'énergie). Ensuite, la simulation et la problématique de la systémique (le choix de méthodes pour la modélisation) seront exposées. Enfin, une exposition de quelques logiciels existants nous permet d'en tirer les objectifs de notre contribution au développement du simulateur ELEVES.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons d'abord un modèle à trois degrés de libertés, traduisant la dynamique du véhicule : l'évolution du déplacement longitudinal (par rapport à l'axe X), du déplacement latéral (par rapport à l'axe Y) et le lacet (rotation autour de l'axe Z) du véhicule. Ensuite, nous développons une modélisation de la partie électrique (moteur-convertisseur). Enfin, une Représentation Energétique Macroscopique (REM) du système (parties mécanique et électrique) et sa Structure Maximale de Commande (SMC) seront illustrées sur la commande de la vitesse du VE.

Nous consacrons la première partie du troisième chapitre à la présentation des principes des deux formalismes graphiques parmi les plus utilisés dans le domaine de simulation à savoir, le Bond Graph (BG) et le Réseau Dynamique Hybride à Composants

(RDHC). Une comparaison entre ces derniers est ensuite présentée dans une optique de simulation des véhicules électriques. Les arguments en faveur du choix du modèle RDHC seront mis en évidence pour le développement du logiciel ELEVES objet de ce travail. La deuxième partie de ce chapitre fera la lumière sur les modèles RDHC des trois systèmes traités. Le premier est un VE à deux roues motrices et le deuxième est un VE à quatre roues motrices ; tous les deux étant réalisés sans la commande de la vitesse du véhicule. Le troisième système est un VE à deux roues motrices avec la commande de la vitesse du véhicule.

Quant au quatrième chapitre, nous y présentons l'organigramme du logiciel ELEVES pour lequel le principe de fonctionnement et les bibliothèques sont exposés et détaillés. Puis, nous montrons à travers le traitement de trois configurations de traction du VE, les étapes suivies lors de la réalisation d'une application ELEVES. Enfin, nous confrontons les résultats de notre outil avec ceux fournis par le logiciel Matlab/Simulink.

Chapitre 1

Enjeux et Problématiques du Véhicule Électrique

1.1 Introduction

Tout au long de son histoire, l'Homme s'est forcé d'étendre le rayon de ses activités, ce qui l'a toujours entraîné à améliorer les techniques de transport. Chaque nouveau progrès des transports a modifié la vie humaine.

Née il y a plus de cent ans, l'automobile occupe notre univers quotidien. C'est une invention très originale qui a su au fil des ans, se faire une place en tant qu'instrument de transport, objet de haute technologie, bien de consommation et de représentation de notre comportement social. Le devenir de l'automobile dans les prochaines années sera donc un sujet de recherche d'actualité.

L'idée d'utiliser l'énergie électrique pour la motorisation des véhicules n'est pas nouvelle, les premières voitures sans chevaux ont été propulsées en grande partie par des moteurs électriques. Ainsi, à la fin du XIX^{ème} siècle, on compte une centaine de prototypes plus ou moins rudimentaires, alimentés par des accumulateurs, qui parcourent les autodromes d'Europe et des États-Unis.

La réussite dans ce domaine proviendra d'un subtil mélange entre une vision scientifique de haut niveau et une maîtrise de la technologie. Dans cette combinatoire, l'électricité jouera un rôle fondamental et contribuera à atteindre les nouveaux objectifs de l'automobile en termes de sécurité, de confort et d'environnement.

Depuis peu, ce sont la recherche d'une meilleure qualité de vie, les contraintes environnementales et économiques ainsi que la conservation de l'énergie qui constituent les

facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement du véhicule électrique (VE) [Westbrook, 2001], [Hodkinson et Fenton, 2001], [Terashima *et al.*, 1997], [Husain, 2003], [Sakai *et al.*, 1999]. Ce mode de transport apparaît donc comme une nouvelle façon de vivre en ville ou en banlieue proche, avec moins de bruit, moins de gaz d'échappement, une conduite plus calme et très sûrement comme un véhicule en libre service, que les usages se partagent.

A la lumière du progrès dans la recherche et le développement de nombreux prototypes de VE, des produits commerciaux tels que le General Motors EV1, Peugeot 106E, Ford Ranger EV et Toyota RAV 4-EV ont trouvé leurs places sur le marché durant les dernières années [Esmailzadeh *et al.*, 2001]. Selon la tendance rapide et progressive des technologies relatives concernant en particulier, les moteurs électriques, leurs alimentations et leurs contrôles électroniques, le secteur des batteries et leur charge, les matériaux, le design, l'aérodynamisme et, enfin, la production et la distribution d'énergie, il est fort probable que les VE joueront un rôle très important dans les systèmes publics et privés de transport dans les années à venir [Husain, 2003].

Ce chapitre a pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant sur ce vaste domaine qui est la voiture électrique. Il commence par une présentation de l'état de l'art de la traction électrique (le choix du type de configuration, le choix du moteur et de la source d'énergie). Ensuite, la simulation et la problématique de la systémique (le choix des méthodes pour la modélisation) seront évoqués. Enfin, une exposition de quelques logiciels existants nous permet d'en tirer nos objectifs dans la démarche de développement d'un simulateur pour le VE.

1.2 Historique

Avant les années 1830, les moyens de transport utilisaient seulement de la puissance vapeur, parce que les lois de l'induction électromagnétique, et par conséquent, des moteurs électriques et des générateurs, venaient juste d'être découvertes. Faraday a démontré le principe du moteur électrique en 1820 par une barre de fer portant un courant électrique et un aimant. En 1831 il a découvert les lois de l'induction électromagnétique qui ont permis le développement et la démonstration des moteurs électriques et des générateurs essentiels pour le transport électrique.

L'évolution de l'industrie automobile entre 1830 et 1900 peut se résumer aux dates clés suivantes (TAB. 1.1) [Husain, 2003] [Westbrook, 2001] :

TAB. 1.1 – Historique

1830	transport à puissance de vapeur
1831	loi de Faraday, ensuite l'invention de moteur à courant continu MCC
1834	voiture électrique à batteries non rechargeables
1859	développement d'un accumulateur de plomb
1885	véhicules à moteur à essence
1900	4200 automobiles se sont vendues dont 40% à puissance de vapeur, 38% à puissance électrique et 22% à moteur à essence

A la fin du 19^{ème} siècle, plusieurs automobiles électriques alimentées par des accumulateurs électrochimiques, furent réalisées et testées en pensant à leur industrialisation. A cette époque où les moteurs thermiques étaient loin du stade actuel, il semblait que la propulsion électrique avait ses chances, grâce aux performances honorables atteintes par les prototypes qui furent réalisés. Ainsi, la fameuse Jamais Contente roula à 105 km/h en 1899, et en 1901, un trajet de 307 km sans recharge fut parcouru [Multon, 2001], [Kant, 1995].



FIG. 1.1 – La Jamais Contente

En 1901, compte tenu de ces performances, le plus bel avenir semble être promis au véhicule électrique. Ainsi, on imagine installer des postes de charge là où l'on pourrait, pendant la nuit, recharger la batterie d'accumulateurs épuisée par une journée d'utilisation ou changer une batterie vide par une autre pleine. Cependant dès 1907, les journaux affirment que le véhicule électrique est en déperdition ; bien qu'il ne présente pas d'inconvénient de démarrage et qu'il soit propre, il reste une voiture de ville ou de luxe, très facile à conduire, par exemple pour la promenade. Il n'a qu'un seul moteur électrique, léger mais robuste. Il peut développer une puissance double de la puissance normale sans

échauffement dangereux. Ses deux groupes de batterie (devant et derrière) de 110 V sont des accumulateurs solides et de grande capacité pour de long parcours et il est rapide [Beretta, 2005]. Mais son prix reste encore souvent assez élevé, du fait même de cette batterie d'accumulateurs qui lui assure son autonomie énergétique. Les facteurs qui ont menés à la disparition des VE, après sa période courte de succès, étaient [Husain, 2003] [Beretta, 2005] :

1. l'invention d'un démarreur en 1911 qui a facilité le démarrage des véhicules à gaz,
2. le prix de revient très élevé des VE,
3. l'accès limité à l'électricité et au rechargement des batteries dans les secteurs ruraux, tandis que l'essence pourrait être vendue dans ces secteurs ;
4. la faiblesse de l'autonomie des accumulateurs (batteries) ;
5. Enfin, le modèle T de Ford en 1909 donne le départ à la popularité des véhicules fonctionnant à l'essence, matière supérieure comme source autonome d'énergie, et à leur emprise durable sur le marché.

Dans le nouveau continent, l'aventure de la voiture électrique débute en 1894 à Philadelphie où deux constructeurs, Henry Morris et Pedro Salom, fabriquent une première voiture expérimentale : *l'Electrobat*. c'est un véhicule doté d'un moteur électrique pour chaque roue et dont l'autonomie est de 40 km à une vitesse constante de 32 km/h. Dès l'année suivante, ils en commencent une production en série, notamment destinée aux flottes de taxis de Philadelphie et New York [Beretta, 2005].

Mais c'est avec l'industriel Albert Pope, fabricant de cycles, que le marché démarre vraiment. Il propose toute une gamme de véhicules électriques, en particulier la *Columbia*, voiture de ville à deux ou quatre places, qui connaît un grand succès. Puis viennent s'ajouter au marché des marques déjà réputées comme *Baker* de Cleveland, *Riker* d'Elizabethport et *Wood* de Chicago. La cadence annuelle de production de véhicules électriques est alors d'environ cinq cents unités. *Detroit Electric* rejoint les rangs en 1907 et devient la marque la plus connue, celle qui vivra le plus longtemps, jusqu'en 1942. La voiture *Detroit* peut atteindre 36 km/h. Elle est dotée d'une batterie d'accumulateur au plomb comportant quarante deux cellules et quinze plaques, ayant une capacité de 185 AH (Ampère.Heure). Cinq vitesses sont prévues allant de 9 à 36 km/h. Les organes de direction à la disposition de son conducteur sont d'une simplicité remarquable et leur nombre aussi réduit que possible. Le seul organe compliqué est le combinatoire¹ [Beretta, 2005].

¹c'est par l'intermédiaire de cet organe que l'on règle le régime du moteur et par conséquent l'allure de l'automobile. le combinatoire joue, en somme, le rôle de rhéostat

Les voitures électriques américaines sont souvent pourvues d'accumulateurs Edison². Ils présentent de nombreux avantages sur les accumulateurs au plomb tel que celui de pouvoir être rechargés au moyen d'un courant intense, donc de façon bien plus rapide, et d'être utilisés jusqu'à un épuisement complet. Cependant, ils présentent l'inconvénient d'un dangereux dégagement d'hydrogène à la charge. Les batteries au plomb s'améliorent et leur cyclabilité est renforcée. Mais bien qu'elles ne cessent de progresser, passant de 13 à 18 Wh/kg entre 1913 et 1930, elles rendent l'entretien du véhicule coûteux, ce qui lui fait perdre une partie de son agrément [Husain, 2003] [Ehsani *et al.*, 2005].

Le succès (très éphémère!) du véhicule électrique est tel que B. S. Hender estime, qu'au début du siècle dernier, il en a circulé dans le monde plusieurs dizaines de milliers. J. L. Haetman, E. J. Cairns et E. H. Hietbrink chiffrent à 10 000 le nombre de véhicules électriques (6 000 voitures individuelles et 4 000 voitures commerciales) produits aux Etats-Unis en 1912, année apogée du VE. Deux ans plus tard, la production de voitures particulières était retombée à moins de 5 000 et ne présentait plus que 1 % de la production totale aux Etats-Unis, même si c'est en 1914 que Milburn Wagon Co, industrie de voiture à chevaux de l'Ohio, présente un véhicule électrique dont 7 000 exemplaires seront vendus [Beretta, 2005].

Comme on le voit sur le tableau (TAB. 1.2), les ventes déclinent pour cesser pratiquement en 1918. En effet, différents progrès ont favorisé le développement des voitures à essence. On en cite une autonomie supérieure, un ravitaillement pratique, une amélioration des routes facilitant les randonnées hors des villes, et surtout, l'apparition dès 1912, d'un système associé de démarreur électrique et d'éclairage proposé par la Dayton Engineering Laboratories Company (DELCO). Aux Etats-Unis, en 1921, on ne compte plus que 18200 véhicules électriques sur 9 millions de véhicules. Dix ans plus tard, les VE ne figurent plus dans les statistiques.

TAB. 1.2 – Evolution des trois filières de traction aux Etats-Unis

	Electrique	Essence	Vapeur
1899	1575	936	1681
1904	1495	18699	1568
1909	3826	120393	2374
1914	4669	564385	-
1924	391	3185490	-

Dans les années 1960, les VE ont recommencé à révolutionner de nouveau le domaine

²des accumulateurs nickel/fer

de l'automobile, à cause du danger environnemental provoqué par les émissions d'ICEV (Internal Combustion Engine Vehicles). Les fabricants principaux d'ICEV, comme General Motor (GM) et Ford sont devenus impliqués dans la recherche et le développement de VE. GM a commencé un programme de 15 millions de dollars qui a abouti aux véhicules appelés Electrovair et Eletrovan. Les composants et les caractéristiques de deux véhicules de type Electrovair (Electrovair I en 1964 et Electrovair II en 1966) sont illustrés dans le tableau (TAB. 1.3) [Husain, 2003].

TAB. 1.3 – Composants et caractéristiques de Electrovair I et II

Moteur	Induction triphasé, 115 hp (Cheval-Vapeur), 13000 tr/min
Batterie	Ag-Zn (argent-zinc), 512V, 680 lb (Livre)
Commande de moteur	convertisseur DC/AC
Vitesse supérieure	80 milles/h
Gamme	De 40 à 80 milles
Accélération	0-60 milles/h en 15.6 s
Poids de véhicule	3400 Livre

Dans les années 1970, le scénario semblait tourner en faveur des VE, à mesure que les prix d'essence ont considérablement augmenté en raison d'une crise énergétique. En 1975, 352 fourgons électriques ont été livrés aux Etat Unis. Les composants et les caractéristiques du GM EV dans ces années sont résumés dans le tableau (TAB. 1.4) [Husain, 2003].

TAB. 1.4 – Composants et caractéristiques GM EV

Moteur	MCC à excitation séparée, 34 hp, 2400 tr/min
Batterie	Ni-Zn, 120 V, 735 Livre
Batterie auxiliaire	Ni-Zn, 14 V
Commande de moteur	Hacheur à CC
Vitesse supérieure	60 milles/h
Gamme	60-80 milles
Accélération	0-55 milles/h en 27 s

Du début des années 80 à la fin des années 90, d'importantes réalisations furent développées dans le domaine des interrupteurs à semi-conducteurs, de haute puissance et haute fréquence. A ceci, s'ajoute la révolution du microprocesseur qui a permis d'améliorer les convertisseurs de puissance servant à augmenter l'efficacité des moteurs électriques. En 1990, le CARB (California Air Resources Board) [Husain, 2003] [Multon, 2001] [Westbrook, 2001] a fait une législation qui a déclaré qu'en 1998, 2 % des véhicules devaient être des véhicules non polluants (Zero-Emission Vehicle (ZEV)) pour chaque compagnie vendant plus de 35000 véhicules. Ce pourcentage devait augmenter à 5 % en 2001

et jusqu'à 10 % en 2003 [Husain, 2003]. L'initiative de la Californie a été suivie presque immédiatement par le Massachusetts et New York. La réponse des pays constructeurs d'automobiles ne se fait pas attendre. Ainsi, le Japon, en regroupant plusieurs organismes chapeautés par le MITI (Ministry of International Trade and Industry) a conçu, en 1992 L'Electric Vehicle Popularisation Plan. La CEE (Communauté Economique Européenne) a réactivé l'AVERE (Association Européenne des Véhicules Electriques Routiers). En ce qui concerne la France, elle est à l'origine du CITELEC (groupement des villes européennes intéressées par la voiture électrique) et possède son propre organisme de coordination, le GIVE (Groupe Interministériel pour les Véhicules Electriques). Malgré l'opposition de certains constructeurs d'automobiles (surtout américains), le plan Californien s'est réalisé, et il y avait en l'an 2000, 600000 VE sur les routes des Etat Unis, 200000 au Japon et 50000 à 100000 en Europe.

Tous les principaux fabricants des véhicules produisent des VE, dont beaucoup sont disponibles pour la vente ou à la location publique. Nombreux prototypes tels que GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hypermini et Peugeot 106E, sont jusqu'à récemment disponibles. Ces VE utilisent des moteurs à induction, à courant continu ou des moteurs synchrones à aimants permanents ainsi que des batteries au plomb [Husain, 2003]. Le tableau (TAB. 1.5) ainsi que l'Annexe 1 présentent les composants principaux de traction ainsi que quelques caractéristiques pour des exemples de VE [Multon, 2001].

TAB. 1.5 – Caractéristiques des composants pour différents VE

Type	Moteur	Batterie	Autonomie Consommation
Clio électrique	MCC, 21.7 kW maximum, Ventilé, 16 kW permanents	NiCd, 114 V, 11.4 kWh	90 km urbains, 95 km/h maximum
Peugeot 106 electric	MCC excitation séparée, Ventilé, 20 kW maximum, 11 kW permanents, 6700 tr/min maximum	NiCd, 120 V, 12 kWh	80 km urbains, 90 km/h maximum
BMW EI	Synchrone AP, 32 kW, 150 N.m, 8000 tr/min maximum	NaNiCl, 180 V, 21.6 kWh	160 km, 120 km/h maximum
General Motors EVI	Asynchrone à cage, Refroidi à l'eau, 100 kW à 6500 tr/min, 60 kW à 13000 tr/min (vitesse maximum)	Pb-acide, 16.8 kWh	110 km urbains 140 km route
Honda EV plus	Synchrone AP, 275 N.m à 1700 tr/min, 49 kW continus de 1700 à 8700 tr/m	NiMH, 288 V	160 km à 80% de profondeur de décharge
Chevrolet S10 pickup	Asynchrone à cage, 85 kW	Pb-acide, 312 V, 16.2 kWh	60 km urbains, 95 km route
Citroën Berlingo electric	MCC, 28kW	NiCd, 162 V, 25 kWh	95 km urbains

1.3 La chaîne de traction

1.3.1 Définitions de base

Le génie électrique investit de plus en plus l'automobile. Une mutation dans ce domaine est en train de s'accélérer grâce aux contraintes réglementaires environnementales et les lois du marchés liés au confort des usagers.

Dans ce contexte d'une voiture électrique, la terminologie ci-dessous sera adoptée pour tout le rapport.

- *Système de traction* : Ensemble des organes traversés par le flux d'énergie, et qui assurent à un véhicule sa capacité de mouvement. Il est composé d'une chaîne de traction et d'un générateur d'énergie embarquée.
- *Chaîne de traction* : Organe du système de traction assurant la transmission mécanique du mouvement. Elle est composée des roues, du différentiel, de la transmission ou boîte de vitesse (BV) et d'un moteur convertissant l'énergie sortant du générateur embarqué en énergie mécanique.
- *Générateur ou source d'énergie embarquée* : Organe du système de traction assurant le stockage et l'adaptation de l'énergie. Il est composé d'un système de stockage et d'un système d'adaptation (convertisseur et/ou transformateur).
- *Convertisseur d'énergie* : Système qui change la nature de l'énergie (moteur, radiateur, etc.).
- *Transformateur d'énergie* : Système qui conserve la nature de l'énergie mais change son typage (boîte de vitesse, convertisseur électrique DC/AC³).
- *Typage de l'énergie* : Caractérise les paramètres d'une énergie de même nature (pour l'électrique : tension, courant, fréquence,...).
- *Nature de l'énergie* : Caractérise les différentes formes que peut prendre l'énergie (mécanique, électrique, chimique, hydraulique, rayonnante ou nucléaire,...).
- *Un différentiel* est un système mécanique qui a pour fonction de distribuer une vitesse de rotation par répartition de l'effort cinématique, de façon adaptative, immédiate et automatique, aux besoins d'un ensemble mécanique.
- *Un engrenage* est un système mécanique composé de deux roues dentées servant à la transmission du mouvement de rotation. Ces deux roues dentées sont en contact l'une avec l'autre et se transmettent de la puissance par obstacle. Quand il y a plus de deux roues dentées, on parle de train d'engrenages.

³DC/AC=(Direct Current/Alternative Current) convertisseur continu/alternatif.

- *Un réducteur* est un système d'engrenage dont le rapport de transmission est inférieur à 1, pour augmenter le couple moteur d'une rotation.

1.3.2 Motorisation électrique dans le transport

La motorisation électrique dans les transports n'est pas un problème récent. L'énergie électrique est déjà utilisée de manière massive et depuis longtemps dans la traction ferroviaire ; l'exemple le plus connu, qui fait la fierté des chemins de fer français, est le TGV (Train à Grande Vitesse). Aujourd'hui, 44% du réseau SNCF (14 200 km sur 32 000) est électrifié. 90% du trafic de voyageurs et de fret sont assurés par l'électricité [Amara, 2001]. Les transports urbains ou suburbains (métros, RER, tramways et trolleybus) sont majoritairement électrifiés. La traction électrique dans les chemins de fer a permis d'augmenter les charges et la vitesse, du fait de la puissance massique plus élevée. L'électrification des véhicules pose des problèmes différents de ceux du chemin de fer ; elle ne répond pas aux mêmes attentes. L'électrification des chemins de fer répond surtout à des considérations économiques et d'amélioration des performances. Pour les véhicules, l'électrification de tout ou partie de la traction répond plus à des préoccupations d'ordre environnemental ou écologique. On rappellera que de plus en plus de pays mettent en place des lois afin de réduire les rejets polluants des transports. La différence entre la traction électrique des trains et celle des véhicules réside dans le fait que l'alimentation des trains est assurée par des caténaires qui viennent s'alimenter en énergie électrique directement sur le réseau. Pour les véhicules à traction électrique l'énergie est stockée, et le moteur électrique de traction doit répondre à des contraintes beaucoup plus draconiennes.

1.3.3 Inconvénients et avantages des VE

Depuis les premières réalisations de véhicules terrestres électriques, dans les années 1830, le frein essentiel à leur développement a été, et reste encore aujourd'hui, lié aux faibles performances des accumulateurs électriques dont l'énergie massique est comprise entre 30 et 120 Wh/kg, alors que les carburants pétroliers atteignent 12000Wh/kg, soit cent fois plus que les meilleurs accumulateurs électrochimiques actuels. Parmi les principaux freins à la présence significative des VE dans le trafic urbain, citons une autonomie limitée, l'absence d'infrastructures de recharge et un coût d'achat élevé. Ainsi, deux inconvénients notables du VE liés à son système de stockage d'énergie, apparaissent : d'une part, une masse trop élevée d'accumulateurs ou une faible autonomie, d'autre part, une

longue durée de recharge ou une puissance excessive de charge (conditionnée par l'acceptabilité de l'accumulateur et par le coût d'infrastructure). En revanche, ses deux principaux atouts sont l'absence de pollution atmosphérique locale et le faible bruit acoustique. Notons également qu'une telle chaîne de conversion est réversible et qu'elle peut permettre la récupération d'énergie dans les descentes ou lors des freinages. Ainsi, pour pallier à cette faiblesse des accumulateurs électrochimiques, il est intéressant de réaliser des systèmes hybrides produisant de l'électricité à bord du véhicule. Les solutions qui semblent les plus avancées sur le plan industriel combinent un moteur thermique à combustion interne brûlant un combustible (fossile, méthanol, voire hydrogène), un alternateur et un moteur électrique associé à une petite quantité de batteries [Multon, 2001], [Kant, 1995], [Husain, 2003], [Ehsani *et al.*, 2005], [Roby, 2006].

1.4 Principales Configurations des Véhicules

Selon le type d'énergie embarqué à bord du véhicule électrique on distingue deux grandes familles de ces derniers à savoir, le véhicule hybride et le véhicule tout électrique. Dans ce qui suit nous exposons les caractéristiques principales de chacune de ces deux familles.

1.4.1 Les véhicules hybrides

On introduit la notion de véhicule hybride lorsqu'un véhicule à moteur électrique embarque plusieurs sources d'énergies supplémentaires. L'hybridation est aussi l'association d'un moteur à combustion interne avec une machine électrique associée à un système de stockage. Cette dernière permet de diminuer la consommation d'énergie ainsi que les émissions par gaz à effet de serre [Badin *et al.*, 2006]. On distingue alors trois concepts de véhicule hybride :

1. Hybride série ;
2. Hybride parallèle et
3. Le bimode (série-parallèle)

Dans la solution **Hybride série** (FIG. 1.2), le moteur thermique entraîne un générateur électrique qui débite sur une batterie en tampon et alimente le ou les convertisseurs du ou des moteurs électriques de traction.

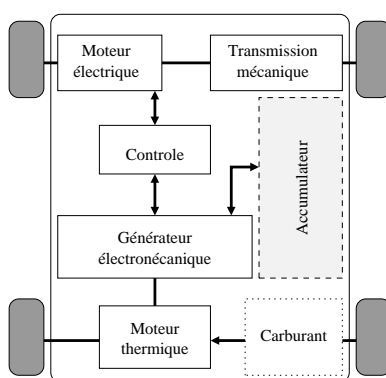


FIG. 1.2 – Motorisation hybride série

Le moteur thermique peut être classique (à combustion interne) mais il peut être aussi une turbine qui présente l'avantage d'une plus grande compacité. Citroën a proposé en 1998 la Saxo Dynavolt, équipée d'un groupe de production d'électricité d'une puissance

de 6.5 kW à base d'un moteur bicylindre deux temps associé à un alternateur, d'une batterie cadmium-nikel et d'un moteur électrique de 20kW. En zone urbaine, le moteur électrique est alimenté par les seules batteries qui procurent une autonomie de 80 km. Pour les longues distances, le groupe thermomécanique offre une autonomie maximale de 340 km [Multon, 2001].

Parmi les avantages du véhicule hybride série on cite son autonomie et sa puissance disponible comparable à un véhicule thermique. De plus, cette configuration offre la possibilité d'une gestion globale de l'énergie présente dans le système (thermique et électrique). Enfin, la batterie, largement sous-dimensionnée par rapport au véhicule tout électrique, devient non limitative d'un point de vue énergétique mais aussi permet le mode de fonctionnement à zéro émission. L'inconvénient majeur de cette configuration est l'importance du système de motorisation de même que pour le véhicule hybride parallèle, avec les mêmes conséquences d'augmentation de la masse, du coût et la diminution de la place disponible [Fodorean, 2005].

La figure (FIG. 1.3) montre la motorisation **Hybride parallèle** qui permet aux deux moteurs, thermique et électrique, de fonctionner ensemble ou séparément, ce qui satisfait aux objectifs routier et urbain avec un surcoût moindre. Le fonctionnement simultané et optimisé des deux moteurs permet d'améliorer le rendement et de réduire la pollution. Volkswagen a présenté dès 1991 la Chico, petite voiture à quatre places équipée d'un moteur thermique bicylindre à essence de 34 chevaux (25 kW) et d'un moteur asynchrone de 6 kW [Multon, 2001].

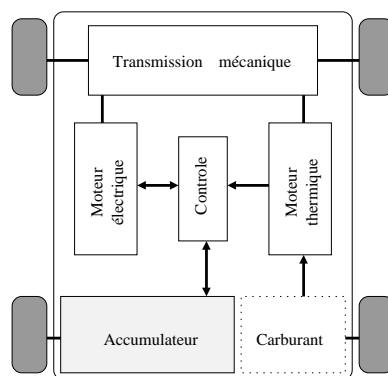


FIG. 1.3 – Motorisation hybride parallèle

Le véhicule hybride parallèle a beaucoup d'avantages, parmi lesquels on cite ses performances et son autonomie qui sont comparables à celles d'un véhicule thermique mais surtout son taux d'émission zéro en mode électrique. Toutefois, il présente des inconvé-

nients majeurs à savoir d'une part le poids et l'encombrement élevés, de son système de motorisation et d'autre part, la redondance de fonctionnalités entre ses deux moteurs [Fodorean, 2005].

Il peut être intéressant de combiner les deux types hybrides précédant pour réaliser un système **série-parallèle** ou bimode. En 1998, Toyota produit, sur ce principe, le premier véhicule hybride (Prius) équipé d'un moteur thermique qui est accouplé à un générateur électrique à aimants associé à une batterie d'accumulateur NiMH, il est également accouplé à un moteur électrique d'une puissance crête de 33 kW [Multon, 2001].

1.4.2 Le véhicule électrique

Il s'agit d'un véhicule qui possède uniquement un accumulateur comme source d'énergie [Fodorean, 2005]. La structure est donnée par le schéma de la figure (FIG. 1.4). Les véhicules tout électriques proposés actuellement sont exclusivement urbains, leur autonomie est comprise entre 70 et 120 km avec des technologies de batteries relativement conventionnelles (plomb-acide et cadmium-nikel) et 150 à 200 km avec des technologies plus avancées (nikel-métal-hydrure et lithium). Le freinage récupératif permet d'accroître sensiblement l'autonomie, surtout en cycle urbain (d'environ 20%). Il permet en outre d'obtenir un frein moteur. Pour ces raisons, il est nécessaire d'avoir un système de conversion réversible [Multon, 2001].

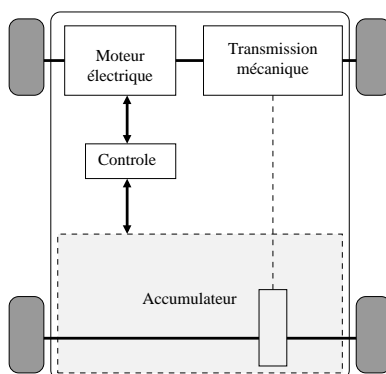


FIG. 1.4 – Véhicule tout électrique

Une confrontation des différentes configurations est présentée dans le tableau (TAB. 1.6).

TAB. 1.6 – Résumé des avantages et inconvénients des diverses architectures présentées

Configuration	Avantages	Inconvénients
Hybride Série	- autonome - puissance comparable au véhicule thermique - batterie largement sous-dimensionnée - fonctionnement en mode zéro émission	- l'importance du système de motorisation - masse élevée - coût élevé
Hybride Parallèle	- autonome et performant - taux d'émission zéro en mode électrique - moins polluant	- encombrement élevé du système de motorisation - masse élevée - coût élevé
Hybride Bimode	- autonomie élevée - le plus commercialisé - comparable aux ICE Véhicules - moins polluant	- complexité de la gestion d'énergie - complexité d'agencement entre ses composants - coût et masse élevés
Tout Electrique	- zéro émission - silencieux - confort d'utilisation	- problème d'autonomie - utilisation urbaine - coût élevé

1.5 Solutions de transmission mécanique dans une chaîne de traction tout électrique

L'objet de la transmission de puissance mécanique est de relier la source d'énergie, le ou les moteurs électriques, aux roues motrices du véhicule ; il s'agit d'adapter la vitesse et le couple du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule.

Nous pouvons envisager plusieurs possibilités d'associations d'éléments nécessaires à la transmission de la puissance qui sont le réducteur mécanique, la boîte de vitesses (BV) et éventuellement le différentiel. Le choix du réducteur est intimement lié, au type de véhicule et au choix du moteur qui a un volume et une masse principalement fonctions de son couple [Mestre, 1997] [Multon, 2001]. Pour réduire la masse embarquée et le coût de la motorisation, on préfère généralement associer le moteur à un réducteur mécanique. Cela permet de réduire le couple que doit fournir le moteur en augmentant sa vitesse de rotation. Il doit être parfaitement adapté aux exigences fonctionnelles du véhicule.

Trois familles de réducteurs sont classiquement mises en œuvre [Mestre, 1997] :

- rapport fixe (Express, Master, Impact, Clio) ;
- rapport variable étagé (J5, C15, Volta) ; et
- rapport continûment variable (Electra).

1.5.1 Solution avec boîte de vitesse mécanique

L'avantage essentiel de cette solution est de permettre l'utilisation d'un moteur à plus faible couple, donc plus léger, pour une vitesse maximale donnée. Remarquons qu'entre deux changements de vitesse (petite plage), si le moteur possède une capacité de fonctionnement à puissance maximale constante, cela peut permettre également la suppression des fluctuations de puissance [Multon, 2001]. La figure (FIG. 1.5) montre cette solution.

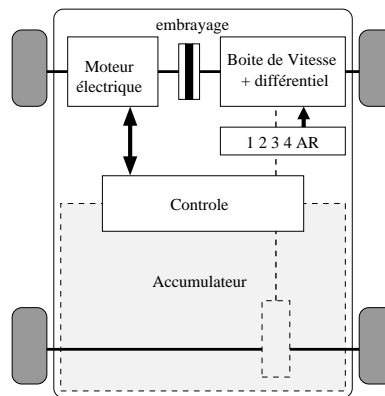


FIG. 1.5 – Solution monomoteur avec boîte de vitesse

1.5.2 Solution avec réducteur mécanique à rapport fixe

Le couple maximal que doit délivrer un tel moteur associé à un réducteur de rapport fixe est supérieur à celui que devrait produire un moteur associé à une boîte de vitesses. Cette solution est illustrée sur la figure (FIG. 1.6).

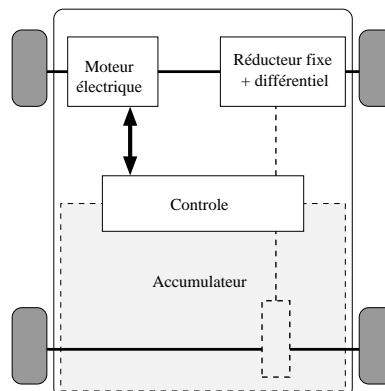


FIG. 1.6 – Solution monomoteur avec réducteur fixe

En effet, les rapports courts aux basses vitesses permettent d'accroître le couple aux roues. Le couple est une grandeur très dimensionnelle et l'absence de boîte de vitesses se paie par un moteur plus lourd, plus encombrant et plus coûteux. Malgré tout, c'est la solution qui est quasi universellement retenue [Multon, 2001].

1.5.3 Solutions multimoteurs

Il peut a priori sembler intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme le différentiel et les doubles joints de cardans, nécessaires dans les deux solutions précédentes. Cela constitue encore un pas, après la suppression de la boîte de vitesses et de l'embrayage, vers la simplification de la chaîne de transmission mécanique. On peut ainsi réaliser des solutions à deux roues motrices soit à l'avant, soit à l'arrière ou encore des solutions à quatre roues motrices. Lorsque les moteurs sont sur les roues directrices, une très grande sécurité de contrôle est requise, ils ne doivent en aucun cas se bloquer lors d'une défaillance [Multon, 2001]. Les moteurs peuvent être associés à un réducteur fixe (il n'est plus possible ici d'avoir une boîte de vitesses) pour accroître le couple massique (FIG. 1.7-a) ; ils peuvent également entraîner directement la roue dans laquelle ils sont alors intégrés (FIG. 1.7-b). Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir recours à des moteurs à très fort couple massique et généralement à rotor extérieur [Pusca, 2002] [Sakai *et al.*, 1999], [Kant, 1995].

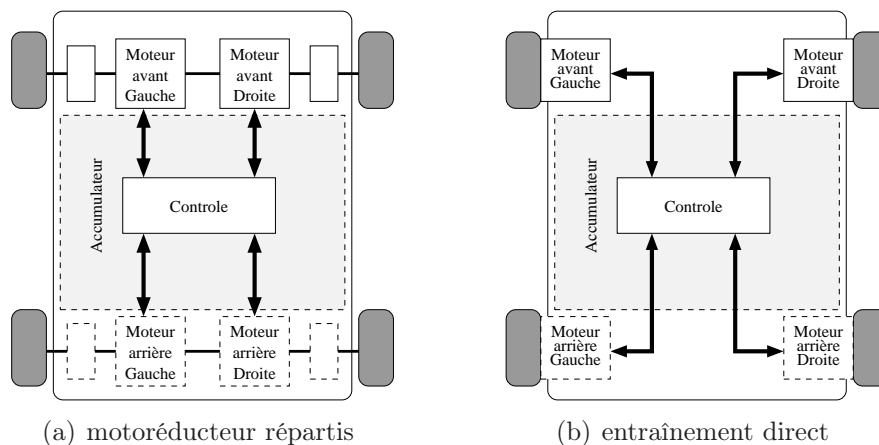


FIG. 1.7 – Motorisation Multimoteurs

Le **moteur-roue** intègre un moteur électrique et d'autres composants dans une configuration compacte qui peut s'insérer dans une roue de dimensions ordinaires. Les convertisseurs de puissance peuvent être installés soit à l'intérieur soit à l'extérieur de la

roue. Il est montré sur la figure (FIG. 1.8) à quoi ressemble ce type du moteur. Ce système permet d'une part de contrôler avec haute précision et indépendamment le couple appliqué à chaque roue et d'autre part de maximiser la capacité du freinage régénératif. L'utilisation de ce type de moteur sur des roues directrices, permet la suppression de toutes les parties mécaniques liées à la transmission (différentiel, boîte de vitesse, embrayage, etc...), de commander indépendamment les roues et en même temps, de libérer de l'espace dans le véhicule, notamment utilisable par les batteries [Tahami *et al.*, 2004] [Mei *et al.*, 2000], [Chen et Tseng, 1996], [Lyshevski *et al.*, 2000], [Yang *et al.*, 2002], [Sakai et Hori, 2001], [Terashima *et al.*, 1997], [Delprat, 2002] [Haddoun *et al.*, 2008] [Haddoun *et al.*, 2007].



FIG. 1.8 – Moteur Roue

Cette grande liberté permet un contrôle indépendant du couple ce qui peut améliorer la sécurité de transport. Les inconvénients de ce type de moteur sont l'augmentation de la masse non-suspendue et la difficulté d'intégrer un réducteur. Ainsi, l'introduction d'un moteur à fort couple dans la roue peut avoir tendance à déstabiliser le véhicule. Enfin, il se pose aussi le problème du freinage, d'une part il faut intégrer au moteur roue le disque de frein et d'autre part il faut tenir compte des échauffements supplémentaires dus à la dissipation d'énergie calorifique lors des phases de freinage [Fodorean, 2005].

1.6 Les organes de traction électrique

Avant de nous lancer dans une description des moteurs, des convertisseurs électroniques et des batteries utilisés à bord des véhicules, nous donnons quelques éléments pour apprécier l'intérêt de l'usage de la traction électrique dans les systèmes de propulsions.

Remarquons tout d'abord que le couple mécanique du moteur électrique résulte de l'action d'un flux d'induction magnétique sur un courant électrique. Dans un moteur, le flux impose les dimensions du moyen magnétique (fer) et le courant impose la section des fils (généralement en cuivre) qui constituent les enroulements.

Ainsi les dimensions d'un moteur électrique dépendent pour une grande part des caractéristiques du couple que l'on veut obtenir.

La puissance d'un moteur est égale au produit du couple par la vitesse de rotation, de sorte que pour une puissance donnée la taille du moteur est d'autant plus petite que sa vitesse de rotation est élevée [Beretta, 2005].

Dans un moteur à courant continu, la vitesse de rotation est limitée :

- Mécaniquement, par les risques de défretage des bobinages et des lames du collecteur ;
- Électriquement, par la commutation du courant entre les lames du connecteur.

Dans la pratique, les moteurs électriques utilisés dans la propulsion des véhicules routiers ont des puissances unitaires inférieures à 50-60 kW et leur tension d'alimentation reste la plupart du temps inférieure à 200 Vcc. Dans ces conditions, il est possible de fabriquer des moteurs à courant continu qui tournent à 5000 tr/mn.

Les moteurs à courant alternatif, du fait de l'absence de collecteur, peuvent atteindre des vitesses de rotation supérieures à celles des moteurs à courant continu. Pour les puissances mises en jeu dans les véhicules routiers classiques, 10 000 tr/mn est une vitesse parfaitement faisable.

De ce fait, la puissance massique d'un moteur à courant alternatif est supérieure à celle d'un moteur à courant continu.

Quelle que soit sa nature (à courant continu ou à courant alternatif) le moteur électrique présente un certain nombre d'avantages [Beretta, 2005] :

1. Il peut fournir un couple à toutes les vitesses et notamment à l'arrêt. Cette propriété permet l'élimination de l'embrayage dans la chaîne de transmission du couple, moyennant une commande appropriée de la tension d'alimentation dans le cas d'un moteur à courant continu, ou par l'onduleur dans le cas d'un moteur à courant alternatif.
2. Il peut supporter des charges brèves, et fournir des surcouples importants, de l'ordre de 2 à 4 fois le couple nominal, pendant la période de démarrage.
3. Il peut être réversible.

1.6.1 Les moteurs électriques

La relation est étroite entre l'augmentation des performances des moteurs et la réalisation des hautes performances des véhicules électriques en exploitation. Il existe trois grandes catégories de moteurs (à courant continu, asynchrone et synchrone).

En ce qui concerne le choix d'une technologie de motorisation, la solution de référence a été pendant longtemps la motorisation à courant continu [Westbrook, 2001], soit dans sa version à excitation série, solution robuste qui présente de manière intrinsèque une caractéristique à la traction (Volta), soit plus récemment, dans sa version à excitation séparée commandée par hacheur (Express). Mais l'évolution de l'électronique de puissance et des matériaux tel que les aimants permanents conduit aujourd'hui à s'orienter vers des solutions plus performantes telles que les motorisations synchrones ou asynchrone [Mestre, 1997].

1.6.1.1 Moteurs à courant continu (MCC)

Parmi les différents types de moteurs à courant continu (moteur série, moteur à excitation séparée, moteur à aimants permanents), c'est essentiellement le moteur à excitation séparée qui est utilisé. C'est la solution la plus économique et la plus fiable grâce à son convertisseur d'induit du type hacheur à deux interrupteurs et un hacheur d'inducteur de plus faible puissance. Mais cette technologie comporte les inconvénients suivants [Beretta, 2005], [Husain, 2003], [Ehsani *et al.*, 2005] :

- la difficulté de refroidissement de l'induit tournant ce qui limite l'obtention des possibilités d'un couple massique élevé ;
- la vitesse de rotation de l'induit est limitée par sa constitution ;
- l'usure des balais nécessitant un entretien périodique pour enlever les poussières conductrices qui nuisent à l'isolement du collecteur ;
- le coût de construction est élevé car la machine est complexe : collecteur, bobinage de l'induit.

1.6.1.2 Moteurs asynchrones (MAS)

Le moteur asynchrone à cage est robuste, assez bon marché et facilement industrialisable. Il a une puissance massique assez élevée, ce qui conduit à un bon rendement pour la chaîne de traction. Le MAS est le candidat le plus adapté pour propulser les véhicules hybrides électriques (HEV) [Zeraoulia *et al.*, 2006].

Cependant, la principale difficulté reste son pilotage. L'excitation étant induite par les courants statoriques, la commande séparée du couple et du flux est difficile à faire. Le pilotage de la machine asynchrone par commande vectorielle est géré par microprocesseur. Toutefois, l'accroissement des performances des calculateurs et l'intégration poussée de cette commande ont donné lieu à une solution fiable à un coût raisonnable [Beretta, 2005],

[Husain, 2003], [Ehsani *et al.*, 2005].

1.6.1.3 Moteurs synchrones

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons les plus fréquentes dans la littérature :

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) semble à plus d'un titre, une solution adaptée pour ses performances techniques et en particulier, sa compacité et son rendement. L'excitation dans ce cas est créée par les aimants permanents. Il existe plusieurs sortes de machines synchrones à aimants permanents dont le couple total est la somme d'un hybride, d'un couple de détente et d'un couple réluctant [Fodorean, 2005] :

- les aimants en surface : le couple réluctant est nul, le rotor ne présentant aucune saillance. Cette machine est dite à pôles lisses.
- les aimants enterrés.
- les aimants à concentration de flux.

Les avantages dont disposent ces machines sont les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse ainsi que leur bon rendement. Cependant le prix des aimants est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente. Le fonctionnement en défluxage dans la zone de fonctionnement à puissance constante est difficile (commande de la machine complexe, risque de désaimantation, pertes électriques supplémentaires dues à l'augmentation du courant statorique) [Beretta, 2005], [Husain, 2003], [Ehsani *et al.*, 2005] [Fodorean, 2005].

Le moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB) est une solution prometteuse pour la traction électrique automobile. Il ressemble au moteur à courant continu, la différence entre eux réside dans la manière de commuter le courant (commutation mécanique pour la machine à courant continu et commutation électronique pour la machine synchrone à rotor bobiné). Le flux d'excitation est créé par un courant que l'on injecte dans les enroulements rotorique. Moyennant l'adjonction d'un hacheur d'inducteur, le MSRB offre un fonctionnement en survitesse aisé à mettre en œuvre. De plus, il est possible de choisir le point de fonctionnement de la machine afin de minimiser les pertes Joule dans l'ensemble convertisseur-machine. Il donne facilement la possibilité de défluxage que l'on peut effectuer par simple réduction du courant d'excitation. Ainsi, cette structure offre un domaine d'exploitation plus étendu que celui des machines à aimants permanents mais

elle offre aussi la possibilité d'adaptation des lois de commande permettant l'optimisation du rendement. Par contre, le rotor nécessite des bagues pour l'alimenter, et les bobines d'excitation sont difficiles à refroidir ; cependant, la densité de courant peut être choisie faible pour diminuer les pertes. Les contacts glissants (balais - bagues) limitent le fonctionnement à très haute vitesse de ce type de machines à cause de l'usure des balais. Le rendement et le rapport couple/vitesse sont relativement faibles par rapport à ceux des machines à aimants permanents et cela à cause des pertes au rotor [Beretta, 2005], [Husain, 2003], [Ehsani *et al.*, 2005], [Fodorean, 2005].

Le moteur à réluctance variable (MRV) : Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet réluctance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif.

Le rotor est construit de manière à ce que le rapport entre l'inductance dans l'axe direct et l'axe en quadrature (L_d/L_q) soit le plus important possible. La plage de fonctionnement en vitesse à puissance constante est directement liée à ce rapport. Il en est de même pour le facteur de puissance (plus ce rapport est élevé plus le facteur de puissance est grand). L'obtention d'un rapport (L_d/L_q) élevé induit des contraintes au niveau de la fabrication, qui se répercutent négativement sur le coût.

Les inconvénients pour ce type de machine se résument par la délicatesse de la fabrication à cause de la nécessité d'un rapport de saillance élevé, la faiblesse du facteur de puissance et la complexité de l'électronique de commande nécessitant un capteur de position. Les avantages principaux de ces machines sont la possibilité de fonctionnement à vitesse élevée (grâce à la passivité du rotor) et le rendement relativement élevé par rapport à la machine asynchrone [Beretta, 2005], [Husain, 2003], [Ehsani *et al.*, 2005], [Fodorean, 2005].

Le moteur synchrone à double excitation (MSDE) : L'utilisation des aimants permanents permet d'augmenter significativement le rendement et le rapport couple/masse ou la compacité de la machine (rapport couple volume). Cela nous pousse à opter pour une machine à aimants permanents. Mais l'utilisation des aimants engendre un problème lié à la nature de leur flux d'excitation. Pour les machines associées à des convertisseurs commandés, il est possible par la commande du courant d'induit de réduire le flux total et d'augmenter la plage de fonctionnement en vitesse. Il faut cependant que la réaction magnétique d'induit soit comparable au flux des aimants.

Par contre, en cas de perte de contrôle, le problème reste entier. Pour remédier ce problème, plusieurs équipes de recherche ont mis en lumière de nouvelles structures dites à double excitation. Le flux d'excitation est créé par deux sources différentes ; l'une est à aimants permanents, l'autre bobinée (le plus souvent) ou à aimant permanents (le défluxage mécanique), le but recherché étant d'utiliser la deuxième source d'excitation pour contrôler le flux dans l'entrefer.

Selon la manière dont sont agencés les deux circuits d'excitation il y a plusieurs types de machines à double excitation. Nous allons les classer en deux catégories [Fodorean, 2005] :

- machine synchrone à double excitation série : le flux de l'excitation bobinée traverse les aimants. Les flux d'excitation bobinée et celui des aimants empruntent le même chemin. La réduction du flux dans l'entrefer est réalisée en injectant dans les bobines d'excitation un courant qui crée une FMM opposée à celle des aimants. L'inconvénient est que les bobines d'excitation sont magnétiquement en série avec les aimants. Ces derniers possèdent une perméabilité proche de celle de l'air, les bobines d'excitation voient donc une réluctance magnétique élevée, ce qui réduit considérablement l'efficacité du défluxage par les bobines.
- machine synchrone à double excitation parallèle : dans cette configuration, les flux des aimants et de l'excitation bobinée n'ont pas le même trajet tout le temps. Le flux de l'excitation bobinée ne traverse pas les aimants, le risque de démagnétisation des aimants par l'excitation bobinée est ainsi écarté. La double excitation parallèle offre beaucoup de possibilités d'agencement des deux circuits d'excitation.

1.6.1.4 Le fonctionnement à puissance maximale constante

Les constructeurs d'automobiles exigent, pour supprimer la boîte de vitesse, un moteur électrique capable de délivrer sa puissance maximale sur une large plage de vitesse.

Le véhicule électrique doit développer un effort à ses jantes supérieur aux efforts résistants présentés par la voiture pour qu'elle puisse démarrer et accélérer. Ces performances sont représentées sur une courbe que l'on appelle la caractéristique Effort/Vitesse du véhicule en mode moteur (FIG. 1.9). La courbe en pointillé représente la résistance à l'avancement sur une route droite horizontale.

A partir de la caractéristique effort/vitesse nous déduisons celle qui se décline sur les moteurs de traction à savoir la caractéristique couple/vitesse de la figure (FIG. 1.10). Cette dernière présente la forme normalisée du couple résistant dans le domaine du trans-

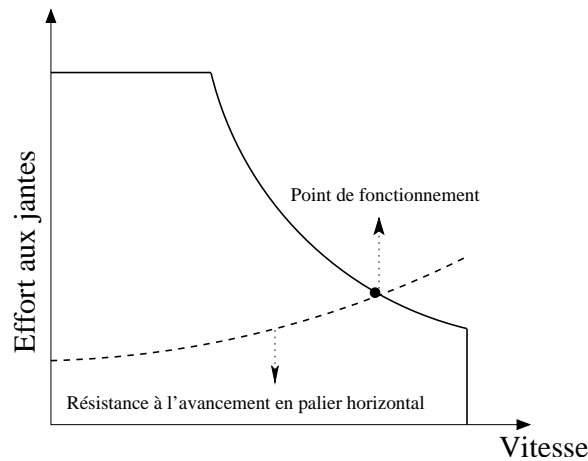


FIG. 1.9 – Caractéristique Effort/Vitesse d’engins moteurs dans le domaine du transport

port électrique. On distingue deux zones de fonctionnement, dans la première, le moteur électrique fournit un couple constant afin de ramener le véhicule à une première vitesse de croisière appelée vitesse de base. A la limite du système de l’alimentation électronique du moteur, on fait fonctionner celui-ci en puissance absorbée constante, ce qui se traduit par une diminution du couple et une accélération si l’on réduit le flux d’excitation du moteur. Ce dernier régime de fonctionnement atteint une vitesse supérieure à la vitesse de base [Husain, 2003] [Benbouzid *et al.*, 2007].

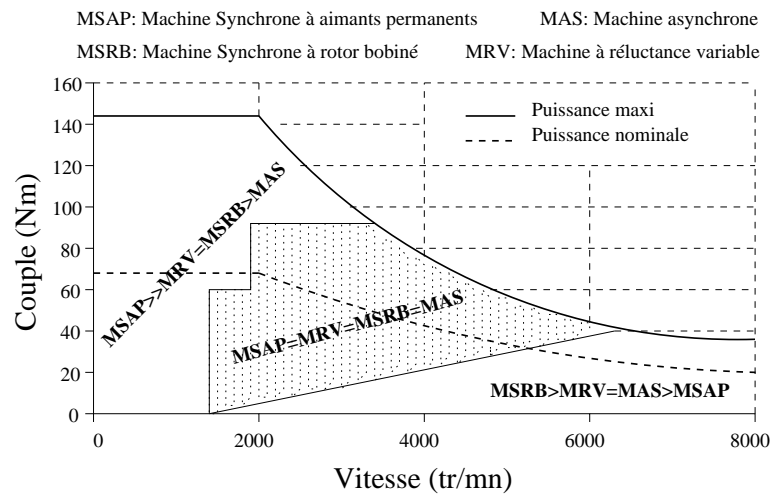


FIG. 1.10 – Comparatif des rendements

Les règles supplémentaires de dimensionnement d’un moteur électrique se traduisent sous la forme de contraintes agissant sur son couple et sa vitesse. Le couple est limité par le volume disponible et la charge linéique que l’on peut obtenir dans la machine, qui elle-même est limitée par les échauffements tolérables maximaux et les phénomènes de

saturation magnétique ; les contraintes sont donc volumiques, thermiques et magnétiques. Quant à la vitesse, elle est limitée par les pertes fer qui détériorent le rendement pour les vitesses élevées et par le comportement mécanique de la machine ; les contraintes sont donc mécaniques et énergétiques [Fodorean, 2005], [Ehsani *et al.*, 2005].

Le moteur électrique, contrairement au moteur thermique à explosion, peut délivrer, s'il est convenablement refroidi, son couple maximal dès l'arrêt. Si, de plus, il peut délivrer sa puissance maximale dans une plage de vitesse suffisamment étendue, on peut éliminer de la chaîne de transmission habituelle, la boîte de vitesse, l'embrayage et leurs organes de commande. Tous les moteurs à commutation électrique (asynchrone, synchrone à rotor bobiné et même à aimants, ainsi qu'à réluctance variable) peuvent fonctionner sur de larges plages de vitesse sans nécessiter de boîte de vitesse en ayant recours au défluxage (réduction du flux dans l'entrefer). Cela introduit bien sûr des contraintes additionnelles pour le dimensionnement, mais avec une réduction assez conséquente sur le coût global.

Le moteur à courant continu à collecteur et à excitation séparée permet aisément d'obtenir un tel fonctionnement. Son couple maximal est atteint au courant d'induit maximal et au flux inducteur maximal. Lorsque sa vitesse arrive à la vitesse de base (nominale), sa tension d'induit atteint sa limite (tension batterie), alors en diminuant le flux d'excitation (défluxer la machine), on peut étendre la plage de vitesse dans une zone dite à puissance maximale constante (PMC) [Xu *et al.*, 1995], [Morimoto *et al.*, 1990]. La tension étant globalement proportionnelle au produit (Flux) \times (vitesse), il est nécessaire de réduire le flux si l'on veut augmenter la vitesse [Amara, 2001] [Beretta, 2005] [Multon, 2001].

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est pénalisé par une limite de température des aimants (135°C) ainsi que par le coût de ceux-ci. En outre, ses zones de bons rendement (FIG. 1.10), bien adaptées au véhicule électrique pur, semblent moins adaptées aux véhicules hybrides ou aux alterno-démarrateurs [Beretta, 2005].

Le MSRB demande une industrialisation plus complexe (bobinage du rotor, bagues et balais).

Le moteur asynchrone est plus difficile à faire fonctionner à puissance constante sur une large plage de vitesse compte tenu des conditions de défluxage.

Sans balais, avec une structure de bobinage minimisant les risques de court-circuit, le moteur à réluctance (SR) variable présente un échauffement moindre en fonctionnement par rapport aux autres technologies de moteurs.

Une rapide confrontation des principales solutions envisageables à l'heure actuelle

est proposée dans le tableau (TAB. 1.7).

TAB. 1.7 – Comparatif des technologies moteurs électriques

	MCC	MAS	MSRB	MSAP	MRV
Rendement maximal	Bon	Passable	Bon	Très bon	Moyen
Rendement moyen	Moyen	Bon	Bon	Très bon	Bon
Vitesse maximale	Passable	Bon	Bon	Bon	Bon
Coût électronique de puissance	Très bon	Passable	Moyen	Moyen	Bon
Coût du moteur	Passable	Bon	Moyen	Moyen	Très bon
Espace couple-vitesse	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon	Bon

On peut conclure alors que pour une application véhicule purement électrique, la solution à aimants permanents est préférée pour de nombreuses raisons : rendement dans la zone d'utilisation véhicule électrique, compacité et masse. En revanche, pour une utilisation polyvalente (alterno-démarrateur, hybride et électrique pur) et dès lors que le critère coût devient le paramètre déterminant, le choix de la machine à réluctance variable semble pertinent par rapport aux solutions synchrones et asynchrones en raison du plus faible coût de fabrication de la machine et du faible coût de réalisation de l'électronique de puissance [Beretta, 2005], [Husain, 2003] [Ehsani *et al.*, 2005].

1.6.2 Les convertisseurs électriques

L'utilisation d'une chaîne de traction électrique dans les véhicules routiers autonomes sous-entend la présence à leur bord d'une source d'énergie électrique qui peut-être :

- une batterie d'accumulateur de capacité appropriée à l'autonomie souhaitée du véhicule dans le cas d'un véhicule tout électrique ;
- une batterie d'accumulateur de plus faible capacité, associée à un groupe thermo-électrique (association d'un moteur thermique et d'un alternateur) ou à une pile à combustible dans le cas d'un véhicule électrique hybride.

Dans la plupart des véhicules électriques, on se trouve confronté à la compatibilité des sources d'énergie à courant continu et à courant alternatif et à l'intérieur d'une même catégorie à des compatibilités entre les tensions des sources et des récepteurs. Ce problème

de compatibilité sous-entend la présence à bord des véhicules électriques de convertisseurs électroniques dont le rôle est de lever les incompatibilités de fonctionnement.

De ce fait on pourra trouver à bord des véhicules :

- des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC-DC), que l'on appelle redresseurs ;
- des convertisseurs de courant continu en courant continu de tension différée (DC-DC) que l'on appelle hacheurs ;
- des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC-AC) que l'on appelle onduleurs.

Le but de cette section n'est pas de donner une description exhaustive de chacun de ces types d'organes mais d'expliquer leurs rôles à bord d'un véhicule automobile.

1.6.2.1 Les redresseurs (AC-DC)

Les redresseurs sont des convertisseurs d'énergie qui transforment une source électrique à courant alternatif en une source électrique à courant continu. Nous pouvons distinguer [Beretta, 2005] :

- des redresseurs à diodes : ces convertisseurs établissent une relation rigide entre la tension continue de sortie et la tension alternative d'entrée ;
- des redresseurs à thyristors, qui permettent de faire varier de manière continue le rapport entre la tension continue récupérée à leurs bornes de sortie et la tension alternative appliquée à leurs bornes d'entrée en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors ;
- des redresseurs mixtes associant des diodes et des thyristors ;
- des groupements de redresseurs à thyristors destinés à améliorer les performances et à diminuer les perturbations ;
- des redresseurs MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui associent des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et des diodes et qui ont pour avantage d'être faiblement perturbateurs des sources alternatives qui les alimentent.

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution général, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur thermique ; en énergie électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques et/ou dans une batterie de grande capacité.

1.6.2.2 Les hacheurs (DC-DC)

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables, différents des valeurs d'entrée et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation de divers récepteurs (moteurs, batteries, etc.).

Dans un véhicule électrique, les hacheurs ont deux usages essentiels :

- ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu ;
- ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc.).

En effet, on ne peut envisager le branchement brutal d'un moteur à courant continu sur une source d'énergie à tension fixe (batterie d'accumulateur par exemple) pour les raisons suivantes :

- aucun réglage du couple moteur ni de la vitesse du moteur ne serait possible ;
- le régime transitoire à la mise sous tension directe du moteur serait destructif tant du point de vue électrique (surintensité) que mécanique (surcouple) ;

L'utilisation d'un hacheur permet en effet de maintenir le courant moteur à la valeur souhaitée tout en assurant le réglage progressif et sans perte notable de la tension du moteur. Il permet également de régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique.

1.6.2.3 Les onduleurs (DC-AC)

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le (ou les) moteur(s) de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

La conversion DC-AC peut être réalisée de multiples manières. Mais l'usage, les particularités des véhicules routiers et la rationalisation des solutions industrielles ont conduit à privilégier une structure d'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels constitués par l'association d'un IGBT et d'une diode montés en antiparallèle et commandés selon une loi du type MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsion, en anglais (PMW)). Ce type de montage permet d'associer une source de tension (de type batterie) et un récepteur de type

source de courant (moteur asynchrone, moteur synchrone bobiné, à aimant permanent ou à réluctance variable). La méthode de commande par MLI présente deux avantages importants [Beretta, 2005] :

- elle repousse vers les fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie ce qui facilite le filtrage de cette tension ;
- elle permet de faire varier le fondamental de la tension de sortie.

Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont le plus souvent déterminés en temps réel au moyen d'une électronique de commande appropriée.

1.6.3 Source d'énergie électrique embarquée

Un des problèmes majeurs des véhicules électriques est la source d'énergie. Dans cette partie, nous présentons de manière succincte deux voies technologiques possibles d'alimentations embarquées. Il s'agit des batteries utilisées dans tous les véhicules électriques actuels, et les piles à combustible, solution d'avenir largement défendue par les spécialistes des véhicules électriques.

1.6.3.1 Les batteries

Pour les véhicules électriques, la technologie utilisée actuellement est celle des batteries respectant les conditions suivantes [Ehsani *et al.*, 2005], [Husain, 2003], [Kant, 1995] :

- une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant de bonnes accélérations ;
- une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie ;
- une tension stable engendrant des performances régulières ;
- une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles de chargement/déchargement, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur ;
- entretien faible et recyclage facile.

Bien que la littérature technique décrive de nombreux accumulateurs, seules les batteries plomb-acide et nickel-cadmium sont aujourd'hui industriellement utilisables [Mosdale, 2003a].

L'accumulateur au plomb, inventé en 1859, est à la fois le plus ancien et le plus utilisé des accumulateurs électrochimiques. Sa tension par élément est de 2 V. Sa version pour la traction automobile, beaucoup plus récente (1970-1975), tente de trouver le meilleur compromis possible entre l'énergie massique et la durée de vie (le nombre de cycles de recharge possible). Elles restent le système le moins cher produit industriellement avec

une des meilleures durées de vie. Leur principal inconvénient est leur faible énergie massique. Cela s'est illustré avec la commercialisation de l'EV1 par General Motors qui a développé une voiture de forte puissance et de faible autonomie équipée de cette technologie. Ford et Chevrolet ont également commercialisé en 1998 des Pick-up de forte puissance et de relativement faible autonomie équipés de cette technologie de batterie, respectivement le Ford Ranger EV et le Chevrolet S10 Electric. Les batteries au plomb se caractérisent actuellement par [Beretta, 2005], [Ehsani *et al.*, 2005], [Husain, 2003], [Kant, 1995] :

- une énergie massique de l'ordre de 40 Wh/kg pour les éléments ouverts et de 30 Wh/kg pour les éléments étanches. Lors d'une décharge en 5 h à courant constant et en utilisation réelle dans un véhicule, ces valeurs sont réduites de 20 % ;
- un nombre de cycles de charge variant entre 600 et 900 sur un banc d'essai ; cette valeur est réduite de moitié sur un véhicule ;
- une mauvaise tenue aux décharges profondes ; les éléments les plus faibles subissent assez souvent, en fin de charge, une inversion électrochimique ;
- une réduction des performances à basse température.

Malgré cela, les batteries au plomb équipent la majeure partie des véhicules électriques produits à ce jour et, elles sont bien placées pour équiper une part importante des véhicules électriques dans les années à venir. Il y a plusieurs raisons à cela [Beretta, 2005], [Ehsani *et al.*, 2005], [Husain, 2003], [Kant, 1995] :

- elles sont les moins chères, les plus fiables et ne posent aucun problème de sécurité ;
- les infrastructures de recyclage des produits usagés sont déjà en place ;
- leur durée de vie s'améliore avec l'utilisation de systèmes intelligents de gestion d'énergie.

Enfin, ce qui paraît essentiel, les recherches en cours sont susceptibles d'aboutir à des progrès sensibles. On doit pouvoir doubler l'énergie massique des accumulateurs au plomb, en améliorant la collection des charges au sein des électrodes et le taux d'utilisation des matériaux actifs. Par ailleurs, une nouvelle technologie, dite *bipolaire* (les électrodes bipolaires comportent une face négative et une face positive, séparées par une paroi étanche conductrice électronique), spécialement adaptée aux véhicules automobiles, qui représentent une grande part de la masse de l'élément. Les gains ainsi obtenus affecteront, d'une façon importante, la puissance et l'énergie massiques, l'encombrement et le coût de fabrication.

L'**accumulateur au nickel-cadmium**, inventé en 1904, est le plus performant des batteries électrochimiques et le plus largement commercialisé ; sa tension par élément est de 1,2 V. Elles ont été choisies par les constructeurs automobiles français (PSA et Renault) pour équiper leurs véhicules commercialisés depuis fin 1995. La version, dite *frite plastifiée*, récemment développée, pour la voiture électrique se caractérise par les performances suivantes [Beretta, 2005], [Ehsani *et al.*, 2005], [Husain, 2003], [Kant, 1995] :

- une énergie massique de l'ordre de 50 Wh/kg, lors d'une décharge de 2 h, c'est-à-dire le double de celle des batteries au plomb ;
- un nombre de cycles de charge légèrement supérieure à 2000 ;
- une dégradation des performances très réduite à faible état de charge ;
- par ailleurs, les décharges profondes affectent peu ce type de batteries, les éléments ne subissent pas le phénomène d'inversion de polarité.

Malgré des performances incontestablement supérieures à celles des batteries au plomb, les accumulateurs au nickel-cadmium n'équipent que peu de voitures électriques et ne risquent pas, dans un avenir proche, de supplanter les accumulateurs au plomb ; cela tient à plusieurs facteurs [Beretta, 2005], [Ehsani *et al.*, 2005], [Husain, 2003], [Kant, 1995] :

- un coût élevé par kilowattheure (actuellement quatre fois supérieur à celui des batteries au plomb), que la fabrication en grande série peut réduire de 20 % environ ; une réduction plus importante est difficilement envisageable, vu la disponibilité limitée du cadmium ;
- une mauvaise tenue à des températures supérieures à 40°-50° C, surtout en charge ;
- la toxicité du cadmium ;
- une conception du type ouvert, nécessitant une remise à niveau périodique de l'électrolyte.

Les batteries **nickel-hydrure de métal** ont longtemps figuré comme les remplaçantes idéales des deux systèmes précédents. Elles possèdent des performances massiques et volumiques très supérieures aux technologies à base de plomb ou de cadmium et ont profité du développement de l'électrode à base de nickel utilisée dans le système précédent (Ni/Cd) ou pour les batteries Ni-hydrogène développées pour les applications spatiales. Leurs seuls problèmes actuels semblent être leur durée de vie encore faible pour une batterie de traction (à forte profondeur de décharge) et leur mauvaise tenue à la température élevée (spécialement en fin de charge). Cette technologie de batterie semble cependant avoir été adoptée par la plupart des constructeurs automobiles comme batterie de puissance. Elle fonctionne alors à faible profondeur de décharge, ce qui augmente considérablement sa

durée de vie (nombre de cycles charge/décharge). Ce type de batterie, dans sa version traction, a équipé principalement les véhicules des constructeurs japonais commercialisés en 1998 : le RAV4 EV de Toyota, l'EV Plus de Honda et le Prairie de Nissan. Enfin des batteries de puissance de cette technologie équipent la Toyota Prius, le seul véhicule hybride thermique/électrique produit en masse à ce jour (entre son introduction en 1998 et mars 2002, 103 000 véhicules ont été vendus) [Mosdale, 2003a] [Beretta, 2005].

Les batteries **lithium-ion** demeurent l'espoir principal du véhicule électrique pur. En effet, seul ce système pourrait, dans l'état actuel des connaissances, permettre d'augmenter considérablement l'autonomie des véhicules électriques purs grâce à ses performances massiques et volumiques de capacité énergétique. Ce système présente la tension élémentaire la plus élevée (4 volt/élément, à comparer à 2 V, 1 V et 1,2 V pour respectivement les technologies plomb, Ni/Cd et Ni/MHx). Cette haute tension élémentaire reflète la très haute réactivité du couple électrochimique mis en jeu et illustre un des inconvénients majeurs de cette technologie : la sécurité. En effet, un système élaboré de sécurité doit être associé à ce type de pile pour éviter tout dépôt de Li métal, lors de la recharge en particulier. Ce système doit gérer chaque élément séparément pour éviter tout déséquilibre de charge et établir un compromis idéal entre capacité résiduelle et sécurité. Ces systèmes de gestion, le plus souvent électroniques, tendent à augmenter considérablement le coût de la technologie. L'autre paramètre critique des batteries lithium-ion réside dans le compromis coût/durée de vie. En effet, pour obtenir des durées de vie raisonnables pour l'application véhicule électrique pur (supérieures à mille cycles), il faut ajouter à l'électrode positive des additifs augmentant dramatiquement le coût de la batterie. Des véhicules ont cependant déjà été produits, avec, en particulier, l'Altra EV de Nissan en 1998 [Mosdale, 2003a] [Beretta, 2005].

Le diagramme de la figure (FIG. 1.11) où l'énergie massique est représentée en fonction de la puissance massique, donne une bonne représentation des performances relatives des différents couples électrochimiques [Beretta, 2005].

Le tableau (TAB. 1.8) présente les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques et hybrides [Husain, 2003].

Il est important de souligner que dans le domaine des batteries, les évolutions sont toujours lentes du fait de la complexité des systèmes chimiques mis en œuvre.

Pour garantir le succès d'une technologie dans les applications automobiles, il est primordial qu'elle réponde aux trois critères qui reviennent sans cesse (coût, sécurité et performance).

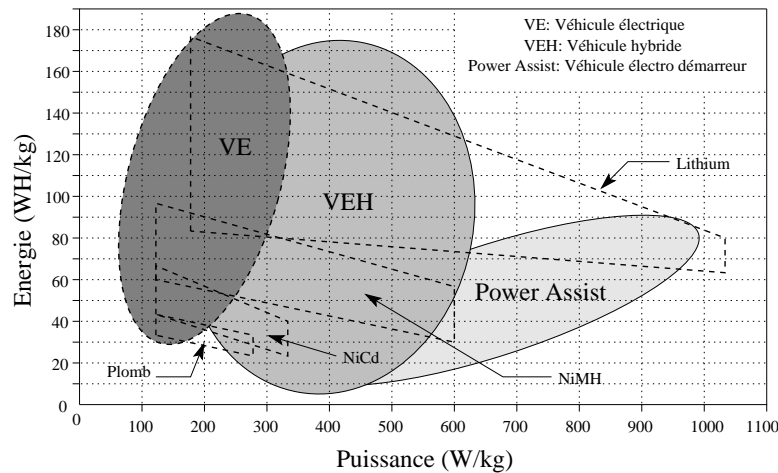


FIG. 1.11 – L'énergie massique en fonction de puissance massique pour différents types d'accumulateurs

TAB. 1.8 – Caractéristiques des différentes batteries pour une application VE

Batteries	Energie Wh/kg	Puissance W/kg	Rendement%	Cycle de vie	Coût US\$/kWh
Plomb-acide	35-50	150-400	80	500-1000	100-150
Nickel-cadmium	30-50	100-150	75	1000-2000	250-350
Nickle-métal-hydrure	60-80	200-300	70	1000-2000	200-350
Aluminum-air	200-300	100	<50		
Zinc-air	100-220	30-80	60	500	90-120
Sodium-sulfure	150-240	230	85	1000	200-350
Sodium-nikel-chaloride	90-120	130-160	80	1000	250-350
Lithium-polymère	150-200	350		1000	150
Lithium-ion	80-130	200-300	>95	1000	200

Aujourd'hui la plus mature parmi les batteries candidates aux applications puissance est incontestablement la batterie Ni-MH. Elle répond correctement aux besoins du véhicule hybride et elle est aujourd'hui disponible.

En ce qui concerne la batterie Li-ion puissance, elle a de très bonnes performances, mais des efforts doivent être faits pour améliorer les coûts. Pour les applications tout électrique les batteries Li-ion et Ni-MH sont également préconisées. Des véhicules électriques de batteries Ni-MH sont d'ailleurs aujourd'hui commercialisés.

La batterie lithium-polymère est très prometteuse de par ses performances élevées et son coût potentiellement raisonnable. Elle n'existe actuellement qu'au stade de prototype de pré-série. Toutefois, par sa nécessité de devoir assurer une température de fonctionnement élevée, son utilisation pour des applications de traction électrique reste problématique.

1.6.3.2 Les piles à combustible

La pile à combustible est l'invention de Sir William Grove, avocat, philosophe et chimiste anglais du XIX^{ème} siècle. Il a développé à l'aide de grande quantité de platine fournie gracieusement par Johnson Matthey, des cellules de piles à combustible (1839-1849) [Mosdale, 2003b]. En 1889, Ludwig Mond et Carl Langer furent les premiers à donner à la pile à combustible son nom et sa forme actuelle : des cellules connectées en série par des plaques bipolaires. Ils ont pu obtenir des courants de 2 à 2,5 A (environ 3 mA/cm²) pour une surface de 700 cm² à une tension de cellule de l'ordre de 0,73 V et pour un chargement total de 1 g de noir de platine (soit 1,43 mg de platine par cm²). Ces résultats constituent les premiers éléments chiffrés représentatifs d'un calcul d'ingénieur pour une application stationnaire. Un kilowatt électrique aurait demandé environ un kilogramme de platine soit environ 12000 EUR. Ce coût prohibitif mit un frein important à leurs travaux [Mosdale, 2003b].

Les premières applications "automobiles" furent leur implantation sous forme de démonstrateurs à la fin des années 1950, à la suite des travaux de F.T. Bacon à l'université de Cambridge, sur des piles alcalines fonctionnant à plus de 200°C. En août 1959, un système de pile alcaline hydrogène/oxygène de 6 kW fut développé et testé sur des machines-outils et un chariot élévateur. Dans le même temps, en octobre 1959, Harry Ihrig (de Allis Chalmers Company) dévoilait le premier tracteur équipé d'un système de pile alcaline de 15 kW, comportant un empilement de plus de mille cellules. Enfin, ces premières réalisations furent suivies, quelques années plus tard, par un véhicule Austin alimenté par une pile alcaline de 6 kW développée par K.V. Kordesh de Union Carbide [Mosdale, 2003b].

La principale différence entre une pile à combustible (PAC) et une batterie provient du fait qu'une pile à combustible fonctionne tant qu'elle est alimentée en combustible et en comburant, et ne nécessite donc pas de recharge électrique. Si, dans le cas d'une batterie, les électrodes contiennent la matière active qui sera consommée et régénérée au cours des décharges et charges, les électrodes d'une pile à combustible ne contiennent que les catalyseurs nécessaires aux réactions, les réactifs provenant de réservoirs extérieurs. Cette différence primordiale permet, dans un système à pile à combustible, de séparer l'énergie contenue dans le carburant de la puissance résultant de la pile, et devrait aboutir à des véhicules électriques aussi performants que les véhicules thermiques actuels notamment avec une autonomie comparable [Mosdale, 2003b].

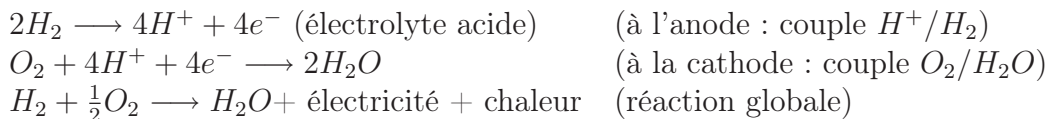
Les piles à combustible produisent l'électricité à partir d'hydrogène et leur fonction-

nement est pratiquement à zéro émission. Cependant, leur utilisation dans le domaine de l'automobile reste au stade du prototype et soulève de nombreux problèmes comme par exemple le stockage de l'hydrogène, ou l'encombrement des composants annexes (compresseurs, radiateurs, etc.). D'autre part, la distribution d'hydrogène à grande échelle nécessiterait une mise à jour complète du système de distribution de carburant actuel. Pour remédier à ce problème, des reformeurs embarqués permettraient de produire l'hydrogène à partir de carburant fossiles (méthanol, éthanol).

Il existe divers types de pile à combustible mais toutes ces piles gardent en commun les caractéristiques suivantes [Beretta, 2005] :

- elles sont essentiellement constituées de deux électrodes séparées par un électrolyte ;
- sur une électrode (l'anode) on déclenche une réaction d'oxydation électrochimique d'un composé hydrogéné (le combustible). Cette réaction produit des électrons et met en jeu un ion ;
- sur l'autre électrode (la cathode) on déclenche une réaction de réduction électrochimique en présence d'oxygène et des électrons venus de l'anode via la charge extérieure, et qui met en jeu le même ion qu'à l'anode. Le comburant oxygène est généralement l'oxygène de l'air, l'azote ne constituant pas un poison pour la pile ;
- les réactions électrochimiques nécessitent un catalyseur sur chaque électrode ; de plus elles produisent de la chaleur et de l'eau ;
- entre ces deux électrodes, un électrolyte permet le transfert de l'ion mis en jeu tout en étant un isolant électrique vis-à-vis des électrons générés à l'anode. Selon sa nature cet électrolyte est liquide ou solide.

Le fonctionnement global d'une pile à combustible est décrit sur la figure (FIG. 1.12). Une réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur selon les équations chimiques suivantes :



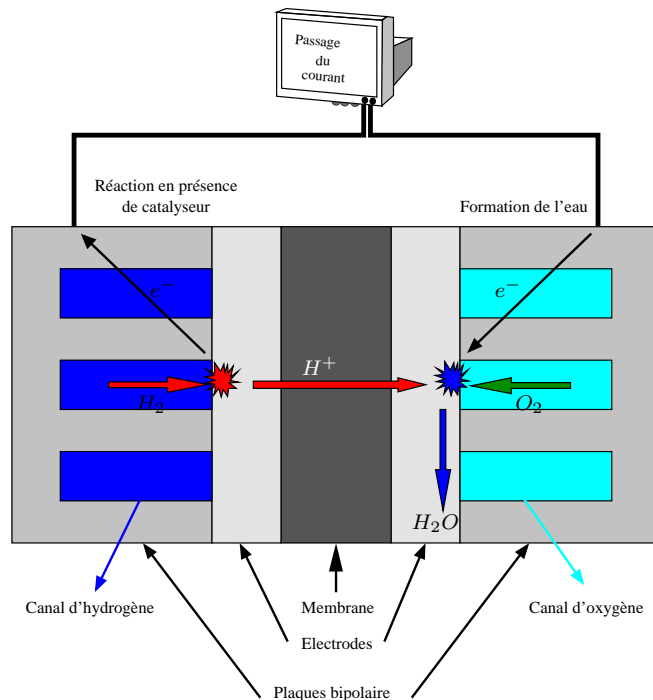


FIG. 1.12 – Pile à combustible de type PEM alimentée en hydrogène et en oxygène

Plusieurs types de réactions électrochimiques sont possibles. Elles diffèrent par l'espèce d'ion (anion ou cation) mis en jeu et par la température nécessaire qui, selon la réaction, se situe dans la gamme de 50 à 1000°C ; il faut donc choisir, pour chaque type, l'électrolyte qui convient [Beretta, 2005], [Ehsani *et al.*, 2005], [Husain, 2003], [Kant, 1995], [Mosdale, 2003b].

De ce fait, six filières différentes sont aujourd'hui recensées. Elles figurent dans le tableau (TAB. 1.9).

TAB. 1.9 – Les différents types de pile à combustible

Type de pile	Electrolyte	Nature de l'électrolyte	Espèce ionique mise en jeu	Température (°C)
Alcaline (AFC)	Potasse (KOH)	Liquide	OH^-	70-90
Polymère solide (PEMFC)	Polymère conducteur ionique (protonique)	Solide	H^+	70-90
Méthanol direct (DMFC)	Polymère conducteur ionique (protonique)	Solide	H^+	70-110
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (H_3PO_4)	Liquide	H^+	150-210
Carbonates fondus	Sels fondus (Li_2CO_3/K_2CO_3)	Liquide	CO_3^{--}	550-650
Oxydes solides (SOFC)	Céramique yttrée (ZrO_2/Y_2O_3)	Solide	O^{--}	700-1000

1.6.3.3 Autres sources d'énergie

Parmi les sources d'énergie électrique actuelles, autres que les batteries et les piles à combustible, seuls les supercondensateurs semblent présenter une maturité suffisante pour être intégrés à un véhicule électrique [Mosdale, 2003a], [Faggioli *et al.*, 1999]. Les supercondensateurs sont des systèmes électrochimiques de stockage d'énergie électrique dont les caractéristiques sont situées entre celles des condensateurs électriques et celles des accumulateurs électrochimiques. Leurs spécificités sont une grande cyclabilité et une densité de puissance élevée. Comme les batteries ou les piles à combustible, ils contiennent deux électrodes et un électrolyte ionique, mais contrairement aux batteries, il n'y a pas de réactions électrochimiques aux électrodes mais un stockage de charges aux interfaces électrode/électrolyte ou un intercalage d'ions dans la structure de l'électrode sans qu'il y ait de réaction chimique. La charge dans l'électrode représente, dans la plupart des cas, un excès ou un défaut d'électrons.

Une supercapacité est un condensateur particulier, mettant en jeu un électrolyte, en général organique (liquide ou solide) et muni de bases au charbon actif (supercapacité) ou encore d'oxyde métallique (ultracapacité). Au point de vue physique, il s'agit toujours d'un gros condensateur, stockant peu d'énergie (≈ 3 à 8 Wh/kg), mais capable de délivrer ou d'absorber une puissance massique très élevée, de l'ordre de 10 kW/kg [Kant, 1995].

L'usage de ces éléments reste relativement marginal. Il semble que l'association de batteries et de supercapacité soit une solution intéressante d'un point de vue technique mais relativement coûteuse à mettre en œuvre.

1.7 La simulation

La simulation est devenue un passage obligé pour concevoir, caractériser, commander ou surveiller les processus scientifiques et technologiques. A ses débuts la simulation était plutôt analogique et mettait en œuvre des modules à base d'amplificateurs opérationnels. Durant les années 1970, on a assisté au début de la démocratisation des moyens de calcul, accompagnée de progrès importants dans le domaine de l'analyse numérique. La conjonction de ces deux avancées importantes a permis le développement de plusieurs outils de simulation numérique qui ont remplacé petit à petit les simulateurs analogiques. Ces outils étaient initialement dédiés à des domaines particuliers (Mécanique, Hydraulique, et surtout Électrique)[Chami, 2005].

Les enjeux, dans le domaine environnemental, auxquels sont confrontés actuellement

les constructeurs de véhicules, sont une réduction de la consommation et une réduction des émissions de polluants (gaz à effet de serre). Ceci dans un contexte où les véhicules, toujours mieux équipés, sont dotés de réseaux électriques de bord toujours plus puissants. Dans le domaine des transports, la technique de la modélisation présente un intérêt économique considérable étant donné le coût que représente la réalisation d'un prototype de véhicule et la complexité grandissante des architectures innovantes à prendre en compte.

Contrairement aux applications monodisciplinaires, la difficulté de la modélisation énergétique et dynamique d'un véhicule réside dans la représentation d'un système complexe pluridisciplinaire. Cette difficulté est d'autant plus importante que le véhicule dispose de plusieurs sources d'énergie embarquées qui, soit participent à son mouvement, soit assurent des fonctions autres que la traction.

1.7.1 Problématique de l'approche système

Les véhicules électriques et/ou hybrides sont des systèmes qui possèdent un fort caractère multidomaines, dans la mesure où ils intègrent, au sein d'une même application, différentes technologies pouvant être liées à l'électrotechnique, l'électronique, l'automatique, la mécanique, la chimie ou l'hydraulique.

Cette hétérogénéité, omniprésente dans les dispositifs, est une des sources de leur complexité. La pluridisciplinarité relative à cette cohabitation de multiples domaines de la physique entraîne des difficultés liées à la représentation et à la caractérisation de ces systèmes. Les connaissances et les compétences à rassembler pour étudier de telles applications sont nombreuses et il faut être capable de les faire coexister à travers la description du dispositif complet.

Un système est défini comme « un ensemble complexe d'éléments en interaction ». Cette définition met en exergue le mot interaction (ou couplage) qui prend, dans notre contexte d'étude, une importance toute particulière. En effet, ces couplages sont eux-aussi à la source de la complexité des systèmes et peuvent être présents sous différentes formes [Regnier, 2003] [Bouscayrol, 2003] [Chami, 2005] :

- les couplages entre les éléments du système : ils impliquent une dépendance forte des caractéristiques intrinsèques des éléments par rapport à leur environnement proche.
- les couplages entre les disciplines, liés au caractère hétérogène des systèmes et à la cohabitation de multiples phénomènes physiques.
- les couplages avec l'environnement dans lequel le système va évoluer.

Les méthodes systémiques se sont développées à partir de 1945 et sont devenues, vers la fin des années 70, une discipline à part entière. Issues des sciences de l'ingénierie avec la théorie cybernétique de N. Wiener (1948) et des sciences de la vie avec la théorie des systèmes ouverts de L. V. Bertalanffy (1951 et 1968), elles s'enrichissent des théories de l'information de Shannon-Weaver (1950), de la théorie structuraliste de Piaget (1968) et finissent par déboucher sur une formalisation relativement achevée à la fin des années 70 [Regnier, 2003] [Bouscayrol, 2003] [Chami, 2005].

Cette vision s'opposait à la vision dite "mécaniste", prédominante au début du 20^{ème} siècle, et qui consistait à découper le système en sous-systèmes élémentaires, traités par des spécialistes de chaque domaine. Cette approche a, dans une certaine mesure, prouvé son efficacité en raison des effets de la spécialisation. Mais elle a aussi montré ses limites à cause du manque, voire de l'absence de dialogue interdisciplinaire, conduisant souvent à un assemblage d'éléments qui, bien que localement optimisés, ne constituaient pas un système globalement optimal vis-à-vis de son cahier des charges [Regnier, 2003] [Bouscayrol, 2003] [Chami, 2005].

C'est incontestablement L. V. Bertalanffy qui par sa "théorie générale des systèmes", s'est aperçu d'une certaine communauté de problèmes rencontrés entre les différentes disciplines. Aujourd'hui ses réflexions ont suscité une nouvelle vision de la conception : "l'approche système", "la systémique", "l'ingénierie simultanée", "la conception intégrée", "la mécatronique". Cette vision consiste, en positionnant le système dans son environnement, à étudier celui-ci dans sa globalité, tout en intégrant la finalité pour laquelle il doit être conçu [Regnier, 2003] [Bouscayrol, 2003] [Chami, 2005].

1.7.1.1 La systémique d'un véhicule électrique

Le véhicule électrique présente également toutes les caractéristiques d'un système complexe, multidomaines, où les éléments sont couplés mutuellement, ainsi qu'avec leur environnement (route, conducteur) et avec la mission du véhicule.

Ici, les interactions (FIG. 1.13) peuvent se décliner par rapport à plusieurs domaines [Regnier, 2003] [Chami, 2005] :

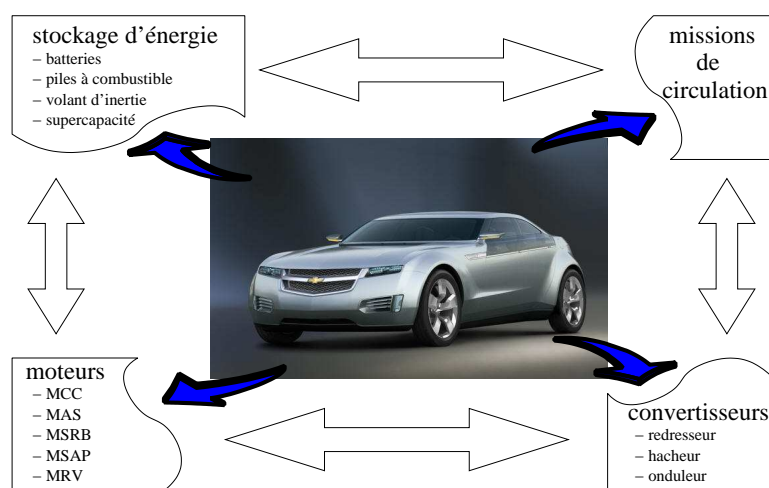


FIG. 1.13 – Quelques couplages présents au sein d'un véhicule électrique

- interactions entre les domaines mécanique, électrique, chimique, thermique et électrotechnique-électronique de puissance ;
- interactions entre le profil de mission du véhicule et la détermination de la chaîne de propulsion, du convertisseur statique et des autres éléments du système ;
- interactions entre la gestion de l'énergie embarquée (récupération d'énergie, freinage), les conditions de fonctionnement de l'actionneur (tension, fréquence de rotation) et la stratégie de commande de la machine.

La complexité des systèmes que nous proposons d'étudier implique d'adopter une approche globale pour la caractérisation de leur comportement. Les éléments d'un système sont en interaction forte avec le contexte dans lequel ils évoluent. Ainsi, une représentation cohérente et complète de l'ensemble ne pourra être obtenue qu'en considérant l'ensemble des phénomènes et des couplages présents. Il est donc nécessaire de s'orienter vers une démarche qui s'efforce de relier les ensembles au lieu de les isoler. Cette démarche correspond aux idées véhiculées par l'approche système, ou systémique, que nous allons retenir dans cette thèse.

1.7.1.2 Outils de modélisation des systèmes électromécaniques

Notre objectif est la modélisation et la simulation systémique. Dans cette approche, on s'intéressera au système global et on cherchera à modéliser et simuler tous les phénomènes dont il pourrait être le siège. Le modèle adopté devrait faciliter la tâche du programmeur et représenter le plus fidèlement possible l'ensemble des phénomènes que le concepteur cherche à mettre en évidence. La voiture électrique que nous présentons

au cours de ce mémoire est un système contenant un couplage fort entre les domaines électrique, mécanique pour la partie motorisation, et entre les domaines électrique, chimique, hydraulique et thermodynamique pour la partie alimentation (Pile à combustible, batterie, supercapacité,...).

Plusieurs modèles ont été développés pour représenter les systèmes hybrides. Les réseaux de Petri Hybrides [Valentin, 2000], les automates hybrides [Sava et Alla, 2001], le modèle Bond Graph qui est le plus connu et le plus utilisé pour modéliser des systèmes multiphysiques [Breedveld, 1985] [Mosterman *et al.*, 1996] [Mosterman, 1997]. Nous nous intéressons, dans ce mémoire, à deux types de modèles qui peuvent être utilisés dans une démarche de modélisation :

- **Grphe de liens** ou **Bond graph** : Le formalisme bond graph a été introduit par H.Paynter en 1961 [Bouscayrol, 2003] et formalisé par Karnop et Rossenberg en 1975 [Saisset, 2004] [Chami, 2005]. L’outil bond graph est maintenant utilisé régulièrement dans l’industrie automobile (PSA, Renault, Ford, Toyota, General Motors,...). Cette méthode illustre les transferts énergétiques dans le système en utilisant des liens de puissance.
- **Réseau Dynamique Hybride à Composant** : Le Réseau Dynamique Hybride à Composant **RDHC** a été présenté pour la première fois par J. Saadi en 1994 [Chami *et al.*, 2005] [Chami, 2005] [Chami *et al.*, 2007]. Le RDHC est un modèle graphique permettant une représentation unifiée des systèmes hybrides.

Le Bond Graph et le RDHC représentent graphiquement le transfert d’énergie du système étudié. Les différents composants de base comme les sources effort et flux, résistance, inertie et capacitance sont présentés d’une façon équivalente. Cela implique que tous les systèmes qui sont modélisés par le bond graph le sont aussi par le RDHC. La présentation topologique du RDHC montre une différence dans la représentation des associations série/parallèle. En effet, ce modèle garde la topologie des systèmes, visible et claire à l’exploitation.

Ces deux approches permettent une modélisation satisfaisante des systèmes multi-domaines mais pour la simulation, la deuxième présente une meilleure simplicité d’intégration dans des outils informatiques. La génération du système d’équation à l’aide du modèle RDHC s’avère intéressante et plus économique. Pour toutes ces raisons, nous avons adopté les Réseaux Dynamiques Hybrides à Composants comme modèle de base pour l’outil de simulation ELEVES l’objet de ce travail. Ces raisons seront évoquées avec plus de détails, au cours du troisième chapitre.

1.7.2 Logiciels de simulation pour le véhicule électrique

Plusieurs logiciels de simulation des systèmes ont été réalisés depuis des dizaines d'années par les centres de recherche des constructeurs ou les laboratoires universitaires. En 1977 on a recensé plus de cent logiciels aux Etats-unis. Au laboratoire transports et environnement (LTE) de l'INRETS, on en compte deux, dont l'un, Simulco, est spécialisé dans la simulation des véhicules lourds (Roumegoux, 1990), l'autre dans la simulation des véhicules électriques et hybrides de type série avec ses deux variantes : VERT pour les véhicules légers et V2G/VEG pour les bus et tramways [Trigui *et al.*, 2004].

On trouve aussi dans la littérature des logiciels comme ADAMS/Car, SmartHEV, AMESim et ADVISOR. Le premier est une solution de simulation de mouvement pour analyser le comportement complexe des organes mécaniques. Ainsi, il permet de tester des prototypes virtuels et d'optimiser leurs conceptions en vue de la prédiction de leurs performances, sûretés et confort [Ada, 2007]. ADAMS, comme simulateur de dynamique de Multi-Corps, a été souvent mis en application en utilisant le lien avec Matlab comme environnement de simulation et de commande. [Kim *et al.*, 2005] [Farazandeh et Kazemi, 2006]. Le deuxième logiciel (SmartHEV) est un outil de conception des composants pour l'automobile. Il est écrit avec le langage de programmation VisualBasic 6.0 qui utilise des algorithmes développés à l'Université d'Idaho. Des composants comme les roues, le différentiel, la transmission, le moteur électrique et la batterie sont modélisés en état d'équilibre. SmartHEV n'exige pas que le système de véhicule soit complètement achevé. Cela veut dire que l'on peut effectuer la simulation pour un ou plusieurs composants sans le besoin de simuler tout le système [Blacketter et Alexander, 2001] [Sma, 2007].

Quant à l'AMESim (Advanced Modeling Environment for performing Simulations), il représente une plateforme virtuelle complète d'analyse du système unidimensionnel qui permet aux utilisateurs de concevoir des systèmes multi-domaines. Il permet d'étudier à l'aide d'une interface d'environnement graphique, les comportements statiques et dynamiques de n'importe quel composant ou système. Ces possibilités font d'AMESim une plateforme efficace pour concevoir des systèmes comme les véhicules, l'aérospatial et les groupes d'équipement lourds [Ame, 2007]. AMESim est organisé dans des bibliothèques contenant des composants. Ces composants, représentés symboliquement par des icônes, peuvent être reliés ensemble pour concevoir le système à étudier. AMESim a été appliqué la première fois sur des systèmes électrohydrauliques et des systèmes mécaniques unidimensionnels simples (comme l'inertie, les ressorts, et les amortisseurs en translation ou en rotation). Il a récemment ouvert ses bibliothèques à une variété de composants dans dif-

férents domaines. A titre d'exemple, on peut maintenant modéliser, analyser et effectuer les simulations d'un système pneumatique, hydraulique, électrique, électromagnétiques ou encore de refroidissement [Marquis-Favre *et al.*, 2006a] [Marquis-Favre *et al.*, 2006b].

Il est important de noter que le dernier ADVISOR (ADvanced VehIcle SimulatoR) est un simulateur avancé de véhicule. Il est un ensemble de modèle, de données, de dossiers et des textes de manuscrit pour profiter pleinement de la flexibilité de la modélisation avec Simulink et de la puissance analytique de MATLAB. Il est conçu pour l'analyse rapide de l'économie de carburant des véhicules conventionnels, électriques, et hybrides. ADVISOR est conçu comme un outil d'analyse et non pas comme un outil de conception de systèmes. En effet, il ne nous donne pas la possibilité de concevoir nos propres systèmes. Cependant, une limitation est imposée par l'utilisation de ses composants quasi-statiques existant dans sa bibliothèque. En général, l'utilisateur de ce logiciel est pénalisé par cette limitation. En outre, on ne peut effectuer une simulation qu'après que le système soit complètement déterminé. Autrement dit, on ne peut pas effectuer une simulation pour un ou plusieurs composants à la fois. Souvent, ADVISOR fait appel à des logiciels comme le logiciel SABER dans le cas de la modélisation de tous composants de nature électrique (moteurs, convertisseurs, batteries,...). Pour la modélisation des composants dynamiques (ressorts, amortisseurs, l'aérodynamisme,...), il fait appel au logiciel ADAMS/Car par exemple [Adv, 2007] [Markel *et al.*, 2002].

Après ce bref tour d'horizon sur ces logiciels existants, nous pouvons tirer les inconvénients suivants qui nous seront utiles dans notre démarche de développement :

- ces logiciels se focalisent seulement sur une partie de l'analyse du véhicule ;
- ils ne traitent pas le fonctionnement en mode dégradé ;
- ils ne donnent pas la possibilité d'ajouter de nouveaux composants et de les intégrer dans le système complet ;
- ils ont souvent besoin de faire appel à d'autres logiciels spécialisés dans différents domaines ;
- ils nécessitent beaucoup de temps de développement ;
- ils sont très chers à l'acquisition.

En effet, plusieurs points d'incertitude subsistent aujourd'hui encore, tant sur l'architecture idéale que sur le choix de la puissance électrique ou celui des composants les plus pertinents pour chacune des architectures. Les véhicules devenant aujourd'hui toujours plus complexes, ces logiciels sont souvent soit trop lourd, soit trop généralistes, ou trop dédiés. Il leur est difficile voire impossible d'inclure de nouveaux types d'architectures ou

alors après un travail de développement laborieux.

Dans ce contexte, nous nous sommes proposé de développer notre propre simulateur (ELEctric VEhicle Simulator) **ELEVES**. Ce simulateur permet d'une part de reproduire de façon fiable le comportement dynamique et électrique du véhicule, d'autre part de proposer de nouvelles solutions d'agencement et de gestion de l'énergie pour des architectures plus complexes. Il capitalisera les résultats de recherche de notre équipe dans le domaine du VE.

1.7.3 Notre simulateur ELEVES

L'approche que nous avons adoptée pour la modélisation d'un véhicule en vue de la prédiction de ses performances dynamiques et énergétiques consiste à le considérer comme une association de différents sous-systèmes. Chacun d'entre eux correspond à un organe physique du véhicule et peut lui même être encore dissocié en sous-systèmes.

Nous nous sommes fixé comme objectif de développer un outil performant dans un contexte de complexité croissante des nouvelles motorisations et des sources d'énergie embarquées. L'objet de notre travail ne consiste pas à développer sur le plan informatique un outil de représentation graphique et de résolution numérique des systèmes, mais d'en trouver un qui puisse répondre à nos attentes, à savoir :

- une modularité exemplaire afin de pouvoir modéliser de nouveaux types de composants ou sources d'énergie et les intégrer dans le modèle du véhicule complet ;
- une bonne adéquation entre précision et temps de calcul ;
- la constitution d'une base de données sur les différents organes, existants et futures, du véhicule ;
- des simulations en régimes transitoires ;
- une conception de stratégies de commandes et de lois de gestion de l'énergie.

1.8 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les éléments de base de la chaîne de traction des véhicules électriques et de sa gestion en insistant sur les différentes technologies disponibles. Pour cela nous nous sommes basés sur les travaux rencontrés dans la littérature et qui peuvent être considérés comme le contexte général de notre travail de thèse. Cela nous a permis d'effectuer nos choix concernant l'architecture, le moteur, les convertisseurs et la source d'énergie. En effet, nous étudions une structure spécifique de la chaîne de traction qui est la configuration d'entraînement direct par des moteurs roue (deux ou quatre roues motrices). Nous avons choisi le moteur synchrone à aimants permanents, le candidat le plus adapté au véhicule électrique pur. Il est alimenté par une batterie à travers des convertisseurs de type onduleur.

Nous avons abordé par la suite, la problématique de la systémique dans le véhicule électrique. Nous avons mis en évidence la présence de couplages entre les éléments qui le composent. Ceci nous oriente vers des démarches de modélisation et de commande considérant la globalité de l'application, plutôt qu'une approche locale. Nous avons choisi le formalisme de réseau dynamique hybride à composant (RDHC) le plus adapté à la vision systémique retenue dans ce travail.

Dans le chapitre suivant, nous abordons la modélisation de deux grandes parties de notre système : la partie dynamique, traitant tous les aspects dynamiques (forces agissant sur le véhicule, glissement,...) et la partie de la motorisation électrique (source, convertisseur, moteur, commande).

Chapitre 2

Modélisation des Composants du Véhicule Electrique

2.1 Introduction

Le véhicule électrique (VE) est un système complexe constitué de composants très variés de natures différentes (mécanique, électrique, électrochimique,...) en interaction. Son comportement est donc sensible à toute variation des caractéristiques de l'un de ses composants à travers ces interactions. L'analyse du VE en tant que système nécessite alors la modélisation des différents composants intervenant dans sa chaîne de traction. Le choix et l'agencement de ces composants, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche, même si les premiers véhicules hybrides sont déjà sur le marché (Toyota Prius, Nissan Tino, Honda Insight, Lexus,...).

Dans le concept de l'approche systémique, le système est perçu comme un ensemble d'éléments (ou de composants) en interaction, organisés en fonction d'un but. Par opposition à une approche composant, l'association des éléments est considérée comme une partie intégrante du système, qui fait émerger certaines propriétés tout en négligeant d'autres. Dans notre travail de thèse, les deux approches ont été considérées. La modélisation des composants et des sous-systèmes permet de simuler les comportements fins à l'échelle des plus petites constantes du temps. Ceci est indispensable lorsque la simulation est effectuée dans un objectif de dimensionnement. Quant à la modélisation systémique, nous l'avons adoptée pour les besoins de contrôle du système.

Nous avons donc dédié ce chapitre à l'exposition des différents modèles des composants du système, en vue du dimensionnement et de la commande du véhicule.

D'abord, nous présentons un modèle à trois degrés de libertés, traduisant la dynamique du véhicule. Ces trois degrés de libertés concernent l'évolution du déplacement longitudinal (par rapport à l'axe X), du déplacement latéral (par rapport à l'axe Y) et le lacet (rotation autour de l'axe Z) du véhicule. Ensuite, nous développons la modélisation de la partie électrique (moteur-convertisseur). Enfin, la Représentation Energétique Macroscopique (REM) du système (parties mécanique et électrique) et sa Structure Maximale de Commande (SMC) seront illustrées.

2.2 Système étudié

En terme d'architecture, les solutions les plus avancées et les plus viables économiquement semblent être les structures hybrides, qui mêlent une motorisation thermique, un alternateur, ainsi qu'une machine électrique associée à une petite quantité de batterie. Les architectures "tout électrique" souffrent à l'heure actuelle de problèmes liés au stockage de l'énergie embarquée. Les performances des accumulateurs en terme d'énergie massique sont encore bien faibles par rapport aux carburants pétroliers [Roby, 2006]. Malgré ces défauts, ce type de véhicule nous semble bien approprié si l'on veut se focaliser sur la démarche de conception.

Afin de pouvoir simuler la mission d'un véhicule, il faut être capable de déterminer quels sont les couples et les vitesses imposés au moteur de traction en interaction avec le profil de la route. Pour ce faire, nous établissons un bilan des efforts appliqués au véhicule. Des avancées sur leur plan architectural sont notre ligne de mire dans l'espoir d'une rupture technologique favorable à l'autonomie de ces véhicules.

2.2.1 Bilan des efforts appliqués au véhicule

2.2.1.1 Couple d'auto-alignement

Lors de l'application d'une force latérale F_y sur la roue (dûe à un virage par exemple), le pneu présente une déformation au niveau de la surface de contact (FIG. 2.1). Face à cette action, le sol réagit au même endroit, par la force Y_{ai} dans le sens contraire que celui de F_y . Le moment de Y_{ai} par rapport à l'axe de la roue, définit le couple d'auto-alignement M_{ai} .

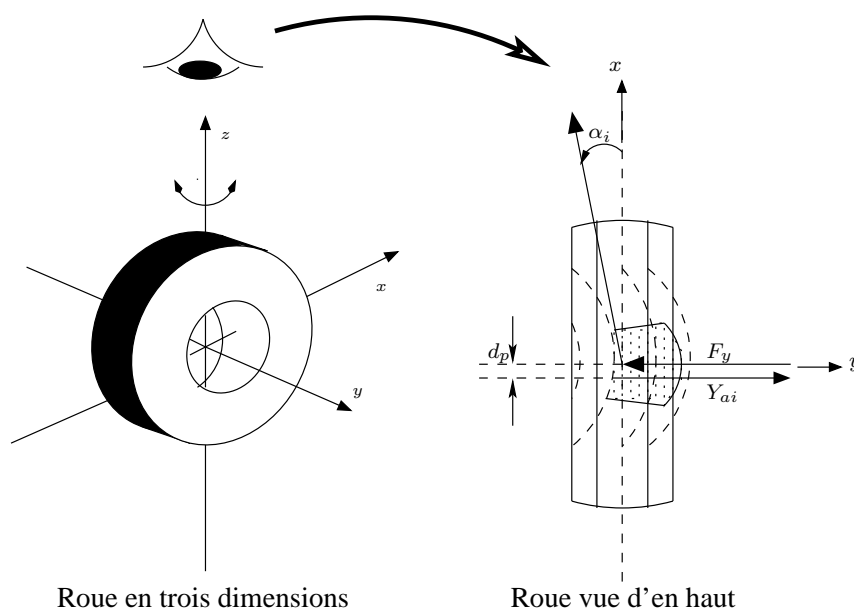


FIG. 2.1 – Déformation du pneu sous l'action d'une sollicitation latérale

En définissant un coefficient de raideur au couple d'auto-alignement C_{ai} , prenant en compte l'influence de la charge, de la pression et la structure du pneu M_{ai} peut s'exprimer comme suit [Hosaka et Murakami, 2004] [Pusca, 2002] :

$$M_{ai} = C_{ai}\alpha_i d_p \quad (2.1)$$

avec, d_p , la distance entre le centre de la surface de contact et le point où Y_{ai} s'applique. α_i , l'angle de dérive de la roue.

2.2.1.2 Forces aux roues

L'effort total F_{tot} nécessaire à l'avancement du véhicule est la somme des différentes composantes issues du bilan des forces mécaniques appliquées au véhicule [Genta, 1997], [Multon, 2001] :

$$F_{tot} = F_{roul} + F_{aero} + F_{pente} + F_{acc} \quad (2.2)$$

Le tableau (TAB. 2.1) précise les notions utilisées dans les équations des forces ci-dessus.

TAB. 2.1 – Glossaire des variables utilisées lors du bilan des efforts

M_v	kg	masse totale du véhicule
J_v	$kg.m^2$	inertie du véhicule
V_{veh}	$m.s^{-1}$	vitesse du véhicule
$V_{vent} = 0$	$m.s^{-1}$	vitesse du vent
$g = 9.81$	$m.s^{-2}$	accélération de la pesanteur
C_{px}	–	coefficient de pénétration dans l'air
S_f	m^2	section frontale véhicule
ρ	$kg.m^{-3}$	densité volumique de l'air

- F_{roul} est la force de résistance au roulement liée au coefficient de roulement des roues. Pratiquement, avec des pneumatiques modernes à très faible résistance au roulement, le coefficient de résistance au roulement (C_{rr}) vaut environ 0.01 (environ 0.015 pour des pneus classiques). Ce coefficient dépend de la largeur des pneus et du revêtement routier. Si les pneus avant sont différents des pneus arrière, ou simplement si leurs pressions de gonflage sont différentes, l'effort de résistance au roulement vaut :

$$F_{roul} = [C_{rr_av}m_{av} + C_{rr_ar}m_{ar}]g \approx gM_vC_{rr_moy} \quad (2.3)$$

Où m_{av} et m_{ar} sont respectivement les masses portées par les roues avant et arrière.

- F_{aero} est la force de résistance aérodynamique, proportionnelle à la masse volumique de l'air, au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par apport à l'air, à la section frontale du véhicule et à son coefficient de pénétration dans l'air qui prend des valeurs $C_{px} \in [0.25-0.5]$ selon les formes de carrosserie. Son expression est donnée par la relation suivante [Genta, 1997] [Pusca, 2002] :

$$F_{aero} = \frac{1}{2}\rho S_f C_{px} (V_{veh} - V_{vent})^2 \quad (2.4)$$

- F_{pente} est la force de résistance due à la pente à gravir. Dans le cas où l'automobile devrait gravir une pente d'angle (α_p), il y a une force supplémentaire proportionnelle à la masse totale du véhicule qui s'oppose à son avancement. Cette force est donnée par :

$$F_{pente} = gM_v \sin(\alpha_p) \quad (2.5)$$

- Enfin F_{acc} représente le terme dynamique d'accélération ou de décélération du véhicule.

$$F_{acc} = M_v \frac{dV_{veh}}{dt} = M_v \gamma \quad (2.6)$$

Finalement, l'effort total de résistance à l'avancement du véhicule vaut :

$$F_{tot} = gM_v C_{rr_moy} + \frac{1}{2} \rho S_f C_{px} (V_{veh} - V_{vent})^2 + gM_v \sin(\alpha_p) + M_v \gamma \quad (2.7)$$

La puissance à fournir aux roues en fonction de la vitesse de déplacement est donnée par l'expression suivante :

$$P = F_{tot} V_{veh} \quad (2.8)$$

La figure (FIG. 2.2) montre l'évolution de la puissance requise en fonction de la vitesse stabilisée, pour l'entraînement d'un véhicule urbain (masse en charge de 1150 kg, $C_{rr} = 150 \times 10^{-4}$, $S_f = 2.5m^2$, $C_{px} = 0.32$) en palier et en pente à $p\%$ [Multon, 2001].

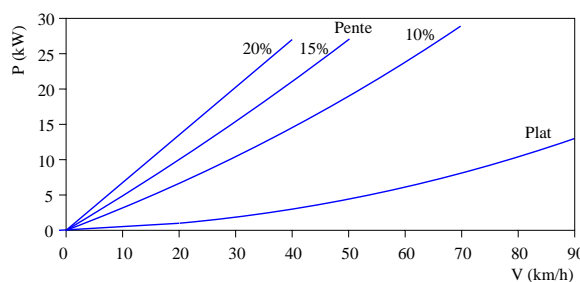


FIG. 2.2 – Puissance requise aux roues pour une voiture urbaine à vitesse stabilisée

Le tableau (TAB. 2.2) résume les ordres de grandeur de la puissance maximale nécessaire pour les différentes catégories de véhicules.

TAB. 2.2 – Puissance maximale nécessaire pour divers véhicules

Type de véhicule	Puissance maximale
Bicyclette assistée	100 à 400 W
Scooter	2 kW
Motocyclette sportive	14 à 25 kW
Voiturette	8 kW
Voiture urbaine	20 à 40 kW
Voiture routière	50 à 70 kW
Véhicule utilitaire urbain	40 kW
Bus urbain	160 kW

Le couple résistant à la roue C_r est lié à l'effort résistant par la relation :

$$C_r = F_{tot}R_w \quad (2.9)$$

Où R_w est le rayon de la roue.

La vitesse angulaire Ω_r (rad/s) est liée à la vitesse du véhicule V_{veh} (m/s) par la relation :

$$\Omega_r = \frac{V_{veh}}{R_w} \quad (2.10)$$

2.2.2 Structure du véhicule électrique étudié

Les ordres de grandeur des puissances maximales données dans le tableau (TAB. 2.2) permettent de constater qu'il est possible de réaliser une motorisation électrique sur de nombreux véhicules. Si des accélérations importantes sont souhaitées, il faut bien entendu accroître la puissance impulsionnelle, sachant que la puissance maximale est une contrainte importante de conception, à la fois pour les batteries et pour le (ou les) moteur(s) et son (leurs) alimentation(s) électrique(s). L'objet de la transmission de puissance mécanique est de relier la source d'énergie, le ou les moteurs électriques, aux roues motrices du véhicule, il s'agit d'adapter la vitesse de rotation Ω et le couple C_{em} du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule, c'est-à-dire le couple résistant à la roue.

Nous avons donc retenu comme système d'étude un véhicule électrique pur à entraînement direct constitué :

- d'un châssis ;
- de deux ou quatre moteurs roues de type synchrones à aimants permanents ;

- d’une batterie d’accumulateurs et
- d’un onduleur triphasé pour chaque moteur.

Nous nous intéressons au couplage entre les deux grandes parties de notre système : la partie mécanique qui traite les aspects dynamiques du véhicule et la partie électrique qui représente la motorisation électrique à bord. La figure suivante (FIG. 2.3) donne une idée générale sur la structure de notre système.

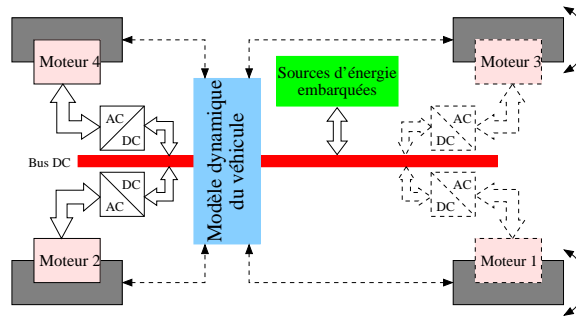


FIG. 2.3 – Structure général du véhicule étudié

2.3 Modélisation mécanique

La modélisation proprement dite consiste à décrire le mouvement du véhicule électrique dans le repère spatial tridimensionnel. Cette tâche demande un travail laborieux compte tenu de la complexité du système étudié. En effet, il existe une très forte hétérogénéité de l’environnement dans lequel évolue le véhicule tant au niveau de l’interaction entre les roues et la route que celui de la résistance aérodynamique, ou encore au niveau des composants du véhicules (masses suspendues, imperfections des moteurs,...). Pour ces raisons, les auteurs ont généralement recours aux hypothèses simplificatrices pour pouvoir développer des modèles raisonnablement exploitables [Genta, 1997] [Pusca, 2002] [Hori, 2004].

Pour le besoin de notre travail de thèse, nous avons adopté cette approche de simplification dans le but d’aller au plus vite vers le développement d’une première version d’un simulateur de VE. Pour ce faire, on suppose que la route sur laquelle évolue le véhicule est plane et que le déplacement vertical, l’angle de tangage et l’angle de roulis sont inexistant. En outre, la variation de l’adhérence des roues à la route, est prise en compte. Ces hypothèses réduisent le véhicule à un corps solide dont le mouvement est à trois degrés de libertés (déplacement bidimensionnel dans le plan de la route et rotation autour de la direction verticale).

On note que le modèle mécanique exposé dans cette section, comme ceux des autres composants du véhicule, sera dédié à la simulation mais aussi à la commande. Les modèles destinés à la commande peuvent être les plus simples possibles alors que ceux de la simulation doivent être les plus précis possibles. C'est pourquoi, il convient d'adopter un modèle conceptuel de l'outil informatique escompté, capable d'admettre plusieurs niveaux d'abstraction des modèles physiques dont celui du comportement mécanique. Le futur logiciel devra alors permettre, en fonction du besoin, l'affinement de ces derniers après leur implantation.

2.3.1 Dynamique du véhicule

Dans ce paragraphe, nous décrivons la modélisation du véhicule en considérant un déplacement le long des axes x , y , ainsi qu'une rotation autour l'axe Z . Dans ce cas, l'automobile peut être assimilée à un corps solide et les contacts des pneus au sol à des points. Une symétrie par rapport au plan vertical (XoZ) et une équi-répartition des charges sont supposées. Pour décrire la cinématique du véhicule, nous employons un modèle à trois degrés de liberté. Le système d'axes cartésien (XoY) est utilisé pour étudier le déplacement du centre du gravité (CG) du véhicule auquel on associe un système d'axes (x,y). On définit aussi l'angle de lacet (ψ) entre les repères $\vec{o}\vec{x}$ et $\vec{o}\vec{X}$ (FIG. 2.4).

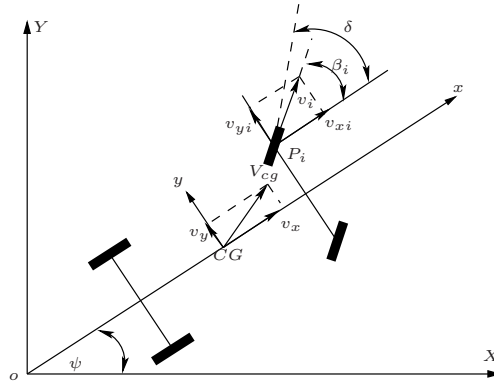


FIG. 2.4 – Mouvement du véhicule dans le système d'axes (X,Y)

Ainsi, l'énergie cinétique du véhicule, en négligeant celle des roues, s'exprime par [Genta, 1997] [Pusca, 2002] :

$$E_c = 0.5 \times M_v \times (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + 0.5 \times J_v \times \dot{\psi}^2 \quad (2.11)$$

La théorie de Lagrange permet alors de définir l'équation de mouvement du véhicule comme suit :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_c}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial E_c}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.12)$$

avec q_i les coordonnées du CG du véhicule dans le repère inertiel (X, Y, ψ) et Q_i sont les forces généralisées F_X, F_Y et le moment de rotation total autour de l'axe Z, M_z .

D'où les équations :

$$\begin{aligned} M_v \ddot{X} &= F_X \\ M_v \ddot{Y} &= F_Y \\ J_v \ddot{\psi} &= M_z \end{aligned} \quad (2.13)$$

A l'aide d'une simple rotation d'un angle ψ autour de l'axe $\vec{o}z$, on peut évaluer le vecteur vitesse associé au CG du véhicule [Genta, 1997] [Pusca, 2002] :

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ r \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Où v_x, v_y sont les vitesses du véhicule dans le plan (x,y) , et $r = \dot{\psi}$ est sa vitesse de lacet. En dérivant (2.14) par rapport au temps, on obtient les accélérations :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\dot{X}) &= \dot{v}_x \cos(\psi) - v_x \dot{\psi} \sin(\psi) - \dot{v}_y \sin(\psi) - v_y \dot{\psi} \cos(\psi) \\ \frac{d}{dt}(\dot{Y}) &= \dot{v}_x \sin(\psi) + v_x \dot{\psi} \cos(\psi) + \dot{v}_y \cos(\psi) - v_y \dot{\psi} \sin(\psi) \\ \frac{d}{dt}(\dot{\psi}) &= \dot{r} \end{aligned} \quad (2.15)$$

En tenant compte de (2.13), dans les équations (2.15), on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{F_X}{M_v} &= (\dot{v}_x - \dot{\psi} v_y) \cos(\psi) - (\dot{v}_y + \dot{\psi} v_x) \sin(\psi) \\ \frac{F_Y}{M_v} &= (\dot{v}_x - \dot{\psi} v_y) \sin(\psi) + (\dot{v}_y + \dot{\psi} v_x) \cos(\psi) \\ \frac{M_z}{J_v} &= \dot{r} \end{aligned} \quad (2.16)$$

En substituant l'équation (2.14) dans (2.16), on obtient les expressions des accélérations au centre de gravité du véhicule comme suit :

$$\begin{aligned}\frac{F_x}{M_v} &= (\dot{v}_x - r v_y) \\ \frac{F_y}{M_v} &= (\dot{v}_y + r v_x) \\ \frac{M_z}{J_v} &= \dot{r}\end{aligned}\quad (2.17)$$

Pour établir les forces qui agissent sur le véhicule, on considère le repère (x, y) avec un braquage d'un angle δ des roues avant. Les forces qui agissent à l'interface roue-sol sont montrées sur la figure (FIG. 2.5).

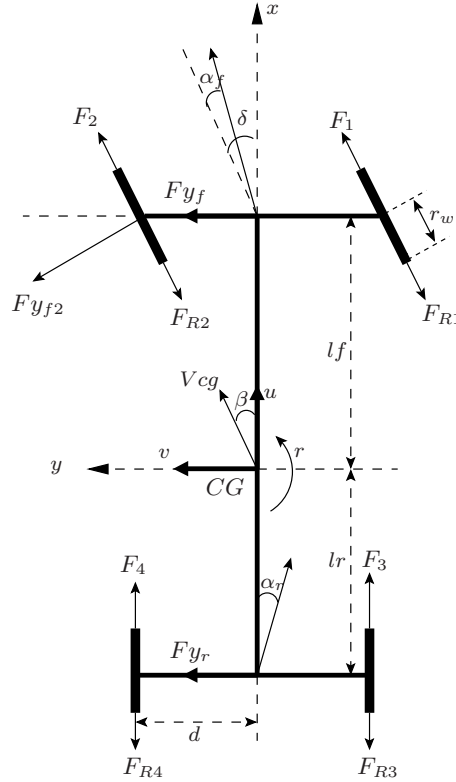


FIG. 2.5 – Forces au niveau des roues du véhicule, dans le plan (x,y)

La résultante des forces F_x dans la direction (x), incluant la force aérodynamique et la résistance due à la pente α_p à gravir, est :

$$F_x = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \cos(\delta_i) - \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \sin(\delta_i) - 0.5\rho S_f C_{px} v_x^2 - M_v g \sin(\alpha_p) \quad (2.18)$$

Les forces de traction et celles de freinage sont incluses dans F_{xi} . La force aérodynamique est opposée au sens du déplacement relatif de l'automobile et de l'air. On considère qu'elle est appliquée au centre de gravité du véhicule.

Idem, on obtient la résultante des forces selon la direction (y) :

$$F_y = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \sin(\delta_i) + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \cos(\delta_i) + 0.5\rho S_f C_{py} v_y^2 + M_v g \sin(\alpha_{pt}) \quad (2.19)$$

Où $M_v g \sin(\alpha_{pt})$ est la force dûe à la pente transversale α_{pt} de la route.

Le moment des forces agissant sur l'axe z est alors donné par la relation suivante :

$$\begin{aligned} M_z &= \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \sin(\delta_i) x_i + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \cos(\delta_i) x_i - \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \cos(\delta_i) y_i \\ &+ \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \sin(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 M_{ai} + 0.5\rho S_f C_{M_z} v^2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Où x_i et y_i estiment les coordonnées des centres des surfaces de contacts des roues avec le sol et M_{ai} sont les couples d'auto-alignement.

En substituant (2.18), (2.19) et (2.20) dans (2.17), on obtient les expressions définitives des équations de mouvement :

$$\begin{aligned} M_v(\dot{v}_x - r v_y) &= \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \cos(\delta_i) - \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \sin(\delta_i) - 0.5\rho S_f C_{px} v_x^2 \\ &- M_v g \sin(\alpha_p) \\ M_v(\dot{v}_y + r v_x) &= \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \sin(\delta_i) + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \cos(\delta_i) + 0.5\rho S_f C_{py} v_y^2 \\ &+ M_v g \sin(\alpha_{pt}) \\ J_v \dot{r} &= \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \sin(\delta_i) x_i + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \cos(\delta_i) x_i - \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \cos(\delta_i) y_i \\ &+ \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \sin(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 M_{ai} + 0.5\rho S_f C_{M_z} v^2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.3.2 Angle de glissement

Afin d'apprécier les amplitudes des forces latérales s'exerçant sur la roue, on utilise l'angle de glissement. En faisant référence à la figure (FIG. 2.4), cet angle (α_i) s'exprime,

pour un angle de braquage δ_i , comme suit [Genta, 1997] [Pusca, 2002] :

$$\alpha_i = \beta_i - \delta_i \quad (2.22)$$

avec β_i , angle de direction de la roue i , et donné par la relation suivante :

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{v_{yi}}{v_{xi}}\right) = \arctan\left(\frac{v_y + \dot{\psi} \cdot x_i}{v_x - \dot{\psi} \cdot y_i}\right) \quad (2.23)$$

2.3.3 Comportement d'une roue vis-à-vis du sol : glissement, patinage et adhérence

On considère un contact élastique sphère-plan, la géométrie de ce contact et la répartition des contraintes peuvent être calculées par la théorie de Hertz. Un glissement relatif entre les deux corps se manifeste à l'interface lorsque la contrainte de glissement τ est supérieure au produit $\mu \times P$ (μ : coefficient de frottement, P : contrainte de compression à la surface). Le micro-glissement s'amorce à la périphérie du contact afin d'accommoder la contrainte tangentielle [Pusca, 2002]. La figure (FIG. 2.6) montre deux zones :

- zone A-C, lorsque la force tangentielle est nulle, le point C est confondu avec B et il n'y a pas de glissement.
- zone C-B, le micro-glissement avance de C vers A au fur et à mesure que la force tangentielle croît.

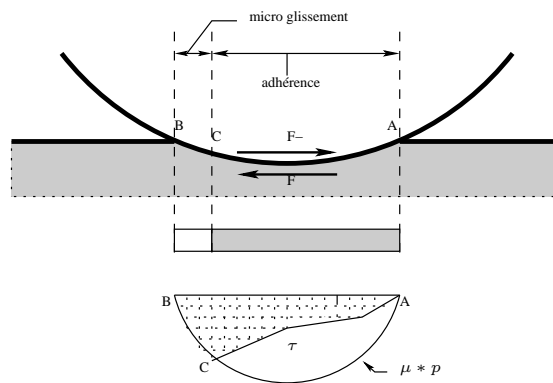


FIG. 2.6 – Contraintes à l'interface et glissement

La puissance mécanique de la chaîne de traction électrique est transmise au véhicule à travers les roues. Les efforts qui prennent naissance sur ces dernières, lors de l'application d'un effort de traction et/ou l'engagement du véhicule dans un virage, dépendent cruciallement des états du pneumatique, du sol et de l'interaction entre eux. Soit une roue

sollicitée par une force latérale F_y (cas d'un virage par exemple), sur laquelle on applique un effort de traction via le couple Γ_m . Sous l'action de Γ_m , la roue voit naître une force F_{t_x} telle qu'il est présenté sur la figure (FIG. 2.7).

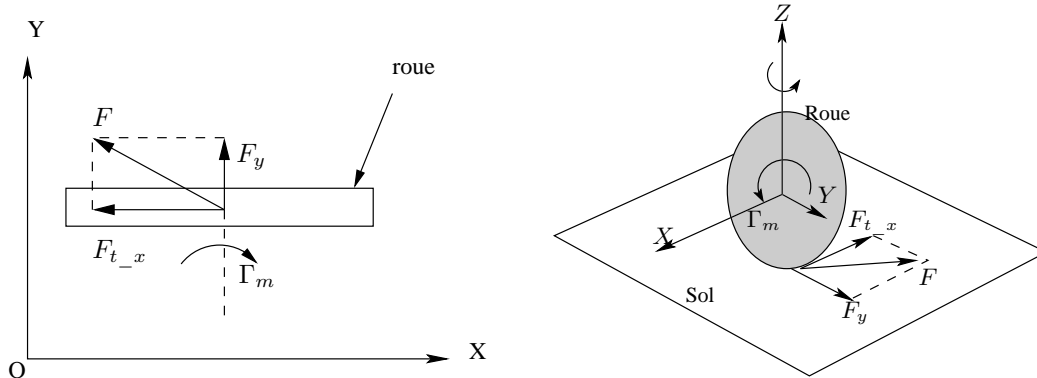


FIG. 2.7 – Efforts sur une roue sous l'action d'un couple moteur

La résultante de ces deux forces F , ne doit pas excéder une valeur limite F_{a_max} appelée (forces d'adhérence maximale). F s'exprime par la relation suivante :

$$F = \sqrt{F_y^2 + F_{t_x}^2} \quad (2.24)$$

Il est bien visible qu'il est possible que la roue glisse latéralement par le simple fait d'appliquer un effort de traction mal dosé lors d'un virage. En effet, la roue étant initialement stable mais soumise à la force centrifuge $F_y < F_{a_max}$, l'application d'un couple moteur sur elle engendre une force F_{t_x} telle que $F_y^2 + F_{t_x}^2 > F_{a_max}^2$; ce qui provoque le dérapage du véhicule. Le phénomène peut également survenir lors d'un freinage trop brusque.

Au cours du mouvement, les roues du véhicule considéré peuvent se trouver dans l'un des états suivants [Pusca, 2002] :

- roue motrice : Elle est soumise à un couple moteur qui lui est transmis via l'arbre mécanique. Dans ce cas, la vitesse de rotation de la roue est dans le même sens que celui du couple moteur. La roue peut s'emballer lors de la perte d'adhérence, on parle alors d'une roue motrice emballée.
- roue tractée : Elle est soumise à une force de traction appliquée à son axe.
- roue freinée : Elle est soumise, en plus des couples résistants à l'avancement du véhicule, à un couple de freinage dont le sens est opposé à celui de sa vitesse de rotation initiale. Un freinage trop important conduit généralement au blocage de la roue (roue bloquée).

En résumé, on peut dire que les différents états de la roue dépendent des efforts qui lui sont appliqués et de la vitesse de rotation ω . Le tableau (TAB. 2.3) définit le facteur de glissement longitudinal (par rapport au sens de rotation de la roue) [Shino *et al.*, 2000] [Hong *et al.*, 2001] [Pusca, 2002] [Hori, 2004] :

TAB. 2.3 – Facteur de glissement : lois et valeurs

Etat de la roue	Facteur de glissement s	Valeurs
roue tractée	$s = \frac{\omega - \omega_0}{\omega}$	$s = 0$
roue motrice	$s = \frac{\omega - \omega_0}{\max(\omega, \omega_0)}$	$0 < s < 1$
roue motrice emballée	$s = \frac{\omega - \omega_0}{\max(\omega, \omega_0)}$	$s = 1$
roue freinée	$s = \frac{\omega - \omega_0}{\max(\omega, \omega_0)}$	$-1 < s < 0$
roue bloquée	$s = \frac{\omega - \omega_0}{\max(\omega, \omega_0)}$	$s = -1$

Où ω_0 est la vitesse angulaire d'une roue fictive tractée qui roule sans glissement.

Concernant le glissement latéral (par rapport au plan de rotation de la roue), il est évalué à travers l'angle de glissement (ou de dérive) α , explicité par la figure (FIG. 2.8).

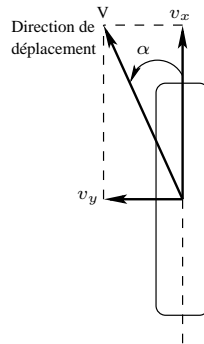


FIG. 2.8 – glissement latéral de la roue

On a,

$$\alpha = \arctan \frac{v_y}{v_x} \quad (2.25)$$

En se basant sur le vecteur vitesse du centre de gravité du véhicule $[v_x v_y]^t$ et de ses paramètres géométriques, on peut définir le glissement latéral pour les deux train avant

et arrière, respectivement α_f et α_r , comme suit [Smith *et al.*, 1995] :

$$\begin{pmatrix} \alpha_f \\ \alpha_r \end{pmatrix} = \frac{1}{v_x} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_f \\ 1 & -l_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_y \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \delta \quad (2.26)$$

Où,

- l_f : distance perpendiculaire entre le train avant et le centre de gravité ;
- l_r : distance perpendiculaire entre le train arrière et le centre de gravité ;
- δ : angle de braquage des roues avants.

On définit le facteur d'adhérence longitudinal d'une roue μ_a comme le rapport de la force F_x et de la charge verticale N dont cette roue est le siège :

$$\mu_a = \frac{F_x}{N} \quad (2.27)$$

Le paramètre μ_a varie de façon non linéaire en fonction du glissement s de la roue, qu'elle soit motrice ou freinée. La figure (FIG. 2.9) montre le profil de cette fonction, on y distingue clairement les zones de fonctionnement stables et instables. La perte d'adhérence se manifeste alors soit par un glissement longitudinal lors du blocage de la roue, ou par un emballement de cette dernière lors d'une accélération.

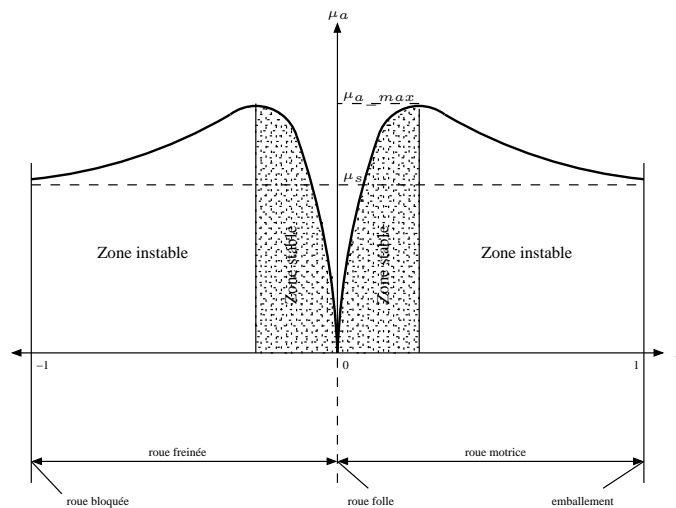


FIG. 2.9 – Profil du coefficient d'adhérence longitudinal en fonction du glissement d'une roue

Il est à noter qu'en plus des paramètres du véhicule tels que, sa vitesse V_{veh} et sa charge verticale N , la nature du revêtement du sol influence fortement le coefficient d'adhérence (FIG. 2.10).

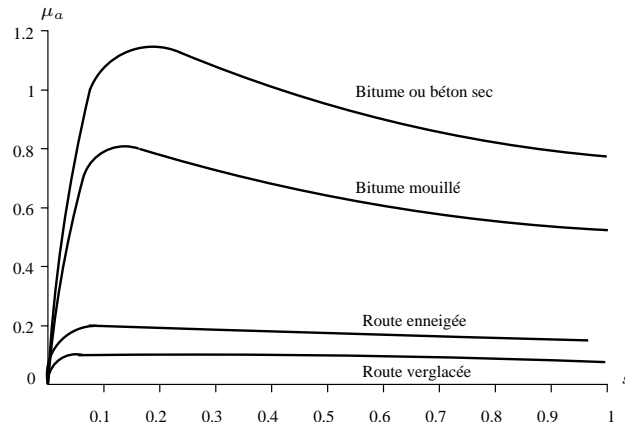


FIG. 2.10 – Courbes de l’adhérence pour différents revêtements de la route

Dans notre travail de thèse, nous avons utilisé une fonction d’interpolation linéaire pour évaluer la fonction μ_a .

2.3.4 Modèle mécanique en vue de la simulation du véhicule

Nous considérons le cas d’un véhicule à quatre roues motrices tel qu’il est présenté sur la figure (FIG. 2.11).

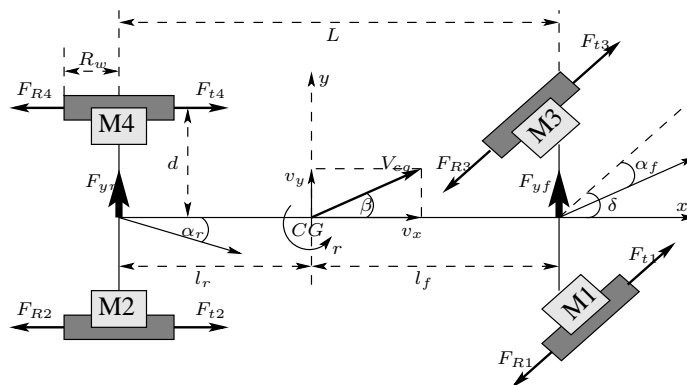


FIG. 2.11 – Schéma représentatif des grandeurs mécaniques du véhicule étudié

On formule les hypothèses suivantes :

- roues directrices à l’avant du véhicule ;
- angle d’inclinaison transversale de la route $\alpha_{pt} = 0$;
- repère associé au CG du véhicule.

Après des simples manipulations mathématiques, on aboutit aux équations dynamiques ci-dessous en partant du système décrit par l'équation (2.21) :

$$\begin{aligned}
 F_x &= M_v(\dot{v}_x - rv_y) \\
 &= (F_{t1} + F_{t3}) \cos(\delta) + F_{t2} + F_{t4} - (F_{R1} + F_{R3}) \cos(\delta) \\
 &\quad - F_{R2} - F_{R4} - F_{yf} \sin(\delta) \\
 F_y &= M_v(\dot{v}_y + rv_x) \\
 &= (F_{t1} + F_{t3}) \sin(\delta) - (F_{R1} + F_{R3}) \sin(\delta) + F_{yf} + F_{yr} \\
 M_z &= J_v \dot{r} \\
 &= l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + d[(F_{t1} - F_{t3}) \cos(\delta) + F_{t2} - F_{t4} \\
 &\quad + (F_{R3} - F_{R1}) \cos(\delta) - F_{R2} + F_{R4}]
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Où, F_{yf} et F_{yr} les forces latérales et elles sont données par [Fujimoto *et al.*, 2004] :

$$\begin{aligned}
 F_{yf} &= -C_{yf} \alpha_f \\
 F_{yr} &= -C_{yr} \alpha_r
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

avec, C_{yf} et C_{yr} les rigidités au glissement latéral des pneus avant et arrière.

Moyennant des nouvelles hypothèses, ce modèle (2.28) pourra être simplifié un peu plus. En effet, en supposant que les efforts sont régulièrement répartis sur les quatre roues, que l'angle de braquage est de faibles valeurs (typiquement entre -7° et $+7^\circ$) et que le centre de gravité du véhicule est localisé de façon stable sur son axe longitudinal, on aboutit au modèle simplifié (2.30) qui sera implanté dans notre logiciel.

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_x &= v_y r + \frac{F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + F_{t4} - F_{res}}{M_v} + \frac{C_{yf} \delta}{M_v} \left(\frac{v_y + r l_r}{v_x} - \delta \right) \\
 \dot{v}_y &= \left(-\frac{C_{yr} + C_{yf}}{M_v v_x} \right) v_y + \left(\frac{C_{yr} l_r - C_{yf} l_f}{M_v v_x} - v_x \right) r + \frac{C_{yf}}{M_v} \delta \\
 \dot{r} &= \left(\frac{C_{yr} l_r - C_{yf} l_f}{J_v v_x} \right) v_y - \left(\frac{C_{yr} l_r^2 + C_{yf} l_f^2}{J_v v_x} \right) r + \frac{C_{yf} l_f}{J_v} \delta \\
 &\quad + \frac{d}{J_v} (F_{t1} + F_{t2} - F_{t3} - F_{t4})
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

avec F_{res} , la résultante des forces résistantes, au roulement, due à la pente à gravir et aérodynamique.

A ce stade de modélisation du véhicule, il ne reste plus qu'à évaluer l'interaction entre les roues et le sol. Pour ce faire, nous utilisons la variation du coefficient de l'adhérence en fonction de glissements longitudinaux, exprimée par [Genta, 1997] :

$$\mu_a = A(1 - e^{-Bs}) + Cs^2 - Ds \quad (2.31)$$

Avec :

$$B = \left(\frac{K}{\alpha + b}\right)^{1/n} \quad (2.32)$$

Les coefficients A , C , D , K , b , et n déterminés à partir des courbes expérimentales et ils n'ont aucun sens physique.

La caractéristique de cette fonction (FIG. 2.12) montre une diminution de l'adhérence longitudinale maximale pour une croissance de l'angle de glissement latérale α . Ceci peut être traduit par une diminution de la réserve d'adhérence pour la roue en cause.

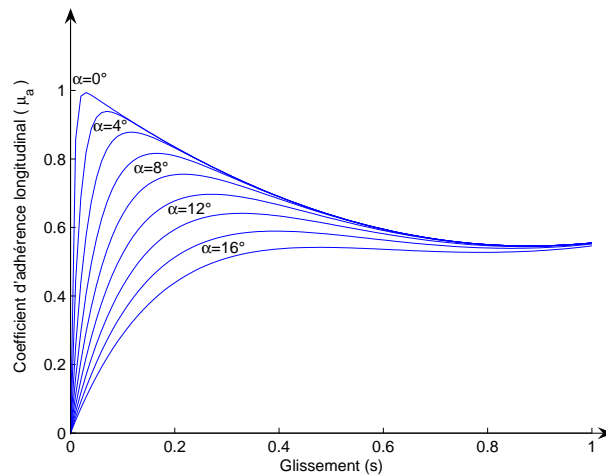


FIG. 2.12 – Coefficient d'adhérence longitudinal

Au niveau de chaque roue i ($i \in [1, 2, 3, 4]$), le coefficient de glissement longitudinal se calcule comme suit :

$$s_i = \frac{R_w \omega_i - u_{ti}}{\max(R_w \omega_i, u_{ti})} \quad (2.33)$$

Avec u_{ti} les vitesses linéaires du véhicule ramenées aux centres de des roues et données par [Esmailzadeh *et al.*, 2001] :

$$\begin{aligned}
 u_{t1} &= (v_x + dr) \cos(\delta) + (v_y + l_f r) \sin(\delta) \\
 u_{t2} &= v_x + dr \\
 u_{t3} &= (v_x - dr) \cos(\delta) + (v_y + l_f r) \sin(\delta) \\
 u_{t4} &= v_x - dr
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

Enfin, en supposant une répartition uniforme de la charge sur chaque roue la force de traction pour chaque roue est donnée par [Pusca, 2002] :

$$F_{ti} = \frac{gM_v}{4} \mu_i \cos(\alpha_p)
 \tag{2.35}$$

2.4 Modèle de la motorisation électrique

2.4.1 Méthodes de modélisation

Dans la littérature, il existe principalement trois approches concernant la modélisation des machines électriques. En choisissant de les présenter par leur degré de complexité croissants, nous avons :

- la modélisation de Park ;
- la modélisation par réseaux de perméances ; et
- la modélisation par éléments finis.

La **modélisation de Park (MP)** est construite à partir des équations globales du comportement électromagnétique de la machine [Ong, 1998]. Ce modèle fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. L'induction dans l'entrefer est sinusoïdale, la saturation du circuit magnétique, les pertes fer, les harmoniques d'encoches et d'espaces ne sont pas pris en compte dans la modélisation. En raison de la simplicité de la formulation algébrique, ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithmes de commande.

La **Modélisation par Réseaux de Perméances (MRP)** permet d'obtenir une meilleure précision avec un coût de calcul supérieur à celui des modèles de Park. La MRP consiste à modéliser le circuit magnétique de la machine par un schéma électrique équivalent [Roisse *et al.*, 1998]. La principale difficulté de la MRP se situe au niveau de la représentation de l'entrefer de la machine. Cette méthode constitue un intermédiaire

entre la modélisation de Park et la modélisation par éléments finis. Elle est inadéquate pour la formulation d'une commande mais elle semble être très intéressante pour tester la robustesse des algorithmes. En outre, elle peut contribuer à l'estimation des paramètres de la machine.

La **Modélisation par Éléments Finis (MEF)** est la plus précise. Malheureusement, les temps de calculs de cette approche sont rédhibitoires dans un contexte de commande de machines électriques. Néanmoins, lors d'un dimensionnement ou lors d'une estimation de paramètres de la machine, sa précision justifie son utilisation. Des logiciels tels que Flux2D permettent la modélisation par éléments finis des dispositifs électromagnétiques [Ced, 2005] [Ced, 2007].

2.4.2 Modèle de la machine utilisée

Pour l'élaboration de stratégies de commande, il faut trouver un compromis entre la complexité et la précision de la modélisation. Notre choix s'est dirigé vers le modèle construit à partir des équations globales de la machine. On se propose de réaliser la modélisation d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents possédant des enroulements produisant une FMM sinusoïdale et étant le siège d'une FEM induite sinusoïdale. La figure (FIG. 2.13) donne une représentation symbolique de cette machine.

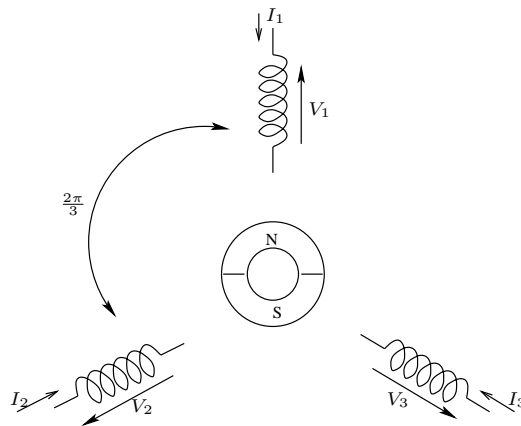


FIG. 2.13 – Représentation Symbolique de la machine triphasée étudiée

Les enroulements du stator sont le siège de courants alternatifs triphasés. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (2.36)$$

avec

- Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant en rad.s^{-1} ;
- ω : pulsation des courants alternatifs en rad.s^{-1} ; et
- p : nombre de paires de pôles.

Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor et donc le rotor ne peut tourner qu'à la vitesse de synchronisme.

On utilise les notations suivantes pour les variables et les paramètres de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) :

- V_a, V_b, V_c : tensions des trois phases statoriques (V)
- I_a, I_b, I_c : courants des trois phases statoriques (A)
- Ω : vitesse angulaire du rotor (rad.s^{-1}) ; ($\Omega = \Omega_s$)
- Γ_m : couple électromagnétique de la machine (N.m)
- θ_e : angle électrique du stator, ($\theta_e = p\Omega t$)
- L_s : inductance cyclique statorique (H)
- R_s : résistance d'un enroulement statorique (Ohm)
- K : constante fem (V/rad.s^{-1})
- p : nombre de paires de pôles

Les équations du modèle, représentant la MSAP en régime transitoire, sont les suivantes :

- Equations électriques :

$$\begin{aligned} L_s \frac{dI_a}{dt} &= V_a - R_s I_a + K\Omega \sin(\theta_e) \\ L_s \frac{dI_b}{dt} &= V_b - R_s I_b + K\Omega \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ L_s \frac{dI_c}{dt} &= V_c - R_s I_c + K\Omega \sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.37)$$

- Equation du couple électromagnétique :

$$\Gamma_m = -K I_a \sin(\theta_e) - K I_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) - K I_c \sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \quad (2.38)$$

2.5 Couplage entre le modèle mécanique et celui de la motorisation

Faisons référence à la figure (FIG. 2.14), le couplage entre la partie dynamique et celle de la motorisation se donne par la fameuse équation [Esmailzadeh *et al.*, 2001], [Pusca, 2002] :

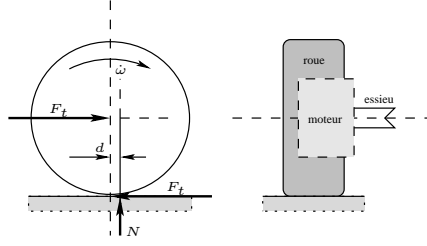


FIG. 2.14 – Couplage entre mécanique et motorisation

$$\begin{aligned} (J_w + J_m)\dot{\omega}_i &= \Gamma_{mi} - \Gamma_{ri} \\ \dot{\theta}_e &= p\omega \end{aligned} \quad (2.39)$$

avec :

- J_w : moment d'inertie de la roue (kg.m^2) ;
- J_m : moment d'inertie du moteur (kg.m^2) ;
- Γ_{mi} : couple moteur de la roue $i \in [1 \div 4]$ (N.m) ; et
- Γ_{ri} : couple résistant de la roue i (N.m).

Les expressions des couples résistants qui agissent sur chaque roue sont données par [Esmailzadeh *et al.*, 2001] :

$$\begin{aligned} \Gamma_{ri} &= R_w F_{ti} - d_z N_f (si : i \in [1, 3]) \\ \Gamma_{ri} &= R_w F_{ti} - d_z N_r (si : i \in [2, 4]) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Les valeurs de la distance d_z sont tout à fait petites (leur différence est habituellement égale à zéro) et peuvent être négligées [Genta, 1997]. En s'appuyant sur la figure (FIG. 2.15), les charge sur les essieux arrière N_r et avant N_f peuvent se déduire en écrivant la somme des couples qui agissent sur les points de contact des roues. En fonctionnement normal, la pente que gravit un véhicule arrive rarement à 12 degrés, et il monte cette pente à vitesse réduite. Dans ces conditions, en prenant l'hypothèse que les angles sont petits ($\sin(\alpha_p) = \alpha_p$) et que la vitesse est faible (donc l'influence de la force aérodynamique

peut être négligée) les équations des charges avant et arrière se simplifient comme suit [Pusca, 2002] :

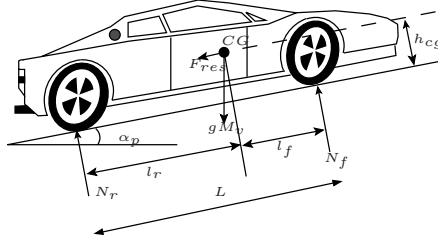


FIG. 2.15 – Forces agissant sur un véhicule dans un cas général de mouvement

$$\begin{aligned}
 N_f &= \frac{gM_v}{2} \left(\frac{l_r}{L} - \frac{h_{cg}}{gL} \frac{dV_{cg}}{dt} \alpha_p - \frac{h_{cg}}{L} \alpha_p \right) \\
 N_r &= \frac{gM_v}{2} \left(\frac{l_f}{L} + \frac{h_{cg}}{gL} \frac{dV_{cg}}{dt} \alpha_p + \frac{h_{cg}}{L} \alpha_p \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.41}$$

2.6 La commande du système

Dans le contexte de la traction électrique, le rendement énergétique de l'ensemble de la chaîne de traction est primordial. En effet, la source d'énergie étant limitée, la consommation énergétique doit être réduite autant que possible ce qui rend la commande plus complexe. L'étude des véhicules électriques caractérisé par des couplages électriques, magnétiques, et mécaniques, entre tout à fait dans la problématique des systèmes multidomaines. Diverses compétences sont donc nécessaires pour l'étude du systèmes de traction.

La tendance actuelle est d'avoir une vision plus large des systèmes électromécaniques. Un moteur n'est plus considéré comme une entité à part entière, mais comme un élément associé à son alimentation, sa charge mécanique et sa commande. La conversion électromécanique est ainsi de plus en plus envisagée d'une source d'origine vers un élément de réception [Bouscayrol *et al.*, 2006a].

2.6.1 La Représentation Energétique Macroscopique (REM)

Afin de répondre aux nouvelles contraintes d'étude des systèmes électromécaniques plus complexes, une représentation synthétique a été proposée par le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP). Dans cette section, nous utilisons cet outil de représentation qui a fait l'objet de plusieurs travaux [Bouscayrol, 2003] [Mercieca *et al.*, 2004] [Verhille *et al.*, 2004]. Cette Représentation Energétique Macroscopique (REM) n'a pas pour vocation de remplacer les représentations classiques, mais plutôt de les compléter par une vision globale, conformément à l'approche systémique. En effet, comme nous le verrons dans cette section, la REM peut être considérée comme une encapsulation de représentations plus conventionnelles et plus locales, déduites d'une approche analytique. Nous insistons sur la notion représentation qui n'est, en fait, qu'une organisation d'une modélisation donnée.

La REM est une description graphique d'un système de conversion d'énergie. Les divers éléments du système y sont décrits par des pictogrammes spécifiques reliés par des flèches symbolisant les variables d'interaction entre ses diverses composantes, i. e. leurs échanges énergétiques. Les formes et couleurs des divers pictogrammes sont définies avec précision. En effet, une vue d'ensemble doit permettre de localiser rapidement les éléments clefs du système.

Une Structure Maximale de Commande (SMC) se déduit naturellement de la REM à l'aide de règles d'inversion. L'application de cette méthodologie aux véhicules électriques

permet de structurer leur commande [Bouscayrol *et al.*, 2006b].

2.6.1.1 La REM du système

Nous retenons le système du véhicule montré au début de ce chapitre (FIG. 2.3). Deux moteurs synchrones à aimants permanents sont intégrés dans les deux roues arrière du véhicule. Ils sont alimentés par une batterie à travers deux onduleurs. Afin d'établir la commande, nous nous intéressons, dans cette partie uniquement, au déplacement longitudinal du véhicule. A cet effet, nous nous contenterons d'une modélisation quasi-statique pour la partie mécanique. Par contre, nous développons plus le modèle de la motorisation électrique.

La REM consiste en trois types d'éléments constitutifs nommés, les éléments sources, les éléments de conversion et les éléments d'accumulation. Elle possède une bibliothèque utilisable sous le logiciel Matlab/Simulink. Cette bibliothèque contient les éléments constitutifs et des blocs de commande comme le montre la figure (FIG. 2.16).

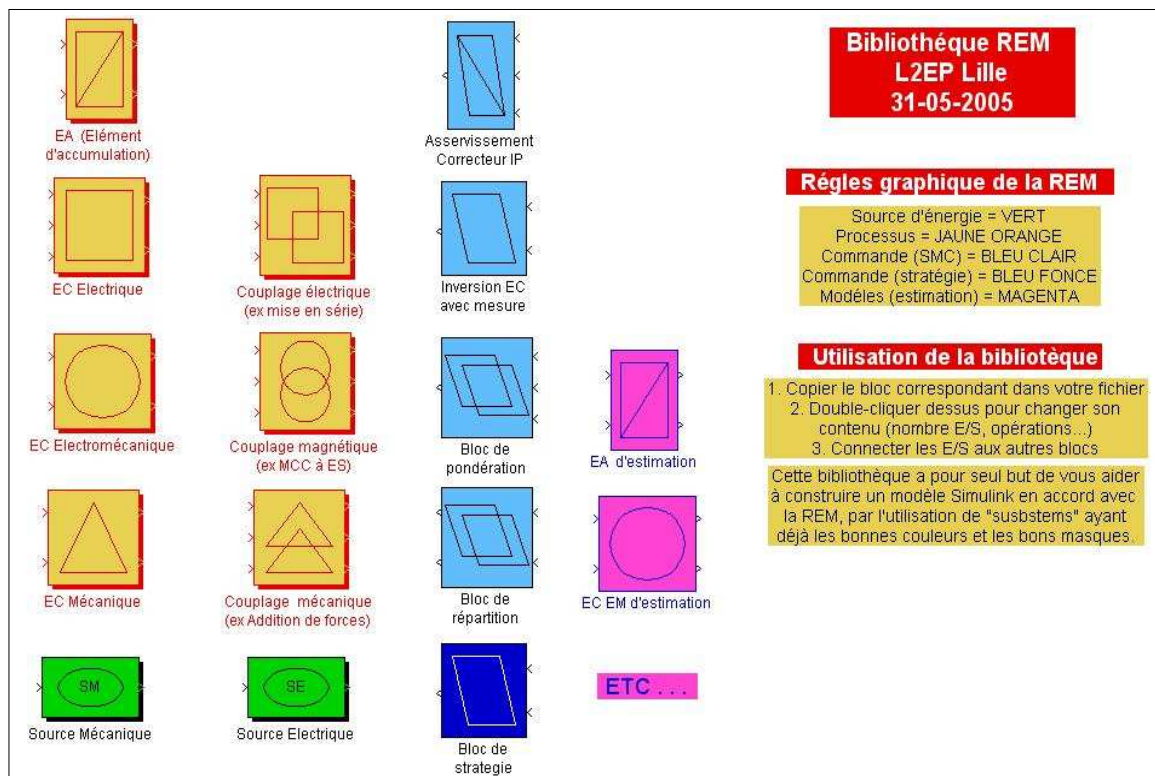


FIG. 2.16 – Bibliothèque de la REM et sa SMC

Une Source (S) produit une sortie qui n'admet pas de discontinuité. Elle possède une seule entrée (ou vecteur d'entrée) et une seule sortie (ou vecteur de sortie). Cette sortie

peut être perturbée par l'entrée de la source. Une source peut donc être réceptrice ou génératrice d'énergie. Une source peut être naturelle (exemple d'une batterie) ou fictive équivalente (exemple d'une association réseau et redresseur à diode). Les sources sont représentées par des ovales de couleur vert pâle (contour vert foncé).

Un élément de conversion (EC) assure une conversion énergétique (mise en forme de variables énergétiques, transfert de puissance) entre deux sources. Cette conversion est assurée sans accumulation d'énergie. Un élément de conversion possède en amont une entrée et une sortie, et en aval, une entrée et une sortie. Il peut posséder en outre une entrée supplémentaire dite de réglage qui a pour but de gérer la conversion énergétique. Cette entrée de réglage induira une consommation de puissance faible par rapport à la puissance convertie. Les éléments de conversion sont représentés par des polygones (une forme bien définie par type de conversion) de couleur orange (contour rouge). La description interne d'un élément de conversion peut être réalisée par schéma-bloc (double multiplicateur) ou par tout autre représentation graphique détaillée.

Un élément d'accumulation (EA) assure une accumulation d'énergie (effet tampon, réservoir d'énergie) entre deux sources, il peut posséder des pertes. Un élément d'accumulation possède en amont une entrée et une sortie, et en aval, une entrée et une sortie. Il ne possède pas d'entrée supplémentaire de réglage. Les éléments d'accumulation sont représentés par des rectangles avec une barre oblique de couleur orange.

La REM du système d'étude est réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, les REM des éléments constituant le système sont définies. Dans un second temps, la REM globale est obtenue par association des REM préliminaires.

REM des sources

Nous distinguons deux sources pour le système d'étude, une source électrique (SE), qui correspond à l'alimentation des moteurs, représente la batterie d'accumulateur. Elle applique la tension constante V_{dc} de la batterie aux bornes de l'onduleur. La seconde source est mécanique, elle correspond à l'environnement du véhicule. Cette dernière reçoit à l'entrée la vitesse du véhicule V_{veh} pour en produire à la sortie la force de résistances à l'avancement de la voiture F_{res} . La force de résistance et la vitesse du véhicule sont reliées par la relation suivante :

$$F_{res} = F_{roll} + C_{aero} V_{veh}^2 \quad (2.42)$$

Où F_{roll} , est la force résistance au roulement donnée par l'équation :

$$F_{roll} = gM_v(1.25 \times 10^{-3} + 2.5 \times 10^{-6}V_{veh}^2) \quad (2.43)$$

et C_{aero} est le coefficient de la force aérodynamique déterminé par l'expression :

$$C_{aero} = \rho C_x S_f / 2 \quad (2.44)$$

Quant à la force de résistance due à la pente à gravir, elle n'est pas prise en compte par la commande. Nous supposons que la voiture roule sur une route plate. La figure suivante (FIG. 2.17) met en lumière les entrées et les sorties de ces deux sources ainsi que ce qui est à l'intérieur de ces deux blocs.

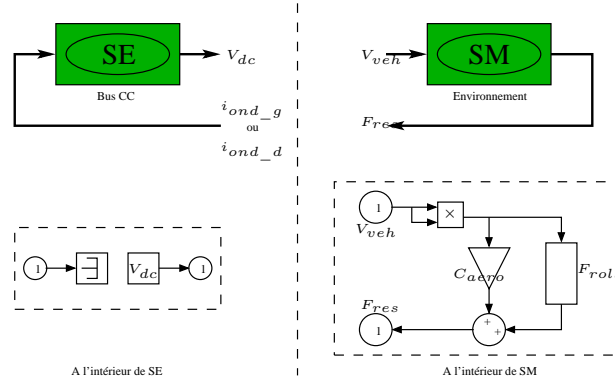


FIG. 2.17 – REM des sources, électrique et mécanique

REM de l'onduleur

L'onduleur est considéré ici comme une entité à part entière. Dans notre cas, la tension source est celle du bus continu, et les courants sources, sont ceux dans les enroulements des moteurs. Une fonction de modulation ou de conversion m_{ond} , définit la fonctionnalité globale de l'onduleur. Cette fonction permet de faire le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie. Les relations entre les entrées et les sorties sont des relations vectorielles :

$$\begin{aligned} U_{ond} &= m_{ond}V_{dc} \\ i_{ond} &= m_{ond}i_{abc} \end{aligned} \quad (2.45)$$

Il est représenté sur la figure (FIG. 2.18) les entrées et les sorties de la REM de l'onduleur.

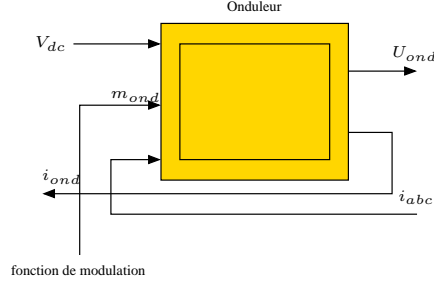


FIG. 2.18 – REM de l'onduleur

REM du moteur synchrone à aimants permanents

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est modélisé par un élément de conversion électromécanique. Le modèle en régime transitoire est exprimé dans un repère de Park afin d'en simplifier ses équations selon les hypothèses classiques (voir §2.4). Le repère d'étude (d, q) est tournant diphasé orthonormé, dont l'angle avec la phase statorique est θ . En effet, le modèle du MSAP utilisé pour élaborer la commande doit satisfaire les deux critères (complexité et précision) à la fois.

Une transformation du repère statorique (abc) au repère rotorique (dq) est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

Les équations du MSAP dans le repère dq peuvent alors s'écrire :

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(v_d - R_a i_d + L_q i_q \omega_m) \quad (2.47)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(v_q - R_a i_q - (L_d i_d + \phi_{pm})\omega_m) \quad (2.48)$$

$$\Gamma_{em} = \frac{2p}{3}(i_d i_q (L_d - L_q) + i_q \phi_{pm}) \quad (2.49)$$

Nous pouvons écrire également les équations mécaniques :

$$(J_w + J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Gamma_{em} - \Gamma_{res} \quad (2.50)$$

avec

$$\Gamma_{res} = \frac{F_{res} V_{roue}}{\Omega_{roue}} \quad (2.51)$$

et

$$\Omega_{mec} = \frac{\omega}{p} \quad (2.52)$$

Enfin, la transformation, qui permet de transférer les grandeurs du repère dq vers le repère abc , est donnée par l'expression :

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

La REM du MSAP et son implantation sous Matlab/Simulink sont illustrées sur la figure (FIG. 2.19).

REM du couplage mécanique

Le contact entre la roue et la route n'est pas pris en compte dans cette étude de commande, même s'il correspond à un problème majeur de la traction automobile. Les roues produisent une vitesse linéaire d'une vitesse angulaire. Les forces de traction peuvent être calculées à partir du couple du MSAP. Ainsi, la vitesse angulaire de la roue peut être calculée de la vitesse du véhicule. La REM d'une roue est présentée sur la figure (FIG. 2.20).

$$\begin{aligned} F_{roue} &= \frac{1}{R_w} \Gamma_{em} \\ \omega_{roue} &= \frac{1}{R_w} V_{veh} \end{aligned} \quad (2.54)$$

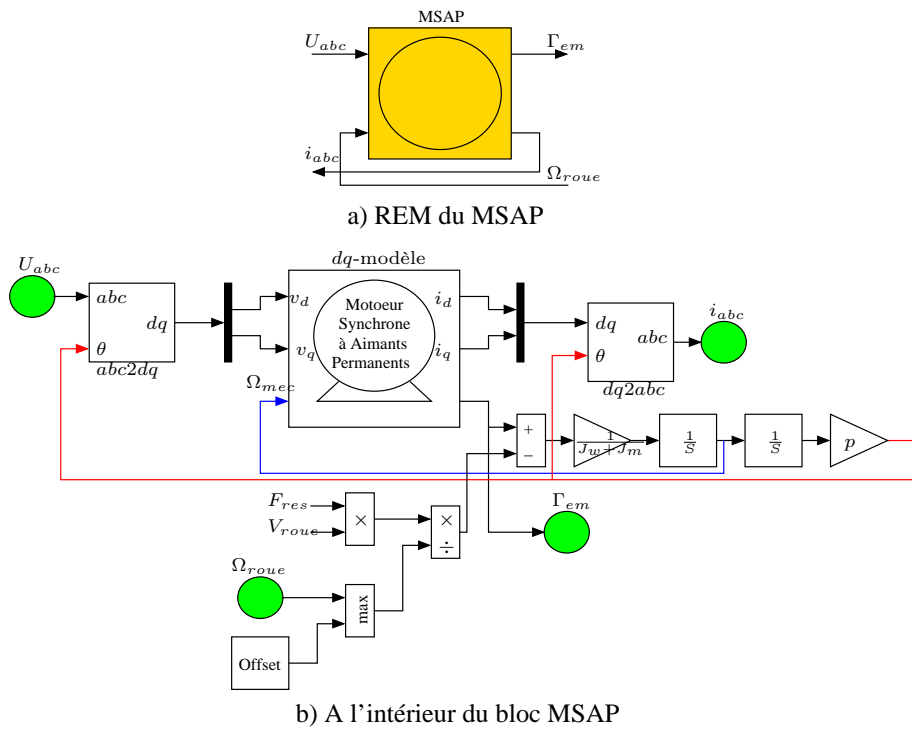


FIG. 2.19 – REM du MSAP

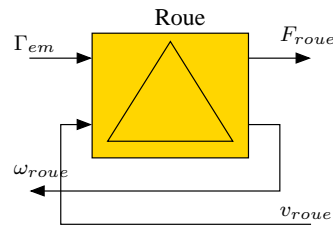


FIG. 2.20 – REM de la roue

Le châssis du véhicule est décomposé en deux fonctions. Un couplage exprime la sommation des forces de traction dues à chacun des moteurs. La figure (FIG. 2.21) illustre la REM de ce couplage.

$$\begin{aligned}
 F_{tot} &= F_{roue_g} + F_{roue_d} \\
 v_{roue_g} &= v_{roue_d} = V_{veh}
 \end{aligned}
 \tag{2.55}$$

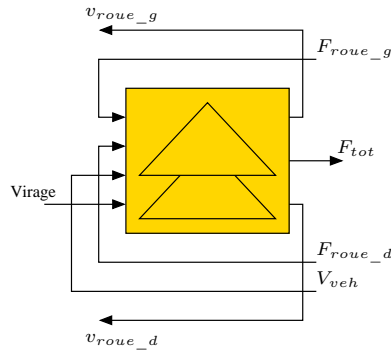


FIG. 2.21 – REM du couplage mécanique

On peut de plus prendre en compte les virages en différenciant les vitesses linéaires au niveau des roues (2.56), en prenant en compte le rayon de courbure R_{courb} et la largeur du véhicule l_{veh} (distance inter-roues motrices).

$$\begin{aligned} v_{roue_g} &= \left(\frac{R_{courb} + l_{veh}/2}{R_{courb}} \right) V_{veh} \\ v_{roue_d} &= \left(\frac{R_{courb} - l_{veh}/2}{R_{courb}} \right) V_{veh} \end{aligned} \quad (2.56)$$

La masse du véhicule est un élément d'accumulation dont la variable d'état est la vitesse du véhicule V_{veh} induite par la force globale de traction F_{tot} et celle de résistance à l'avancement F_{res} . La REM de cette partie est montrée sur la figure (FIG. 2.22).

$$M_v \frac{dV_{veh}}{dt} = F_{tot} - F_{res} \quad (2.57)$$

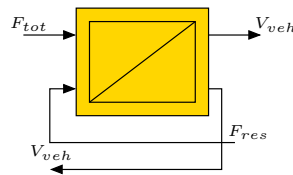


FIG. 2.22 – REM du châssis

2.6.1.2 La REM globale du système étudié

La REM globale du système (FIG. 2.23) se déduit ainsi des REM des éléments constitutifs et des REM de couplages déterminées par leurs associations.

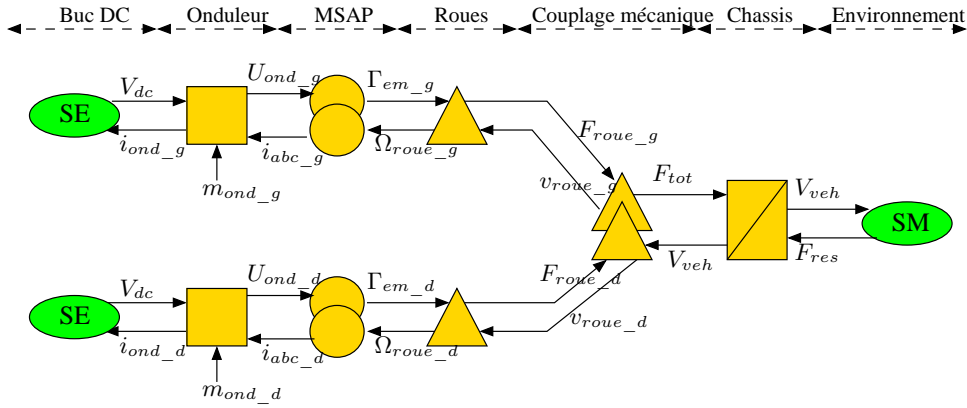


FIG. 2.23 – REM du système d'application

2.6.2 La SMC du système étudié

L'objectif est de déterminer la structuration de la commande d'un système avec plusieurs composantes de puissance. Elle sera déduite par une inversion de la REM. Cette méthodologie correspond à une gestion de l'énergie au plus près des composantes de puissance.

On considère un cahier des charges pour lequel une consigne de vitesse est délivrée par le conducteur via la pédale d'accélération. En fonction de deux chaînes de réglage présentant les deux moteurs (gauche et droite), l'application des règles d'inversion mène à une structure maximale de commande (SMC) (FIG. 2.24).

La construction de la structure maximale de commande correspond à une extension du principe d'inversion à la représentation énergétique macroscopique. Les blocs de commande seront représentés par des parallélogrammes de couleur bleu clair. Ils ne représentent tous qu'une manipulation d'information (homogénéité de la commande). Les mesures seront représentées par un gros point sur la variable à mesurer. Les variables échangées seront soit représentées par des traits continus (information obligatoire) soit par des traits discontinues (information facultative, qui pourra faire l'objet d'une simplification).

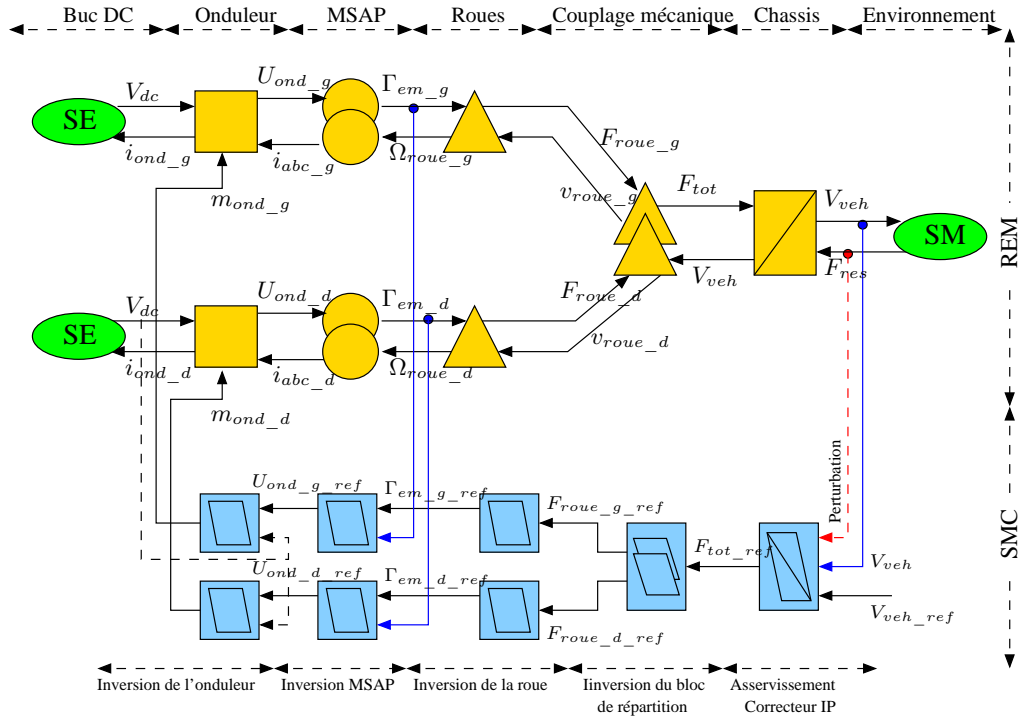


FIG. 2.24 – REM et sa SMC du système d'application

Inversion du châssis

Le châssis du véhicule est un élément d'accumulation. Par définition, la sortie d'un élément d'accumulation d'énergie est une variable d'état. La relation interne, sortie fonction des entrées, est donc de nature causale (intégrale) et ne peut être inversée directement. Conformément au principe d'inversion, une inversion indirecte est alors réalisée au travers d'un asservissement de la sortie.

De plus, un élément d'accumulation possède deux entrées, une en amont et une en aval. Si l'entrée amont est choisie comme variable de réglage, l'entrée aval devient alors une perturbation. Son effet est alors rejeté explicitement au travers d'une compensation ou d'une linéarisation dynamique. Dans sa version maximale, l'inversion d'un élément d'accumulation est ainsi composée d'un correcteur, d'un rejet explicite de perturbation et requiert deux mesures (celle de la sortie et celle de l'entrée de perturbation).

Le châssis comportant un élément de couplage aval, sa résolution nécessite un coefficient de répartition K_{rep} :

$$\begin{aligned} F_{roue_g_ref} &= K_{rep} F_{tot} \\ F_{roue_d_ref} &= (1 - K_{rep}) F_{tot} \end{aligned} \quad (2.58)$$

Dans la plupart des cas, le coefficient $K_{rep} = 1/2$ pour répartir uniformément les forces de traction. Si cette solution classique est évidente en ligne droite, on peut penser que d'autres choix sont possibles pour les virages. Nous nous limiterons cependant au cas classique.

Un élément de conversion possède des relations caractéristiques (sorties en fonction des entrées) atemporelles. L'inversion d'un tel élément peut alors être directe sans nécessité d'asservissement. En effet, la roue est modélisée par un élément de conversion mécanique. La relation entre sa sortie et son entrée peut être donnée par l'expression suivante :

$$\begin{aligned}\Gamma_{em_g_ref} &= R_w F_{roue_g_ref} \\ \Gamma_{em_d_ref} &= R_w F_{roue_d_ref}\end{aligned}\tag{2.59}$$

Inversion du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Le moteur synchrone à aimants permanents est modélisé par un élément de conversion électromécanique. Il permet une conversion entre une source électrique et une source mécanique, en utilisant une alternance d'éléments de conversion et d'éléments d'accumulation. Nous avons réalisé l'inversion de cet élément en utilisant trois contrôleurs de type PID, un pour le couple moteur Γ_{em} et deux pour les deux courants i_d, i_q . La figure (FIG. 2.25) met en évidence la procédure d'inversion suivie pour ce type de conversion.

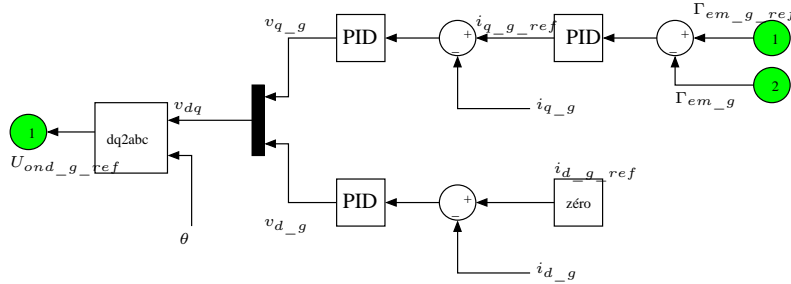


FIG. 2.25 – L'inversion du MSAP

En divisant la sortie de ce bloc, qui est la tension triphasée du moteur U_{abc} , par la tension d'alimentation (la batterie) V_{dc} , nous obtenons enfin la fonction de modulation m_{ond} .

2.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et à l'identification du comportement d'un véhicule automobile à deux ou quatre roues motrices. Le choix des modèles a été réalisé en fonction de l'utilisation envisagée. Pour la construction du modèle mécanique, les simplifications réalisées consistent à négliger l'angle de roulis et les paramètres qui s'y rapportent (coefficient de raideur au roulis, coefficient de braquage induit par le roulis, masse suspendue), et aussi à restreindre la variation des angles comme l'angle du glissement latéral, et l'angle de braquage des roues directrices, à faibles valeurs. Le carrossage de la roue, la pression et la flexibilité du pneumatique sont négligés. Une bonne partie des forces qui agissent sur l'automobile sont considérées et il apparaît tout à fait suffisant de s'y limiter dans le cadre de notre travail de thèse.

Pour la partie motorisation, nous sommes partis dans la modélisation du moteur roue (moteur intégré à la jante des roues) qui est un moteur de type synchrone à aimants permanents à fem sinusoïdale.

Afin de répondre aux nouvelles contraintes d'étude de systèmes multidisciplinaires plus complexes, une représentation synthétique a été retenue. La représentation énergétique macroscopique (REM) se déduit ainsi des REM des éléments constitutifs du système et des REM de couplages déterminées par leurs associations. Une structure maximale de commande (SMC) a été déduite de la REM globale du système à l'aide de règles d'inversions. Un schéma de commande de la vitesse du VE en intégrant le système de motorisation et le comportement dynamique, a été établi.

Dans le chapitre suivant, nous exposerons deux formalismes graphiques dans le but de choisir le plus adapté pour répondre au besoin du développement d'un logiciel de simulation des VE. Il s'agit du bond graph et de réseau dynamique hybride à composant. L'objectif étant l'aboutissement à un outil adéquat mettant en œuvre les modèles précédemment exposés et offrant la possibilité de les enrichir.

Chapitre 3

Formalisme graphique en vue de développement de simulateurs pour des véhicules électriques

3.1 Introduction

Au cours du chapitre précédant, nous avons proposé des modèles mathématiques représentant les aspects dynamiques, électriques et de commande permettant de simuler des voitures électriques à un moteur (conventionnelle) ou à deux voire quatre moteurs (entraînement direct) avec ou sans transmission mécanique.

En se basant sur ces modèles mathématiques, nous exposons, à travers le présent chapitre, deux formalismes graphiques permettant de représenter systématiquement ces modèles mathématiques au sein d'un outil informatique (programme). Il s'agit du Bond Graphe et du Réseau Dynamique Hybride à Composant (RDHC). Le choix entre ces deux formalismes est fait selon le critère de maniabilité et de facilité d'implantation lors du développement informatique (programmation). Une comparaison entre ces deux formalismes est présentée dans une optique de simulation des véhicules électriques. Les arguments en faveur du choix du modèle RDHC sont mis en évidence pour le développement du logiciel ELEVES (ELEctric VEhicle Simulator) objet de ce travail.

La deuxième partie de ce chapitre fera la lumière sur les modèles RDHC des trois systèmes étudiés.

3.2 Le formalisme Bond Graph

L'outil bond graph (ou graphe de liens), défini par Paynter en 1961, développé ensuite par Karnopp et Rosenberg, se situe comme l'intermédiaire entre le système physique et les modèles mathématiques qui lui sont associés. Les bond graphs constituent un outil graphique permettant de décrire les échanges d'énergie dans les systèmes, applicables à de nombreux domaines de la physique (électricité, mécanique et hydraulique,...) facilitant ainsi les échanges multidisciplinaires [Mosterman *et al.*, 1996] [Mosterman, 1997] [Gandanegara, 2003] [Saisset, 2004] [Chami, 2005]. Un lien de puissance est symbolisé par une demi flèche, dont l'orientation indique le sens de transfert de puissance. Ainsi la figure (FIG. 3.1) représente le transfert de puissance du sous système (A) vers le sous système (B).

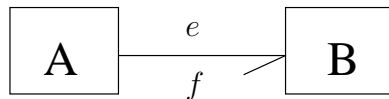


FIG. 3.1 – Bond graph : transfert de puissance de A vers B

Un lien entre deux objets est caractérisé par une variable de flux (f) et une variable d'effort (e) dont le produit exprime la puissance instantanée échangée. Une des caractéristiques fondamentales du formalisme bond graph est son aspect unifiant, quel que soit le domaine physique d'application (électrique, mécanique, hydraulique, chimique,...). Il est possible de visualiser les transferts énergétiques dans les systèmes multidomains grâce aux variables généralisées présentées dans le paragraphe suivant.

3.2.1 Les variables généralisées

Chaque lien de puissance véhicule deux informations simultanément : l'effort et le flux (voir figure FIG. 3.1). Ce sont les variables généralisées de puissance (leur produit étant la puissance transférée). On utilise aussi des variables généralisées d'énergie : le moment p (l'intégrale de l'effort par rapport au temps) et le déplacement q (l'intégrale du flux par rapport au temps). Le tableau (TAB. 3.1) présente les variables associées aux variables généralisées dans plusieurs domaines physiques [Chami, 2005].

3.2.2 Les éléments bond graph

Les éléments du bond graph sont séparés en deux catégories :

TAB. 3.1 – Équivalences des variables généralisées dans des domaines physiques

Domaine	Effort e	Flux f	Moment p	Déplacement q
Electrique	Tension u	Courant i	Flux magnétique ϕ	Charge q
Mécanique Translation	Force F	vitesse v	Impulsion p	Déplacement x
Mécanique Rotation	Couple C	Vitesse angulaire ω	Impulsion angulaire h	Angle θ
Hydraulique	Pression P	Débit volumique Q	Impulsion Pression Γ	Volume V
Chimique	Potentiel chimique	Flux molaire	–	Nombre de môle
Thermo- dynamique	Température	Flux d'entropie	–	Entropie
Mécanique	Force magnétomotrice	Dérivée du flux magnétique	–	Flux magnétique
Acoustique	Pression	Vitesse volumique	Impulsion	Volume

- **Éléments actifs** : Les éléments actifs sont des sources d'effort ou de flux. Ces dernières peuvent avoir une valeur indépendante de toute influence extérieure symbolisées par S_e pour des sources d'effort ou S_f pour des sources de flux, ou modulée selon un signal (symbolisées par MS_e ou MS_f). Ces éléments fournissent la puissance (positive ou négative) au système. Par conséquent, le sens de la demi-flèche sortant de l'élément est obligatoire.
- **Éléments passifs** : Le tétraèdre de Paynter présenté dans la figure (FIG. 3.2) illustre les relations entre les variables généralisées en passant par les éléments passifs (R, I, C). Ceux-ci peuvent être de caractéristique linéaire ou non linéaire. Un élément R est dissipatif d'énergie, sous forme de chaleur. Les éléments I et C sont les éléments de stockage d'énergie. L'énergie stockée est définie comme :

$$E(t) = \int_0^t e(\tau)f(\tau)d\tau + E(0) \quad (3.1)$$

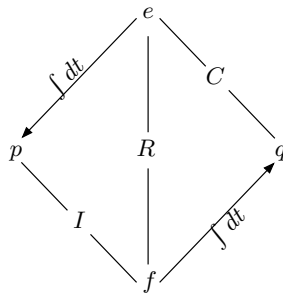


FIG. 3.2 – Tétraèdre de Paynter

3.2.3 Les jonctions

Les jonctions servent à coupler les éléments précédemment présentés. Celles-ci sont conservatives de puissance. Quatre types de jonction sont définies. Il s'agit des jonctions 0, 1, TF (transformateur), GY (gyrateur).

- les jonctions 1 sont des jonctions iso-flux (flux commun, équivalent à la mise en série, avec un courant commun) ;
- les jonctions 0 sont des jonctions iso-effort (effort commun, équivalent à une mise en parallèle en électricité avec une tension commune à plusieurs branches) ;
- les jonctions TF transforment les variables effort-effort et flux-flux (transformateur, pas de changement de nature des variables) ;
- Les jonctions GY transforment les variables effort-flux et flux-effort (gyrateur, changement de nature des variables).

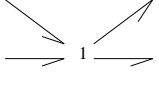
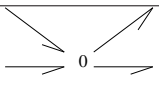
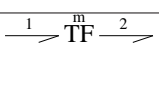
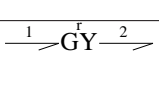
Le tableau (TAB. 3.2) présente le symbole et la loi générique de chaque type de jonction. Les coefficients a_i correspondent à l'orientation de la demi-flèche ($a_i = +1$ si celle-ci entre dans la jonction et $a_i = -1$ si elle sort de la jonction).

3.2.4 Construction d'un modèle bond graph à partir d'un système physique

Les procédures de construction diffèrent sensiblement selon les domaines physiques considérés. Ainsi, un élément C en mécanique (ressort) exprime une différence de vitesse (flux) entre ses deux extrémités et sera placé sur une jonction 0 (equi-effort). Au contraire, un condensateur électrique est caractérisé par une différence de potentiel (effort) et sera placé sur une jonction 1 (équi-flux) [Gandanegara, 2003] [Chami, 2005].

La procédure complète détaillée de la modélisation d'un système électrique est la suivante :

TAB. 3.2 – Éléments de jonction de bond graph

Symbole	Loi générique	Exemples
	$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $\sum_{i=0}^n a_i e_i = 0$	couplage en parallèle en mécanique en série en électrique et hydraulique
	$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $\sum_{i=0}^n a_i f_i = 0$	couplage en série en mécanique, en parallèle en électrique et hydraulique
	$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$	transformateur électrique, levier, réducteur mécanique, couplage de systèmes physiques
	$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$	moteur à courant continu, couplage de systèmes physiques

1. A partir d'un schéma électrique, fixer le sens de courant (transfert de puissance) dans le circuit.
2. Déterminer les nœuds qui ont un potentiel différents et introduire une jonction 0 pour chacun d'eux.
3. Mettre une jonction 1 entre deux jonctions 0 et y attacher les éléments qui se situent entre les nœuds correspondants.
4. Pour un circuit présentant un potentiel de terre explicite, supprimer toutes les jonctions 0 représentant ce potentiel. Dans les autres cas, choisir un nœud de référence (ou plusieurs), puis supprimer les jonctions correspondantes.
5. Simplifier le bond graph si possible.

3.2.5 La causalité

Dans un bond graph, cette propriété est représentée par un trait orthogonal au lien, appelé trait causal. Le sens de la causalité n'a rien à voir avec celui du transfert de la puissance. Pour bien faire comprendre cette notion, l'exemple d'une batterie d'accumulateur est tout à fait parlant pour l'électricien. En effet, que celle-ci se charge (puissance reçue) ou se décharge (puissance fournie), une batterie impose systématiquement sa tension (effort) au système environnant. Cet exemple montre aussi le lien entre causalité intégrale et physique. En effet, l'électrotechnicien sait bien pourquoi un tel objet se doit d'être alimenté en courant, de même qu'un condensateur auquel il faut impérativement ne pas provoquer de variations brutales de la tension. Inversement, une inductance (élément

I) se doit d'être alimentée, en tension pour éviter toute surintensité non maîtrisée. Ces réflexes et ces problème bien connus de l'électrotechnicien se posent de manière analogue au mécanicien, à l'hydraulicien,... et de nombreux ennuis peuvent être évités au stade de la conception si les règles élémentaires de la causalité sont respectées. Ces règles d'affectation aux éléments et aux jonctions sont présentées respectivement dans les tableaux (TAB. 3.3) et (TAB. 3.4). Les contraintes sont appliquées par ordre avec une priorité pour les

TAB. 3.3 – Règles d'affectation de la causalité aux éléments

Élément	Causalité	Symbole	Loi générique
Eléments actifs	obligatoire	$Se \longrightarrow \dashv$	e imposé par S_e
		$Sf \dashv \longrightarrow$	f imposé par S_f
Eléments passifs	intégrale	$\longrightarrow \dashv \mathbf{I}$	$f_I := \Psi_I(\int e_I(\tau)d\tau)$
		$\dashv \longrightarrow \mathbf{C}$	$e_C := \Psi_C(\int f_C(\tau)d\tau)$
Eléments passifs	dérivée	$\dashv \longrightarrow \mathbf{I}$	$e_I := \Psi_I^{-1}(\frac{df_I}{dt})$
		$\longrightarrow \dashv \mathbf{C}$	$f_C := \Psi_C^{-1}(\frac{de_C}{dt})$
Eléments passifs	arbitraire (cas linéaire)	$\dashv \longrightarrow \mathbf{R}$	$e_R := Rf_R, e_R := \Psi_R(f_R)$
	ou non arbitraire (cas non linéaire)	$\longrightarrow \dashv \mathbf{R}$	$f_R := \frac{1}{R}e_R, f_R := \Psi_R^{-1}(e_R)$

sources d'effort dans les jonctions en imposant l'effort et la même chose pour les sources de flux en imposant le flux.

Pour bien distinguer l'assignation causale et l'égalité, nous utilisons des notations différentes.

- Dans le cas d'une assignation causale dans le bond graph, la notation ($:=$) est utilisée pour dire que la variable à droite de l'égalité impose sa valeur à la variable à gauche de cette notation. Par exemple, $f_1 := f_2$ indique que la variable f_2 (à droite) impose au sens de la causalité sa valeur à la variable f_1 (à gauche).
- Dans le cas d'une égalité dans le bond graph acausal, le signe ($=$) est simplement utilisé.

Après avoir affecté la causalité aux jonctions et aux éléments dans un modèle, un bond graph causal est obtenu. A partir de ce dernier, on peut :

- écrire les équations relatives aux jonctions et aux éléments selon la causalité;

TAB. 3.4 – Règles d’affectation de la causalité aux jonctions

Elément	Causalité	Symbole	Loi générique
Jonctions	restriction de causalité	<p>1 trait causal loin de J-1</p>	$f_1 := f_i$ \vdots $f_n := f_i$ $e_i := -a_1 e_1 - \dots - a_n e_n$
Jonctions	restriction de causalité	<p>1 trait causal près de J-0</p>	$e_1 := e_i$ \vdots $e_n := e_i$ $f_i := -a_1 f_1 - \dots - a_n f_n$
Jonctions	restriction de causalité		$e_1 := m e_2$ $f_2 := m f_1$
Jonctions	restriction de causalité		$e_2 := m^{-1} e_1$ $f_1 := m^{-1} f_2$
Jonctions	restriction de causalité		$e_1 := r f_2$ $e_2 := r f_1$
Jonctions	restriction de causalité		$f_1 := r^{-1} e_2$ $f_2 := r^{-1} e_1$

- déduire l’équation d’état du système et les variable d’état associées aux éléments I et C (éléments dynamiques) ;
- déterminer les chaînes d’actions qui illustrent les couplages des éléments dans le modèle.

3.2.6 Exemple

Considérons le modèle d’un moteur à courant continu présenté à la figure (FIG. 3.3) [Gandanegara, 2003]. Ce moteur est alimenté par un hacheur à partir d’une source de tension continue et un filtre de 2^{me} ordre. Le hacheur est considéré parfait sans pertes de puissance. Il permet de commander la tension d’entrée du moteur. En valeur moyenne,

nous avons les relations (3.2). Où α est le rapport cyclique du hacheur, associé à la commande. La commande en courant peut être réalisée par une fonction simple comme un hystérésis ou un correcteur du type PID.

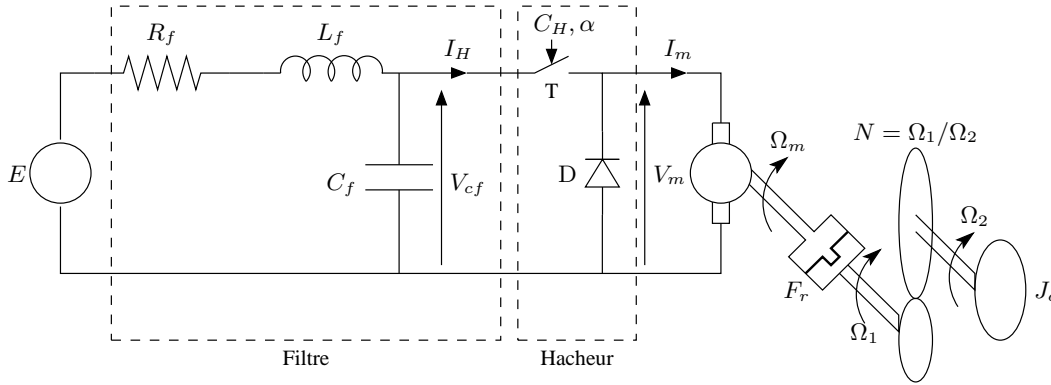


FIG. 3.3 – Moteur à courant continu

$$\begin{aligned} V_m &= \alpha V_{cf} \\ I_H &= \alpha I_m \end{aligned} \quad (3.2)$$

Le moteur est modélisé par la résistance et l'inductance d'induit (R_m et L_m) en série du côté électrique. Du côté mécanique, nous considérons le frottement et l'inertie de l'arbre du moteur (F_m et J_m). Le moteur est couplé à une charge mécanique réalisée par une inertie J_c à travers un réducteur de rapport N et un frottement F_r . Le couple de charge est modélisé par une source d'effort C_{ch} .

Le bond graph associé est présenté sur la figure (FIG. 3.4). Le couple de charge a un signe moins ($-C_{ch}$) pour respecter la convention sur l'orientation de la demi-flèche sortante de la source.

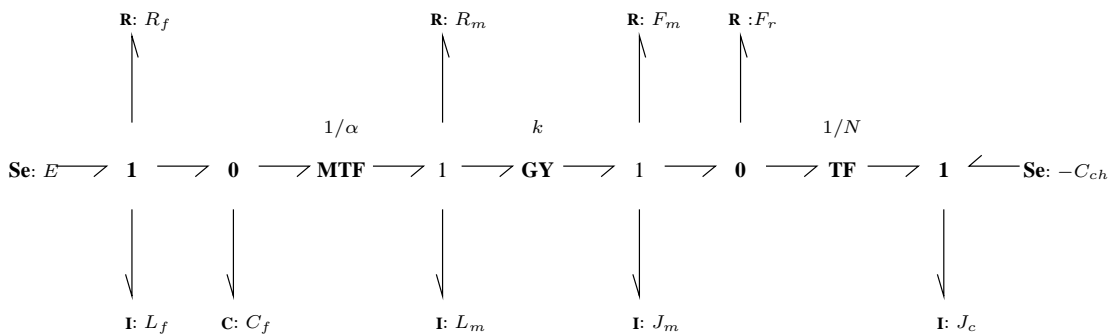


FIG. 3.4 – Bond graph du moteur à courant continu

L'élément (MTF) associé au hacheur a un rapport de transformation $m = 1/\alpha$; pour respecter la convention d'écriture pour le (MTF); (m) est dimensionné à l'aide de la relation $e_1 = me_2$, soit ici $V_{cf} = (1/\alpha)V_m$. Le même raisonnement est appliqué au transformateur associé au réducteur (TF :1/N).

Sur ce bond graph non causal, on affecte la causalité suivant les règles présentées au paragraphe (§3.2.5) avec la causalité préférentielle intégrale pour les éléments I et C . Nous obtenons le bond graph causal illustré sur la figure (FIG. 3.5).

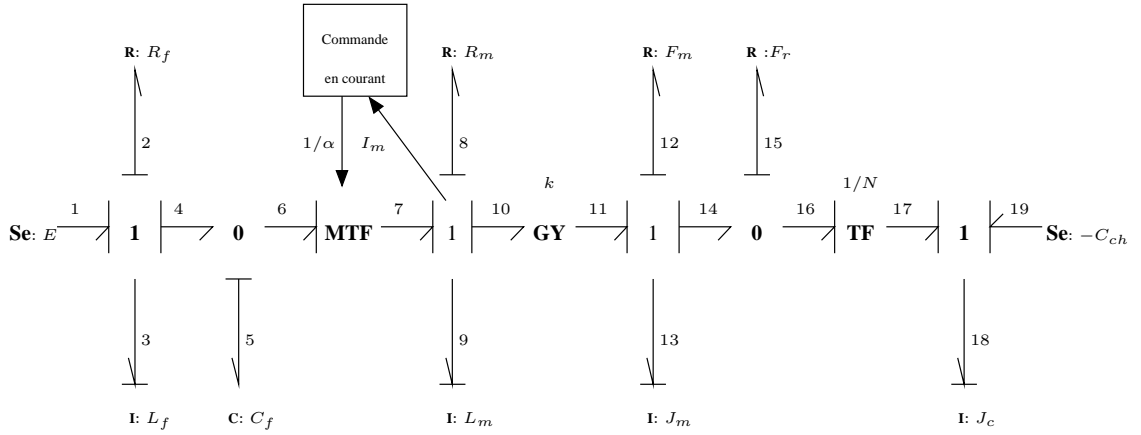


FIG. 3.5 – Bond graph causal du moteur à courant continu

A partir de ce bond graph causal, on déduit les équations relatives aux jonctions et aux éléments. Chaque lien est numéroté. Les équations déduites des jonctions et des éléments sont présentées dans le (TAB. 3.5).

A partir de ces équations, on peut déduire l'équation d'état (3.3) dont les variables d'état sont les variables d'énergie (p pour les éléments I et q pour les éléments C).

$$\begin{pmatrix} \dot{p}_3 \\ \dot{p}_9 \\ \dot{p}_{13} \\ \dot{p}_{18} \\ \dot{q}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & -\frac{R_m}{L_m} & -\frac{K}{J_m} & 0 & \frac{\alpha}{C_f} \\ 0 & \frac{K}{L_m} & -\frac{F_m + F_r}{J_m} & \frac{NF_r}{J_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{NF_r}{J_m} & -\frac{N^2 F_r}{J_c} & 0 \\ \frac{1}{L_f} & -\frac{\alpha}{L_m} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ p_9 \\ p_{13} \\ p_{18} \\ q_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ -C_{ch} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Les variables p_3 , p_9 , p_{13} , p_{18} et q_5 correspondent respectivement à ϕ_{Lf} , ϕ_{Lm} , p_{Jm} , p_{Jc} et q_{Cf} . Il est possible aussi d'écrire l'équation d'état en fonction des variables de puissance, soient ici i_{Lf} , i_{Lm} , Ω_{Jm} , Ω_{Jc} et v_{Cf} .

TAB. 3.5 – Equations des jonctions et des éléments

Jonction	Loi	Élément	Loi
1	$\begin{cases} f_1 := f_3 \\ f_2 := f_3 \\ f_4 := f_3 \end{cases}$ $e_3 := e_1 - e_2 - e_4$	$Se : E$	$e_1 := E$
		$R : R_f$	$e_2 := R_f f_2$
0	$\begin{cases} e_4 := e_5 \\ e_6 := e_5 \end{cases}$ $f_5 := f_4 - f_6$	$I : L_f$	$f_3 := \frac{1}{L_f} \int e_3 dt = \frac{1}{L_f} p_3$
TF : $1/\alpha$	$e_7 := \alpha e_6$ $f_6 := \alpha f_7$	$C : C_f$	$e_5 := \frac{1}{C_f} \int f_5 dt = \frac{1}{C_f} q_5$
1	$\begin{cases} f_7 := f_9 \\ f_8 := f_9 \\ f_{10} := f_9 \end{cases}$ $e_9 := e_7 - e_8 - e_{10}$	$R : R_m$	$e_8 := R_m f_8$
		$I : L_m$	$f_9 := \frac{1}{L_m} \int e_9 dt = \frac{1}{L_m} p_9$
GY : K	$e_{10} := K f_{11}$ $e_{11} := K f_{10}$	$R : F_m$	$e_{12} = F_m f_{12}$
1	$\begin{cases} f_{11} := f_{13} \\ f_{12} := f_{13} \\ f_{14} := f_{13} \end{cases}$ $e_{13} := e_{11} - e_{12} - e_{14}$	$I : J_m$	$f_{13} := \frac{1}{J_m} \int e_{13} dt = \frac{1}{J_m} p_{13}$
		$R : F_r$	$e_{15} := F_r f_{15}$
0	$\begin{cases} e_{14} := e_{15} \\ e_{16} := e_{15} \end{cases}$ $f_{15} := f_{14} - f_{16}$	$I : J_c$	$f_{18} := \frac{1}{J_c} \int e_{18} dt = \frac{1}{J_c} p_{18}$
TF : $1/N$	$e_{17} := N e_{16}$ $f_{16} := N f_{17}$	$S_e : -C_{ch}$	$e_{19} := -C_{ch}$
1	$\begin{cases} f_{17} := f_{18} \\ f_{19} := f_{18} \end{cases}$ $e_{18} := e_{17} + e_{19}$		

3.2.7 Modélisation des systèmes discrets

Pour modéliser les changements de configuration dans le bond graph à cause d'existence de composants discrets, plusieurs travaux récents ont introduit le formalisme du bond graph hybride. Ce dernier a été repris par Mosterman qui a introduit dans le formalisme bond graph hybride la notion de la jonction contrôlée [Mosterman *et al.*, 1996] [Mosterman, 1997]. Cette dernière va remplacer la jonction normale dans le cas où on dispose d'un composant discret. La jonction est influencée par un réseau de Petri ou un automate à deux états ON/OFF. La figure (FIG. 3.6) présente les deux types de jonctions dans leurs deux modes de fonctionnement. La figure (FIG. 3.7) montre un circuit

représentant un hacheur et son bond graph hybride.

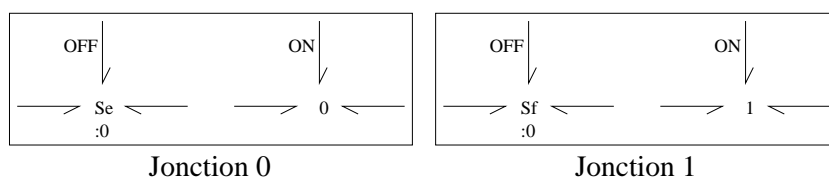


FIG. 3.6 – Type de jonctions contrôlées

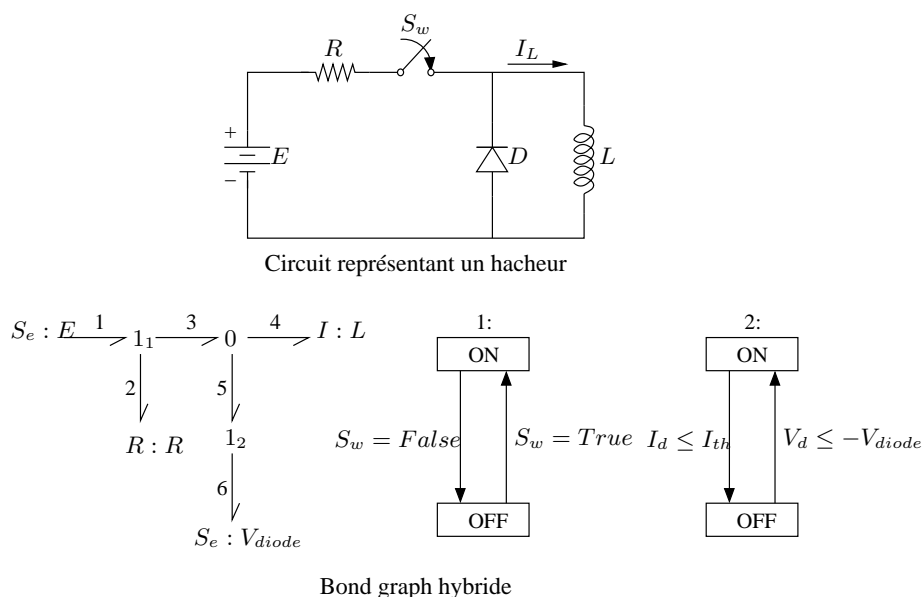


FIG. 3.7 – Circuit représentant un hacheur et son bond graph hybride

La génération des différentes configurations du modèle est déduite en remplaçant la jonction contrôlée par son équivalente. La figure (FIG. 3.8) montre les quatre configurations possibles du hacheur.

Les nombreux travaux et applications des Bond Graph ont permis de développer des règles pertinentes quant à l'analyse du système, la réduction d'ordre, etc. Cependant, il a été surtout développé pour la conception et la modélisation, sans objectif de commande, même si un Bond Graph peut mener à une représentation d'état, qui elle-même peut mener à une commande globale. L'utilisation de la causalité dérivée, si elle permet une description topologique du système sans problème de représentation, s'éloigne en effet de la réalité physique, dont la causalité ne peut être qu'intégrale (notion d'énergie ou variable d'état). La déduction d'un graphe de commande s'avère, de ce fait, compromise [Bouscayrol, 2003].

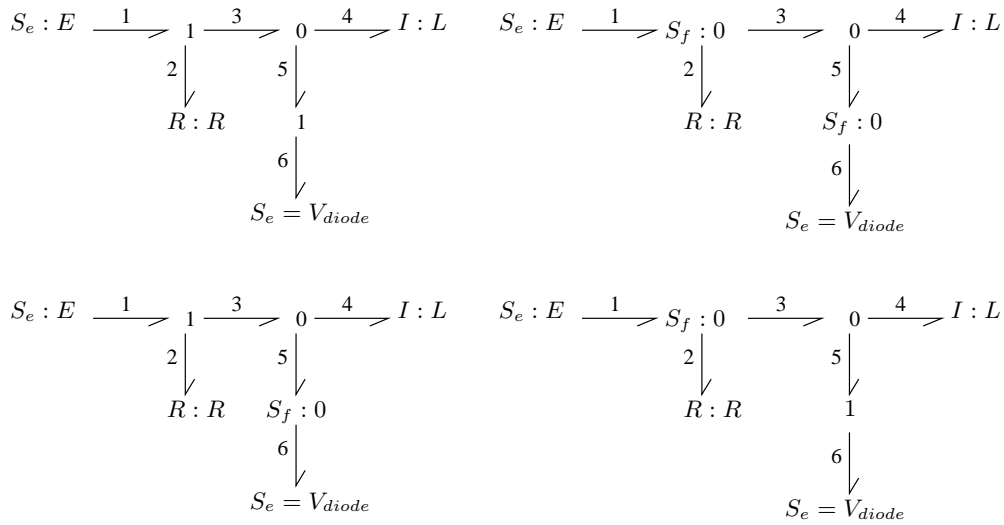


FIG. 3.8 – Les configurations ON/ON et OFF/OFF du hacheur

3.3 Le Réseau Dynamique Hybride à Composant

Le Réseau Dynamique Hybride à Composant (RDHC) a été présenté pour la première fois par J.Saadi [Saadi, 1994] en 1994 [Saadi *et al.*, 1997] [Chami, 2005]. Le RDHC est un modèle graphique permettant une représentation unifiée des systèmes hybrides. La caractéristique principale de ce modèle est l'unification du formalisme entre systèmes discrets et continus. Le modèle RDHC est constitué de :

- Réseau Dynamique Continu à Composant (RDCC) qui permet une représentation au niveau des composants des systèmes dynamiques continus. L'association du RDCC de tous les composants d'un système définit implicitement sa topologie. Pour les circuits électriques, le modèle RDCC permet l'extraction automatique des lois de Kirtchoff de courant.
- Réseau de Pétri (RdP) [David et Alla, 2005] [Proth et Xie, 1994] qui permet de donner une représentation au niveau composant de chaque élément discret ou interrupteur (Dans un système électrique, nous aurons les diodes, les transistors,...).

Ce modèle permet ainsi la représentation de chaque composant d'une structure hybride, qu'il soit continu (Résistance, Inductance,...) ou commuté (diode, transistor,...). Pour commencer, nous rappelons la définition du RDCC.

3.3.1 Réseau Dynamique Continu à Composant

Le RDCC est un Réseau Dynamique Continu à Composant sur lequel apparaît de manière explicite tous les composants constituant le système. La représentation adoptée

est la même que celle utilisée pour les réseaux de Petri continus (places - transitions - arcs)[Chami, 2005].

- La place dynamique correspond à l'état du système étudié ; à chaque place est associée un marquage représentant l'une des variables d'état du système pondéré par un composant dynamique du système.
- La place à dynamique nulle possède un marquage nul et un poids nul.
- Une transition est validée en permanence et on lui associe une variable de franchissement qui peut être proportionnelle à l'état ou indépendante de ce dernier.
- Une transplace qui représente l'association d'une place dynamique et une transition ayant la même variable X .
- Un arc relie la place à la transition ou inversement. Il est orienté sur le graphe dans le sens des écoulements positifs des flux. Le poids de ces arcs correspond soit à des constantes soit à des composants statiques (résistance, frottement).

La figure (FIG. 3.9) montre les différents éléments utilisés pour la construction d'un RDCC. Le marquage global de la place est noté M et sa pondération est notée Q .

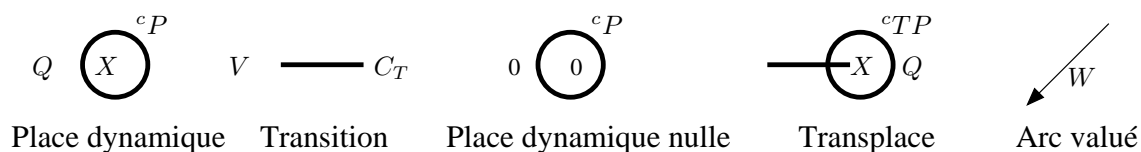


FIG. 3.9 – Éléments d'un RDCC

Le marquage M est défini comme suit :

$$M = M(cP) = Q \frac{dX}{dt} \quad (3.4)$$

Où :

X : variable d'état associée à la place cP .

Q : pondération associée.

La place à dynamique nulle est représentée par un zéro comme coefficient de pondération de la place.

Pour modéliser des composants continus, nous avons besoin de modéliser deux informations importantes, la première décrit le comportement du composant (équations de l'effort en fonction du flux ou inversement), la deuxième décrit le comportement du flux à l'intérieur du composant (équations de flux).

L'équation que représente la place cP dans le modèle RDCC est donnée par l'expression suivante :

$$M({}^cP) = \sum_{i=0}^n V_i W_i - \sum_{j=0}^m V_j W_j \quad (3.5)$$

avec :

- n : nombre de transitions entrant dans la place cP ;
- m : nombre de transitions sortant de la place cP ;
- W_i : poids associé à l'arc reliant la place cP et la transition cT_i , dont la variable de franchissement est V_i ;
- W_j : poids associé à l'arc reliant la place cP et la transition cT_j dont la variable de franchissement est V_j .

3.3.2 Construction d'un modèle RDCC à partir d'un système physique

Le modèle RDCC topologique d'un système se base sur la connaissance du modèle de chacun de ses composants élémentaires. Comme le bond graph, le RDCC utilise les variables généralisées de puissance dans les domaines physiques voir le tableau (TAB. 3.1 page 87). Dans un système électrique, le flux est représenté par le courant (I) et l'effort est représenté par le potentiel aux bornes du composant ($N1$ et $N2$). La figure (FIG. 3.10) montre le RDCC d'une bobine qui se compose de deux parties, la première représente le RDCC effort et la deuxième est le RDCC flux (un courant dans ce cas).

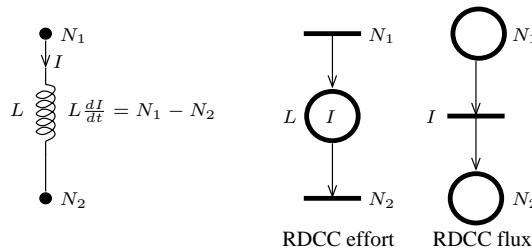


FIG. 3.10 – RDCC d'une bobine

Pour obtenir le modèle global, il suffit de transcrire le modèle topologique associé à chaque composant constituant le système. Le lien entre les composants sur le modèle RDCC se fera en fusionnant les transitions ayant les même variables de franchissement pour la partie effort et les places ayant les même variables pour la partie flux. Le modèle

ainsi obtenu reproduit fidèlement la topologie du système permettant ainsi l'extraction directe des lois de mailles et de nœuds. Pour illustrer ceci, nous donnons, à titre d'exemple, le circuit électrique de la figure (FIG. 3.11).

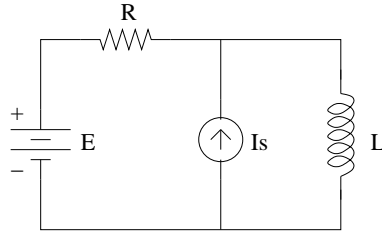


FIG. 3.11 – Exemple électrique

Afin de modéliser ce circuit électrique, nous présentons par composant le modèle RDCC effort et celui du flux. Nous obtenons donc le modèle RDCC global du système en fusionnant les quatre éléments qui constituent le circuit (une source de tension, la bobine, la résistance et la source du courant) :

– **Source de tension**

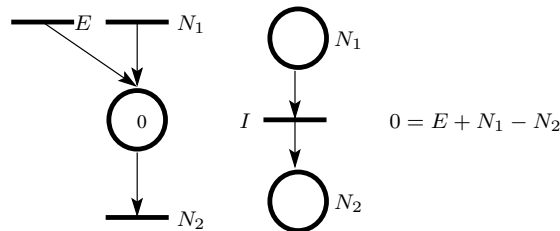


FIG. 3.12 – RDCC d'une source de tension (Modèle source effort)

– **Inductance** : Nous reprenons le modèle présenté dans la figure (FIG. 3.10).

– **Résistance**

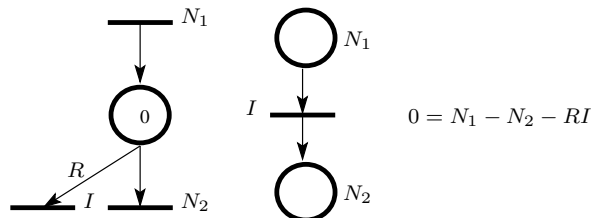


FIG. 3.13 – RDCC d'une résistance (Modèle résistance)

– **Source du flux**

Le modèle RDCC final du circuit, peut être, défini comme le montre la figure (FIG. 3.15).

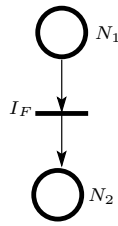


FIG. 3.14 – RDCC d'une source de courant (Modèle source flux)

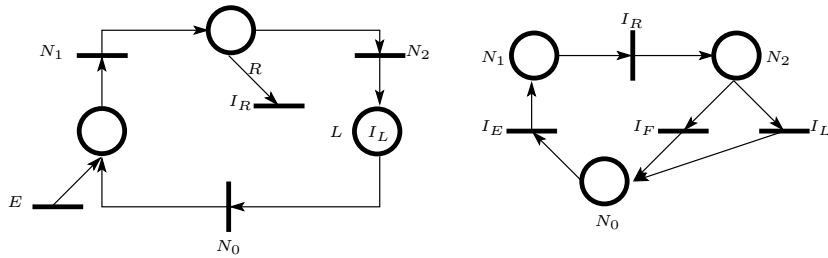


FIG. 3.15 – RDCC global du circuit électrique

Nous remarquons que le modèle global intègre la topologie du circuit ainsi que la dynamique des composants. Le modèle RDCC topologique présente un avantage primordial pour la simulation des systèmes hybrides car il ne demande aucune analyse du circuit pour déterminer sa topologie puisque le modèle intègre déjà la topologie du système étudié.

3.3.3 Modélisation des systèmes hybrides

Les réseaux dynamiques hybrides à composants ont été introduit afin de modéliser d'une façon unifiée les systèmes hybrides au niveau des composants. Le RDHC est composé de deux parties, la première représente la partie dynamique continue du composant modélisée à l'aide d'un RDCC voir la section (§3.3.1), la deuxième représente la partie discrète modélisée à l'aide d'un Réseau de Pétri (RdP). Ces deux parties s'influencent mutuellement à l'aide des fonctions d'influences [Chami, 2005] :

- Fonction logique pour le RDCC.
- Fonction continue de comparaison pour le RdP.

La fonction logique prend deux valeur (0 ou 1), et elle valide ou non la place associée pour le RDCC (effort) ou/et la transition associé pour le RDCC (flux). La fonction continue de comparaison valide le franchissement d'une transition du RdP. L'exemple du modèle RDHC de la diode, donné sur la figure (FIG. 3.16), illustre cette interaction entre le RDCC et RdP.

- N_1, N_2 : Potentiels de composants ;

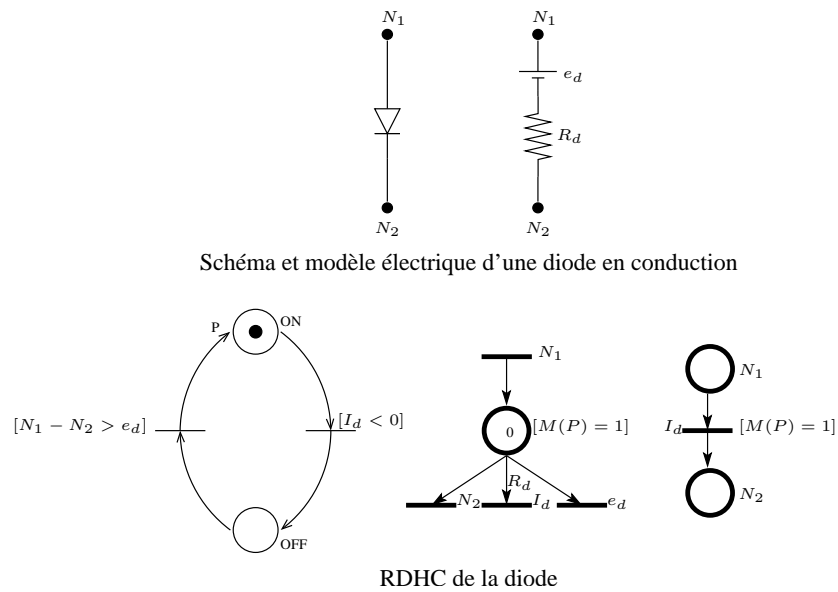


FIG. 3.16 – Schéma, modèle électrique et RDHC d'une diode

- I_d : Courant en conduction de la diode ;
- e_d : Tension de conduction de la diode ;
- $M(P)$: Nombre de marquage dans la place P du RdP ;
- [...] : Condition de franchissement d'une transition ou d'une place.

La place et la transition conditionnées par le prédicat (P) sont validées si $(M(P))$ est égale à 1. L'équation dynamique équivalente est valide alors aussi. Le RDHC intègre facilement la partie discrète des composants hybrides. L'utilisation de différents modèles est également facile. La possibilité d'intégration des défauts dans les composants à l'aide du réseau de Petri rend ce modèle assez attractif par rapport à d'autre et l'utiliser pour la simulation est très aisé.

3.3.4 La causalité

Le modèle comme nous avons montré dans l'exemple de la bobine (FIG. 3.10) impose automatiquement une causalité intégrale sur les composants. Le RDHC intègre implicitement la causalité intégrale puisqu'il n'intègre que les dérivées des variables. Ce qui veut dire que pour calculer ces variables, il suffit d'intégrer. Alors, on peut sûrement avoir des conflits de causalité, comme par exemple la possibilité d'avoir deux capacités en parallèle, ce genre de problème est pris en compte à l'intérieur du logiciel au moment de la génération des équations.

3.3.5 La mise en équation

Sachant que le RDHC est défini par un sextuplet : $R = \langle {}^c P, {}^c T, V, Pré, Post, X_0 \rangle$ avec :

- ${}^c P$: est un ensemble de places.
- ${}^c T$: est un ensemble de transitions.
- V : est la fonction des variables de tirs.
- $Pré$: est la matrice représentant les valeurs des arcs entrant de chaque place par rapport à toutes les transitions.
- $Post$: est la matrice représentant les valeurs des arcs sortant de chaque place par rapport à toutes les transitions.
- X_0 : est la valeur initiale du vecteur des variables d'état associées aux places.

On associe à chaque réseau une matrice d'incidence W de taille $(n \times m)$ où n est l'ordre du système et m le nombre de transitions. La matrice d'incidence W est définie comme l'indique l'équation (3.6).

$$W_{ij} = Post({}^c P_i, {}^c T_j) - Pré({}^c P_i, {}^c T_j) \quad (3.6)$$

Le système global est caractérisé pour chaque configuration de la partie discrète par la relation (3.7).

$$Q\dot{X} = W \cdot V(t) \quad (3.7)$$

Sachant qu'il existe des places nulles dans le RDHC, on peut réécrire l'équation (3.7) sous une autre forme :

$$\begin{aligned} Q\dot{X} &= W_D \cdot V(t) \\ 0 &= W_S \cdot V(t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

avec :

- W_d : Matrice d'incidence de la partie dynamique (place $\neq 0$);
- W_S : Matrice d'incidence de la partie statique (place = 0);
- Q : Matrice diagonale contenant les poids des places non nuls;
- $V(t)$: Transposé du vecteur $[X(t) \ U(t) \ Z(t)]$.

Le système (3.8) peut être définitivement écrit sous la forme :

$$\begin{aligned} Q\dot{X} &= AX + BU + CZ \\ 0 &= DX + EU + FZ \end{aligned} \quad (3.9)$$

avec :

- A, B, C, D, E, F : Matrices du système ;
- $X(t)$: vecteur d'état ;
- $U(t)$: Vecteur d'entrée (source de flux ou d'effort) ;
- $Z(t)$: Vecteur des variables intermédiaires.

Nous pouvons reformuler le système d'équations (3.9) comme le montre l'expression suivante :

$$\begin{pmatrix} Q & -C \\ 0 & -F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{X} \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ D & E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ U \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

L'expression (3.10) peut être réécrite sous forme (3.11).

$$G \cdot I = H \cdot S \quad (3.11)$$

avec :

- G, H : Nouvelles matrices du système ;
- $I(t)$: Transposé de $\begin{bmatrix} \dot{X}(t) & Z(t) \end{bmatrix}$;
- $S(t)$: Transposé de $\begin{bmatrix} X(t) & U(t) \end{bmatrix}$.

3.3.6 Exemple de mise en équation

Nous présentons, à titre d'exemple, un système présentant un circuit RLC en série. Chaque place valide du RDCC va être associée à une équation dans le système. La figure (FIG. 3.17) représente ce système. La nomenclature utilisée dans le modèle sont :

- U_s : source de tension continue ;
- r : résistance interne de la source ;
- E : tension interne de la source ;
- I_s, I_R, I_L et I_C : courants d'éléments du circuit ;
- R, L, C : éléments du circuit ;
- U_R, U_C : tensions aux bornes la résistance et la capacité ;
- N_1, N_2, N_3 : potentiels du circuit.

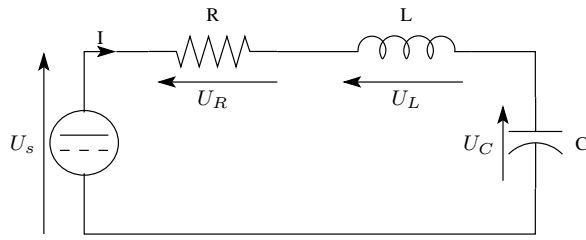


FIG. 3.17 – Circuit RLC en série

Le tableau TAB. 3.6 met en évidence les RDCC effort, RDCC flux et les lois gouvernant chaque élément du circuit.

TAB. 3.6 – RDCC effort, RDCC flux et lois du circuit RLC

Elément	RDCC effort	RDCC flux	Lois
Source			$\begin{cases} U_s = N_2 - N_1 \\ N_2 - N_1 = E - rI_s \end{cases}$
Résistance			$\begin{cases} U_R = N_1 - N_2 \\ U_R = RI_R \end{cases}$
Inductance			$\begin{cases} U_L = N_1 - N_2 \\ U_L = L \frac{dI_L}{dt} \end{cases}$
Capacité			$\begin{cases} U_C = N_1 - N_2 \\ I_C = C \frac{dU_C}{dt} \end{cases}$

Le modèle RDHC global du circuit nous permet de construire le système d'équations donné par l'équation (3.11). En premier lieu, nous pouvons définir le vecteur I qui est composé, en premier par les variables de places dynamiques représentant le vecteur d'état \dot{X} . La deuxième partie Z de vecteur I est composée de toutes les variables de transitions en éliminant les variables d'état X et les sources de flux et d'effort. En deuxième lieu, nous pouvons définir le vecteur S qui est composé de toutes les variables d'état, les sources de flux et les sources d'effort. Nous remplissons finalement les matrices G et H en faisant le

bilan des places. Le système d'équations (3.11) peut donc prendre la forme (3.12).

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -L & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_C \\ \dot{I}_L \\ U_s \\ I_s \\ I_C \\ N_3 \\ U_R \\ I_R \\ N_2 \\ N_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_C \\ I_L \\ E \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

3.3.7 Gestion des configurations

Les places et les transitions du RDHC des interrupteurs sont associées à des conditions $[M(P) = 1]$ et $[M(P) = 0]$ montrant le nombre de jetons dans la place "ON" de chaque RdP associé à chaque interrupteur.

Si $[M(P) = 0]$, la ou les places associées sont éliminées du RDHC global et la transition représentant le flux du composant est éliminé du RDHC.

Si $[M(P) = 1]$, la place ou la transition est prise en compte dans le modèle global.

Pour expliquer la méthode de génération de toutes les configurations pour le modèle global à partir d'un seul modèle, nous étudions le cas du hacheur présenté dans la figure (FIG. 3.18).

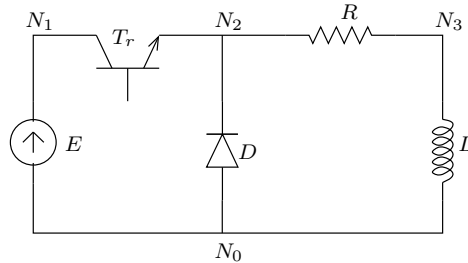


FIG. 3.18 – Hacheur

Le RDHC global du circuit est présenté dans la figure suivante (FIG. 3.19).

Après chaque modification des vecteurs X et Z , le RdP peut changer d'état ce qui entraîne une modification du modèle dynamique du système. Cette procédure de mise à jour permet de réduire le nombre de variables ce qui implique la réduction du nombre d'équation décrivant le système.

Dans ce qui suit, nous présentons les différentes configurations possibles pour le RDHC du hacheur présenté dans la figure (FIG. 3.18). Les autres configurations du modèle sont présentées dans les figures (FIG. 3.20) (FIG. 3.21) (FIG. 3.22).

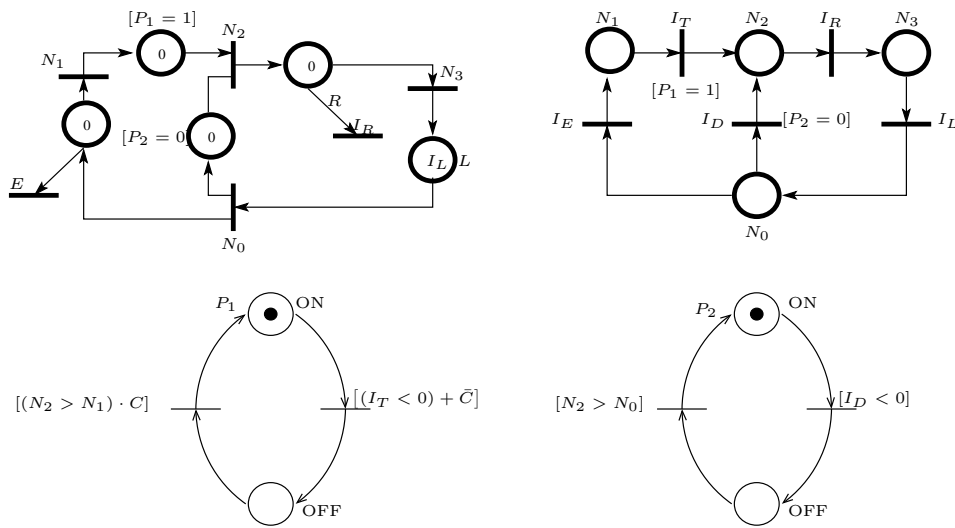


FIG. 3.19 – Modèle RDHC du Hacheur de la figure (FIG. 3.18)

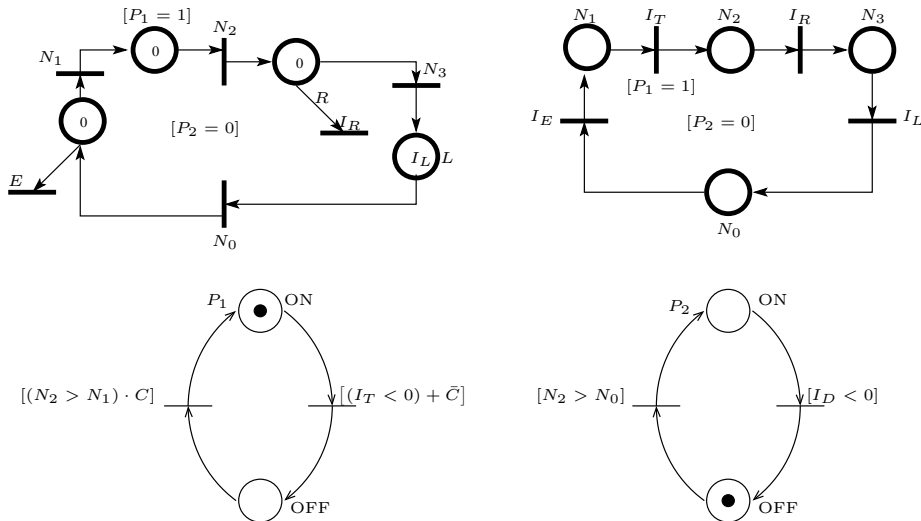


FIG. 3.20 – Modèle RDHC du Hacheur : Transistor passant et Diode Bloquée

La représentation de chaque composant de manière individuelle permet la génération de toutes les configurations du système à partir d'un seul modèle global, ce qui rend la tâche de modélisation plus simple. Cette représentation permet également d'intégrer les défauts des composants de manière aisée sans être obligé de calculer à la main toutes les équations du fonctionnement associées à chaque configuration avec défaut.

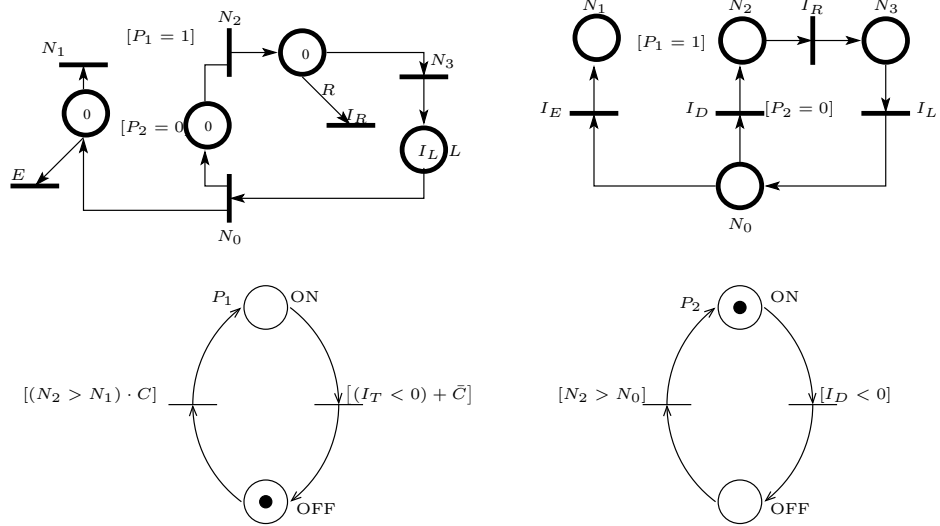


FIG. 3.21 – Modèle RDHC du Hacheur : Transistor bloqué et Diode passante

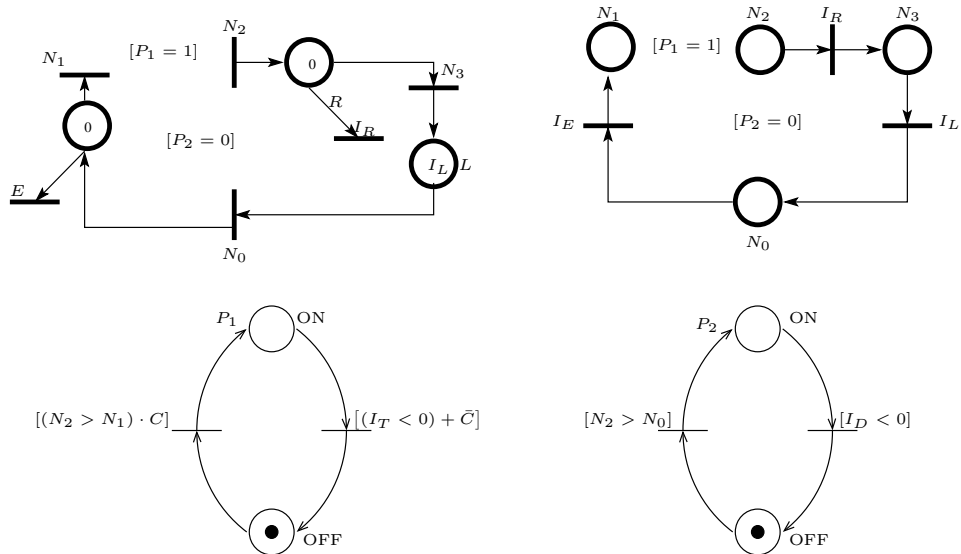


FIG. 3.22 – Modèle RDHC du Hacheur : Transistor bloqué et Diode Bloquée

3.3.8 Méthodologie générale de simulation

La procédure à suivre est détaillée dans l'organigramme présenté dans la figure (FIG. 3.23).

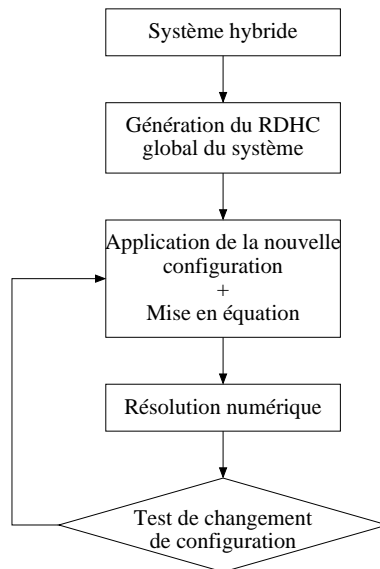


FIG. 3.23 – Organigramme de traitement des configurations

3.3.8.1 Les topologies de simulation

Un facteur très important concerne la modélisation des composants contenant des interrupteurs. En effet, dans le cadre d'une modélisation par composant, on distingue deux approches, l'une dite à topologie fixe, l'autre à topologie variable [Chami, 2005].

- **La topologie fixe** : Le modèle classiquement utilisé pour la représentation des semi-conducteurs est celui de la résistance binaire. Le semi-conducteur est modélisé selon son état de conduction, par une résistance élevée R_{off} dans son état bloqué et une résistance de faible valeur R_{on} lorsqu'il conduit. La topologie du circuit est unique ; seules les matrices (représentant le système) et qui sont résistives ; évoluent au gré de la commutation des interrupteurs. Malgré son avantage appréciable de simplicité, ce modèle d'interrupteur présente certains inconvénients. Le premier d'entre eux concerne le compromis nécessaire à faire sur la valeur du rapport R_{off}/R_{on} . Tandis qu'une bonne représentation des états bloqués et passants des semi-conducteurs justifierait un rapport élevé (de l'ordre de 10^8 à 10^{12}), la stabilité des méthodes d'intégration numériques ainsi que la précision des calculs matriciels imposent un rapport inférieur à environ 10^6 . Cette contrainte affecte

la qualité des résultats obtenus et le temps de calcul. Ce qui pousse à intégrer des accélérateurs de convergence dans les simulateurs utilisant cette approche. De plus, la totalité des calculs est effectuée en prenant en compte à tout instant le circuit complet alors que très souvent seule une partie de ce circuit est active, ce qui implique des calculs inutiles.

- **La Topologie variable** : Dans les modèles à topologie variable, les semi-conducteurs sont toujours modélisés par un circuit ouvert à l'état bloqué et généralement par un court-circuit à l'état passant. Cependant, dans ce dernier état, une représentation plus complexe peut être envisagée (résistance, résistance avec une fem en série,...). Pour chaque phase de fonctionnement du convertisseur étudié nous pouvons éliminer les interrupteurs en conduction et éliminer les branches ouvertes causées par les interrupteurs bloqués. Il est donc possible d'avoir des circuits réduits ce qui facilitera la suite de l'étude. Cette représentation offre de nombreux intérêts :

1. Les systèmes d'équations à traiter à chaque instant de la simulation sont simples et réduits. Il sont donc rapides à simuler et peuvent être facilement couplés avec des modèles analytiques complexes de machine électrique.
2. Elle résout également des problèmes liés à la simulation en topologie fixe (disparité des constantes de temps, temps de simulation long,...). Le pas de calcul n'intégrant aucune constante de temps parasite, il ne dépend que des constantes de temps propres au système.

3.3.8.2 Mode de changement de configuration

Le changement discontinu peut produire dans le système d'autres changements discontinus instantanés. Ces états fugitifs sont atteints et disparaissent instantanément, ils sont, donc considérés comme transitoires [Chami, 2005]. Puisque ces configurations transitoires sont fugitives et ne sont jamais réalisés en réalité, elles n'affectent pas le bilan énergétique du système. Par conséquent, les nouvelles valeurs de I dans chaque état fugitif sont calculées à partir de l'état initial du vecteur I . Ce processus est illustré dans la figure (FIG. 3.24). Les vraies configurations sont montrées sur un fond blanc et les configurations fugitives sont montrées sur un fond foncé. Durant les changements fugitifs, les configurations des interrupteurs changent mais pas le vecteur d'état.

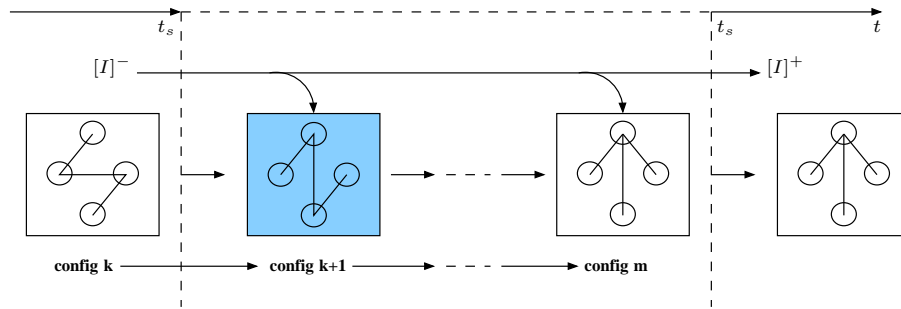


FIG. 3.24 – Le changement entre deux configurations réelles

3.3.8.3 Les techniques de résolutions numériques

Les modèles dynamiques à simuler peuvent être continus, discrets ou hybrides. Concernant les systèmes discrets, la simulation ne pose, en général, aucun problème. Partant des conditions initiales données, les équations discrètes d'état sont itérées jusqu'au temps final spécifié par l'utilisateur. Par contre, trouver une solution numérique pour les systèmes continus et hybrides nécessite le choix d'une bonne méthode d'approximation. Le but des algorithmes d'intégration est d'effectuer une bonne approximation de la solution de l'équation différentielle [Chami, 2005]. Étant donné que tous les algorithmes d'intégration continue sont des approximations, il existe un nombre important de critères à considérer pour sélectionner une méthode convenable :

- efficacité du calcul ;
- erreurs de troncature et d'arrondi ;
- précision et fiabilité de la solution ;
- stabilité de l'algorithme d'intégration.

Les différentes approches d'intégration numérique diffèrent les unes des autres par le choix de l'ordre à utiliser dans la série de Taylor mais aussi par le choix de la prise en charge du pas d'intégration (pas fixe, variable,...) [Chami, 2005].

3.4 Comparaison entre les deux formalismes

Le Bond Graph et le RDHC représentent graphiquement le transfert d'énergie dans un système. Les différents composants de base comme les sources effort et flux, résistance, inertie et capacitance sont présentés d'une façon équivalente. Cela implique que tous les systèmes, qui sont modélisés par le bond graph, le sont aussi par le RDHC.

La présentation topologique du RDHC montre une différence dans la représentation

des associations série/parallèle. En effet, ce modèle garde la topologie des systèmes visible et claire à l'exploitation.

La définition de la causalité dans un Bond Graph est déterminante pour la génération du système d'équation. C'est après cette étape qu'il est possible de définir les variables d'état du système. En revanche, le RDHC, au contraire, laisse cette tâche à la phase d'exploitation des équations.

Un autre avantage que nous voyons très important du RDHC par rapport au Bond Graph, est celui de la génération du modèle d'un système hybride. En effet, le Bond Graph a fait ses preuves pour la représentation de la partie continue du système mais la partie discrète reste peu développée. La génération de deux modèles pour les deux cas (ON/OFF) des interrupteurs s'avère difficile à gérer surtout que pour un nombre de n interrupteurs, cela génère 2^n configurations et surtout 2^n modèles différents. Le modèle RDHC quand à lui génère un seul modèle valable pour toutes les configurations. Ce qui présente une facilité non négligeable.

Le RDHC génère le système d'équation global, le vecteur d'inconnus est composé du vecteur d'état et du vecteur de tous les autres variables. Dans le cas d'une modélisation des interrupteurs avec une topologie fixe, la topologie du circuit ne change pas et donc pas de changement pour le système d'équation. Nous pouvons dire alors que la méthode d'analyse graphique a un meilleur rendement.

Dans le cas d'une modélisation des interrupteurs avec une topologie variable, la topologie du circuit change et de ce fait, une étude graphique de chaque configuration s'avère lourde et peut entraîner un retard en simulation. Dans ce cas la modélisation par le modèle RDHC se montre performante et efficace puisque la génération d'un seul modèle global permet de déduire le système d'équation de toutes les configurations possibles.

3.5 RDHC du véhicule électrique

Dans cette section, nous développons les RDHC de trois systèmes de véhicules électrique. Ces derniers représentent un VE à deux roues motrices sans et ensuite, avec la commande de la vitesse du véhicule, aussi qu'un VE à quatre roues motrices sans la commande de vitesse du véhicule.

3.5.1 RDHC du véhicule électrique à deux roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule

Le système étudié est celui représenté dans la figure (FIG. 2.3). Nous considérons que ce véhicule est propulsé par ses deux roues motrices du train arrière (Moteur2 et Moteur4). Chaque roue intègre dans sa jante un moteur de type synchrone à aimants permanents alimenté par une batterie d'accumulateurs à travers un onduleur triphasé. Afin de pouvoir développer le RDHC du véhicule électrique, nous avons décomposé la structure considérée en plusieurs composants représentant la partie mécanique, la motorisation électrique, la consigne de l'angle de braquage et une entrée définissant l'angle d'inclinaison de la route.

RDHC du composant représentant la mécanique du véhicule électrique :

En partant du modèle mathématique décrit par le système d'équations (2.30), nous pouvons établir le système pour deux roues motrices :

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_x &= v_y r + \frac{F_{t2} + F_{t4} - F_{res}}{M_v} + \frac{C_{yf} \delta}{M_v} \left(\frac{v_y + r l_r}{v_x} - \delta \right) \\
 \dot{v}_y &= \left(-\frac{C_{yr} + C_{yf}}{M_v v_x} \right) v_y + \left(\frac{C_{yr} l_r - C_{yf} l_f}{M_v v_x} - v_x \right) r + \frac{C_{yf}}{M_v} \delta \\
 \dot{r} &= \left(\frac{C_{yr} l_r - C_{yf} l_f}{J_v v_x} \right) v_y - \left(\frac{C_{yr} l_r^2 + C_{yf} l_f^2}{J_v v_x} \right) r + \frac{C_{yf} l_f}{J_v} \delta + \frac{d}{J_v} (F_{t2} - F_{t4})
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

A partir du système d'équations (3.13) et en faisant référence aux équations (2.7), (2.14), (2.26) et (2.35), nous pouvons définir les expressions des transitions du RDHC F_i , ($i = 1, \dots, 12$). Où N_1, N_2, N_3, N_4 sont les entrées du composant et elles correspondent respectivement à l'angle de braquage δ , à l'angle d'inclinaison de la route α_p et aux vitesses angulaires de deux moteurs ω_4, ω_2 (Moteur4 et Moteur2). N_5, N_6 sont les sorties de ce même composant et elles correspondent respectivement aux couples résistants de deux moteurs Γ_{r4}, Γ_{r2} (Moteur4 et Moteur 2). D, u_{t4}, u_{t2} sont respectivement l'angle ψ entre

le repère du véhicule xy et le repère inertiel XY , et les vitesses linéaires au niveau des roues (4) et (2).

$$\begin{aligned}
F_1 &= M_v v_y r + \alpha_f C_{yf} N1 + F_{t2} + F_{t4} - F_{res} \\
F_2 &= C_{yf} N1 + \frac{(C_{yr} l_r - C_{yf} l_f) r}{v_x} - \frac{(C_{yr} + C_{yf}) v_y}{v_x} - M_v v_x r \\
F_3 &= C_{yf} l_f N1 + d(F_{t2} - F_{t4}) - \frac{(C_{yr} l_r^2 + C_{yf} l_f^2) r}{v_x} + \frac{(C_{yr} l_r - C_{yf} l_f) v_y}{v_x} \\
F_4 &= \mu_2 M_v g \cos(N2)/4 \\
F_5 &= \mu_4 M_v g \cos(N2)/4 \\
F_6 &= \frac{1}{2} C_{px} S_f \rho V_{cg}^2 + M_v g \sin(N2) + C_{rr} M_v g \\
F_7 &= \frac{M_v}{2(l_f + l_r)} (g l_f + g h_{cg} N2 d v_{cg} + g h_{cg} N2) \\
F_8 &= \frac{v_y + l_f r}{v_x} - N1 \\
F_9 &= v_x \cos(D) - v_y \sin(D) \\
F_{10} &= v_x \sin(D) + v_y \cos(D) \\
F_{11} &= f(u_{t4}, N3) \\
F_{12} &= f(u_{t2}, N4)
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Il est montré sur la figure (FIG. 3.25) le composant qui représente la dynamique du véhicule ainsi que son RDHC.

RDHC du composant représentant la motorisation électrique du véhicule électrique :

Du fait que les moteurs électriques sur l'essieu arrière soient du même type, dans la simulation, on peut considérer un seul composant du système convertisseur-moteur, identique pour les deux roues. Ce choix n'influence pas la dynamique du véhicule cependant une différence des vitesses et des couples se manifeste lorsque la voiture prend un virage.

Nous sommes partis pour la modélisation du moteur-roue qui est un moteur synchrone à aimants permanents à fem sinusoïdale. En faisant référence aux équations citées

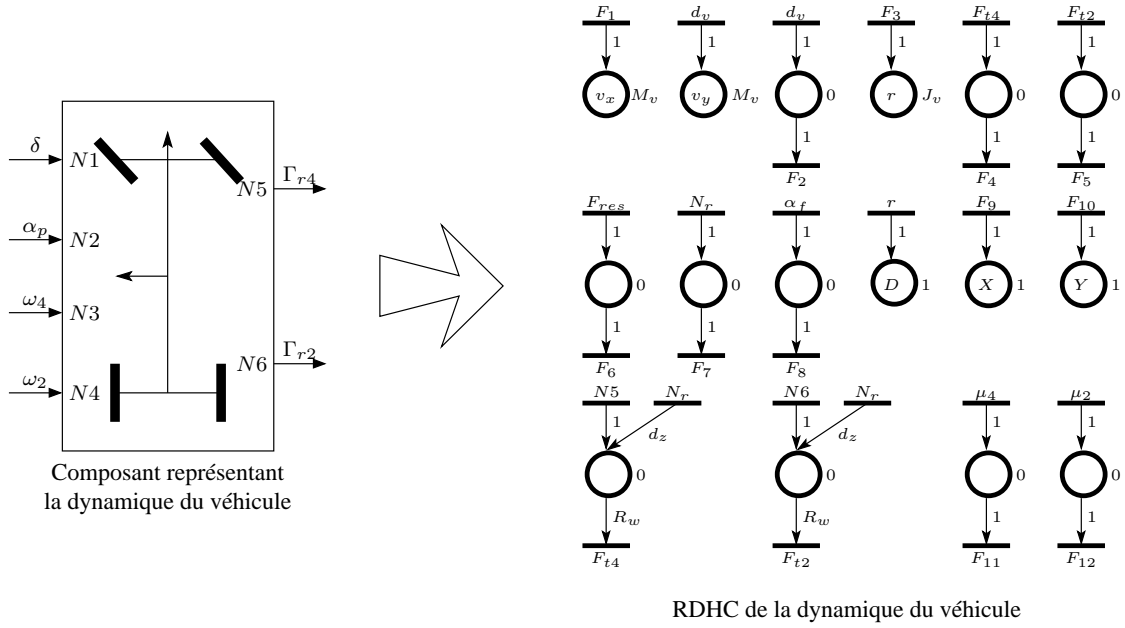


FIG. 3.25 – Composant représentant la dynamique du véhicule et son modèle RDHC équivalent

dans le paragraphe (§2.4), on peut réaliser le RDHC correspondant. Les expressions des transitions du RDHC sont alors données par le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned}
 F_1 &= -K\omega \sin(\theta_e) \\
 F_2 &= -K\omega \sin(\theta_e - 2\pi/3) \\
 F_3 &= -K\omega \sin(\theta_e - 4\pi/3) \\
 F_4 &= -KI_a \sin(\theta_e) \\
 F_5 &= -KI_b \sin(\theta_e - 2\pi/3) \\
 F_6 &= -KI_c \sin(\theta_e - 4\pi/3)
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Les entrées et les sorties du composant représentant la motorisation électrique ainsi que le modèle du RDHC équivalent sont illustrés sur la figure suivante (FIG. 3.26). Le moteur est alimenté par une batterie d'accumulateur à travers l'onduleur illustré sur la figure (FIG. 3.27).

3.5.2 RDHC du véhicule électrique à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule

De la même manière qu'auparavant (§3.5.1), et en s'appuyant sur les équations citées aux paragraphes (2.3.4), (2.4) et (2.5) qui décrivent le comportement d'un véhicule

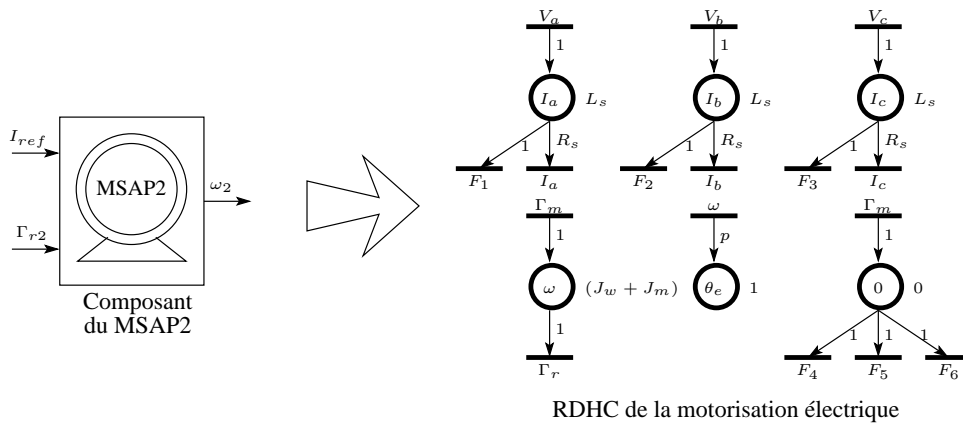


FIG. 3.26 – Composant représentant la motorisation électrique et le modèle RDHC équivalent

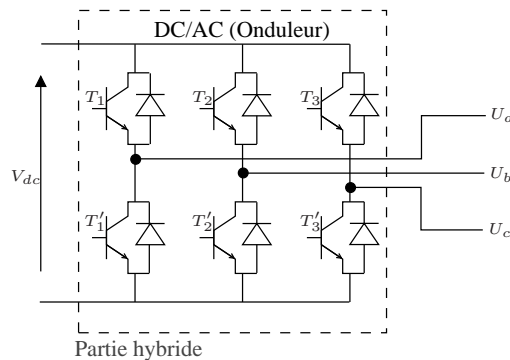


FIG. 3.27 – Onduleur utilisé

électrique à quatre roues motrices, nous pouvons développer les modèles RDHC équivalents. Dans le modèle RDHC représentant la partie dynamique du véhicule, nous nous prenons en considération les deux forces de traction (F_{t1} , F_{t3}) générées par les deux moteurs de l'essieu avant (Moteur1 et Moteur3). Nous devons aussi prendre en compte les variations des coefficients du glissement pour ces deux roues motrices (μ_1 , μ_3). Une troisième différence, par rapport au modèle à deux roues motrices, impose l'estimation de la charge N_f sur l'essieu avant du véhicule. Quant au modèle RDHC de la motorisation électrique à bord, il est identique au modèle RDHC développé pour la voiture à deux roues motrices sous réserve d'une différence en vitesses et en couples pendant le passage d'un virage.

Sur la figure (FIG. 3.28), nous illustrons le modèle RDHC de la partie dynamique ainsi que les entrées et les sorties de ce composant. Le RDHC de la partie motorisation électrique est identique à celui de la figure (FIG. 3.26).

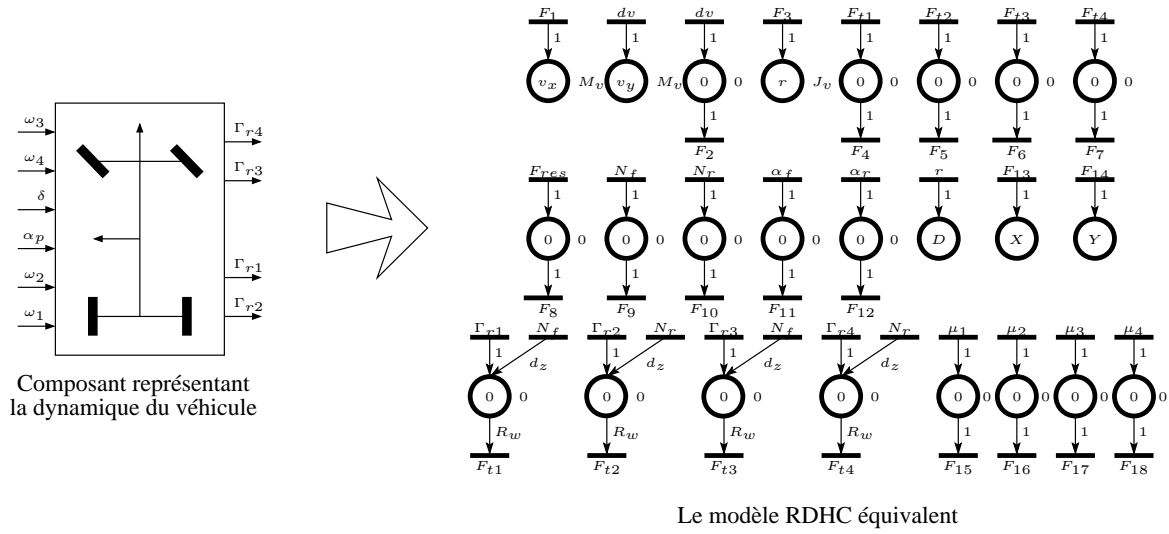


FIG. 3.28 – Composant représentant la partie dynamique du véhicule et le modèle RDHC équivalent

3.5.3 RDHC du véhicule électrique à deux roues motrices avec la commande de la vitesse du véhicule

Dans cette partie, nous sommes partis de la modélisation décrite dans la section (2.6). La représentation énergétique macroscopique, choisie pour réaliser la commande de la voiture, ainsi que le RDHC sont des représentations graphiques basées sur des modèles analytiques (ou mathématiques). Nous pouvons donc développer les modèles RDHC équivalents de la représentation énergétique macroscopique (REM) et de sa structure maximale de commande (SMC) en faisant référence à leurs modèles mathématiques. Nous avons décomposé le modèle du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) en plusieurs composants (ou blocs) selon la démarche suivie pour réaliser la REM de la voiture. Ces blocs sont :

- le bloc (abc2dq), dans lequel une transformation se charge de transformer les grandeurs statoriques vers le repère tournant dq ;
- le bloc (MS), dans lequel on trouve le modèle dq du moteur synchrone à aimants permanents ;
- le bloc (Inversion du MS), dans lequel une inversion du MSAP est faite afin de réaliser la structure maximale de commande ;
- le bloc (dq2abc), dans lequel les grandeurs du repère dq se transforment en grandeurs statoriques.

L'ensemble de ces blocs avec leurs entrées et sorties, est montré sur la figure (FIG. 3.29).

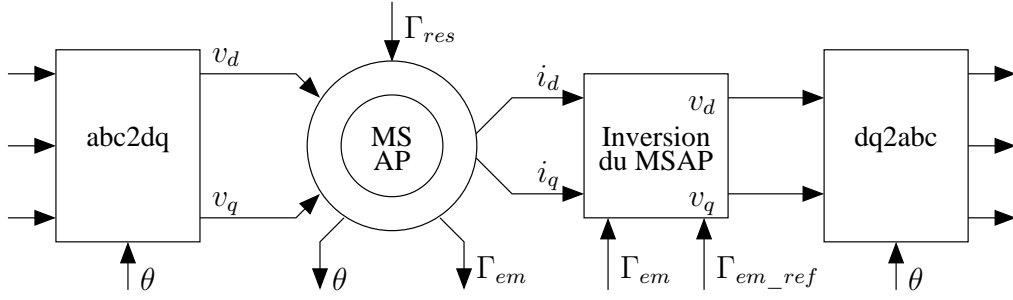
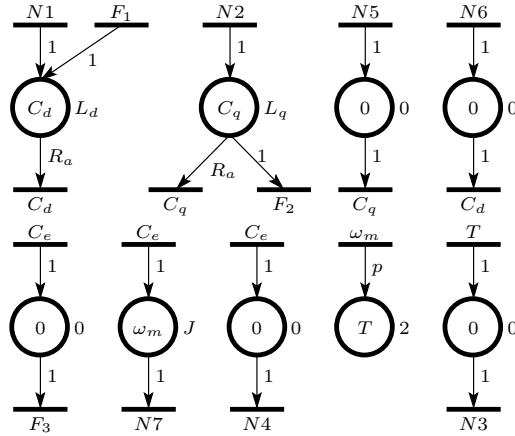


FIG. 3.29 – Le MSAP

En se basant sur les modèles mathématiques du MSAP et son inversion réalisés auparavant (§2.6), nous avons développé le modèle RDHC du moteur comme le montre la figure (FIG. 3.30).


 FIG. 3.30 – RDHC du modèle- dq du MSAP

où $(N1, \dots, N7)$ sont les entrées et les sorties du bloc (MSAP). Elles correspondent respectivement aux variables $(v_d, v_q, \theta, \Gamma_{em}, i_q, i_d, \Gamma_{res})$. C_d, C_q, T correspondent respectivement aux (i_d, i_q, θ) . J est l'inertie totale du moteur et de la roue ($J = J_m + J_w$). F_1, F_2, F_3 sont les transitions du RDHC, elles ont les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
 F_1 &= pL_q i_q \omega_m / 2 \\
 F_2 &= p(L_d i_d + \phi_{pm}) \\
 F_3 &= 0.75p((L_d - L_q)i_d i_q + \phi_{pm} i_q)
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Sur la figure (FIG. 3.31), il est illustré le modèle RDHC du bloc (inversion du MSAP). où $(N1, \dots, N6)$ représentent les entrées et les sorties de ce bloc, elles correspondent respectivement aux variables $(i_d, i_q, \Gamma_{em}, \Gamma_{em_ref}, v_q, v_d)$. (e, f, g) sont les parties intégrales de trois PID utilisés pour inverser le bloc du MSAP. $(d0$ et $d1)$ représentent respectivement

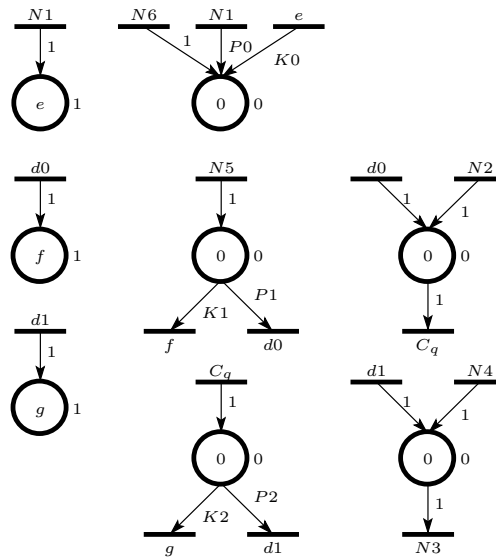


FIG. 3.31 – RDHC de l'inversion du MSAP

les erreurs dues aux comparaisons des consignes de courant i_d et de couple Γ_{em} avec les valeurs mesurées. $(P0, K0)$ sont respectivement les coefficients proportionnel et intégral du premier PID utilisé pour i_d , $(P1, K1)$ sont les coefficients proportionnel et intégral du PID contrôleur utilisé pour i_q et $(P2, K2)$ sont ceux du troisième PID utilisé pour Γ_{em} , voir la figure (FIG. 2.25). Le modèle RDHC représentant la dynamique du véhicule est réalisé de façon similaire. Selon la démarche suivie dans la REM, nous avons les blocs, roue, couplage mécanique et châssis. Les modèles RDHC représentant ces trois blocs sont donnés par la figure (FIG. 3.32). La figure (FIG. 3.33) présente les modèles RDHC de l'in-

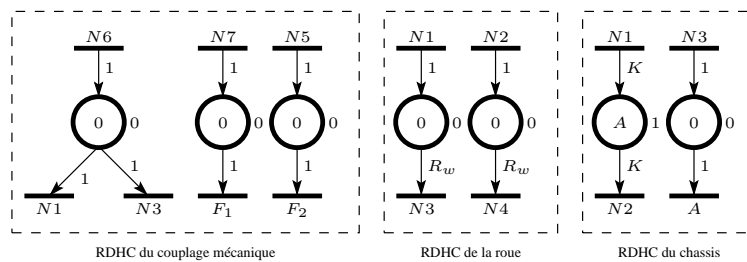


FIG. 3.32 – RDHC du couplage mécanique, de la roue et du châssis

version du châssis, du couplage mécanique et les deux roues (gauche et droite) de l'essieu arrière. Un seul composant nommé (Correction) a été créé pour représenter l'ensemble de ces inversions dont $N1, N2, N3$ sont ses entrées représentant respectivement la force résistante F_{res} , la vitesse du véhicule V_{veh} et la consigne de la vitesse de référence du véhicule V_{veh_ref} . A partir de ses entrées ce composant produit comme sorties les deux consignes

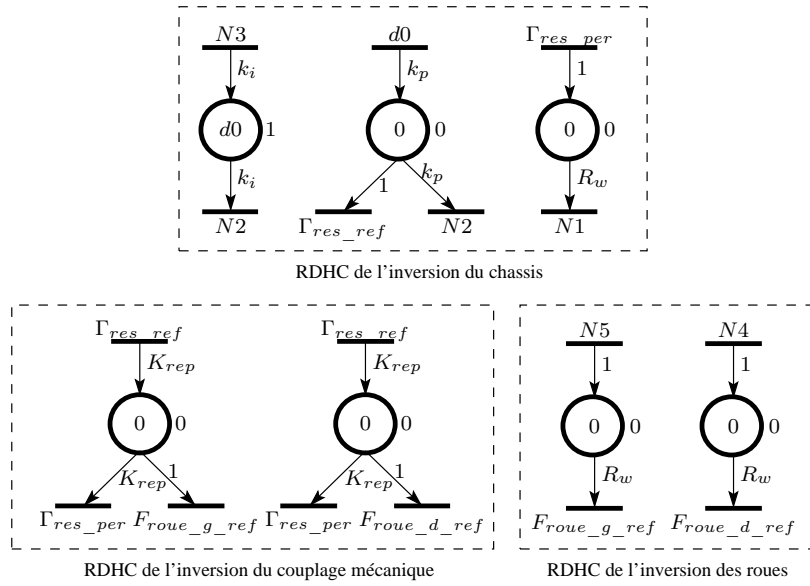


FIG. 3.33 – RDHC de l'inversion du châssis, du couplage mécanique et des roues

$N4, N5$ correspondant aux couples moteurs droite et gauche ($\Gamma_{em_d_ref}, \Gamma_{em_g_ref}$). Les poids de branches k_i, k_p sont les coefficients intégral et proportionnel du contrôleur PI utilisé pour inverser l'élément d'accumulation (le châssis). Le poids K_{rep} est le coefficient de répartition qui fait partager la consigne de la force totale F_{tot_ref} sur les deux roues motrices ($F_{roue_d_ref}, F_{roue_g_ref}$).

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence que le formalisme RDHC est en adéquation avec la modélisation des véhicules électriques. En effet, l'aspect multi-physique et hybride de ces systèmes est fidèlement représenté par la caractéristique générique du modèle RDHC. Ce choix a été consolidé par l'exposition d'une étude comparative entre le modèle RDHC et le modèle bond graph. Il a été montré que la génération du système d'équation à l'aide du modèle RDHC s'avère intéressante et plus économique. Nous avons donc adopté les Réseaux Dynamiques Hybrides à Composants comme modèle de base pour l'outil de simulation ELEVES développé dans cette thèse. Trois modèles RDHC correspondant à trois systèmes de motorisation de VE ont été développés. Ces systèmes sont le VE à deux roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule, le VE à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule et VE à deux roues motrices avec la commande de la vitesse du véhicule.

Dans le chapitre suivant nous exposons l'algorithme global du logiciel de simulation des VE mettant en œuvre les modèles précédemment présentés. Cet outil, baptisé ELEVES (ELEctric VEhicle Simulator), a pour objectif de proposer la simulation fine des véhicules à motorisation électrique. D'une part, il capitalisera les résultats de recherche dans les domaines de la modélisation des dispositifs électriques embarqués, de la gestion de leur énergies et de la commande dynamique des VE. D'autre part, il servira comme outil d'aide à la conception et la commande des véhicules électriques routiers.

Chapitre 4

Le simulateur ELEVES : Présentation, Résultats de Simulation et Validation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous mettons en œuvre la méthode de représentation graphique RDHC précédemment présentée. Ceci se réalise à travers le développement des programmes informatiques de trois systèmes à savoir : le VE à deux roues motrices sans commande de vitesse du véhicule, le VE à quatre roues motrices sans commande de vitesse du véhicule et le VE à deux roues motrices avec la commande de vitesse du véhicule. L'outil ainsi développé constitue la première étape vers un (Simulateur) de véhicules électriques que nous avons baptisé ELEVES (acronyme de ELEctric VEhicle Simulator). Tout d'abord, nous présentons l'organigramme du logiciel ELEVES où son principe de fonctionnement et ses bibliothèques sont exposés. Puis, nous montrons à travers les trois exemples traités, les étapes nécessaires à la réalisation d'une application ELEVES. Enfin, nous confrontons les résultats de notre outil avec ceux obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

4.2 Présentation d'ELEVES

ELEctric **VE**hicle **S**imulator, **ELEVES**, est une version spécialisée du logiciel appelé **SimRDHC** (SIMulateur à base du Réseau Dynamique Hybride à Composant) ayant fait l'objet d'une thèse soutenue à l'UTBM (Université de Technologie de Belfort-Montbéliard) en Décembre 2005 [[Chami, 2005](#)].

Nous commençons cette section par l'organigramme structurel d'ELEVES, puis, nous donnons ses fonctionnalités.

4.2.1 Structure du simulateur ELEVES

ELEVES est un simulateur des composants ou sous-systèmes constituant le véhicule électrique à entraînement direct. Le simulateur est implémenté sous Windows avec le langage de programmation DELPHI [Dahan et Toth, 2003]. Il adopte une approche originale pour la génération des équations du système, basée sur l'utilisation du modèle RDHC (Réseaux Dynamiques Hybrides à Composants) de chaque composant. ELEVES permet la visualisation, en fonction du temps, des variables d'état et des variables intermédiaires. Il utilise des algorithmes développés à l'UTBM au sein du laboratoire Systèmes et Transport (SeT).

Le principal avantage d'ELEVES est la possession d'une modularité assez élevée, afin d'être en mesure de modéliser les nouveaux types de composants et de les intégrer facilement dans le système complet du véhicule. Cette modularité concerne les composants (mécaniques, électriques,...) constituant le système, l'interaction entre eux mais aussi le système complet. La modélisation du véhicule implique alors la modélisation de ses différents composants et l'interaction entre eux.

L'interface graphique schématisée sur la figure (FIG. 4.1) permet aux utilisateurs de choisir la configuration du véhicule (traction intégrale, traction et propulsion), la géométrie du véhicule (longueur, largeur, hauteur, masse,...), et la motorisation électrique à bord (sources d'énergie, convertisseurs, moteurs).

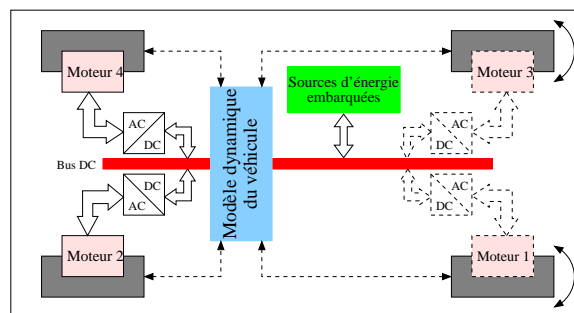


FIG. 4.1 – Interface graphique d'ELEVES

Les trois types de configuration actuellement traitées par ELEVES sont :

1. la traction intégrale où les quatre roues participent à l'avancement du véhicule ;

2. la traction où seules les deux roues du train avant du véhicule sont des roues motrices ;
3. la propulsion où les roues motrices sont celles du train arrière du véhicule.

Dans toutes les trois configurations, le braquage s'applique sur les roues directrices (les deux roues du train avant du véhicule). L'utilisateur peut également choisir le type de moteur. ELEVES propose actuellement trois types de moteur, le moteur à courant continu (MCC), le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) et le moteur asynchrone (MAS). Bien que le simulateur soit principalement conçu pour des véhicules électriques possédant, comme source d'énergie, les batteries d'accumulateur, il est capable d'inclure d'autres sources d'énergie comme les piles à combustibles ou les supercapacités. Il offre surtout, la possibilité à l'utilisateur d'enrichir sa bibliothèque par de nouveaux composants et/ou modèles plus ou moins fins.

4.2.2 Organigramme d'ELEVES

Sur l'organigramme d'ELEVES de la figure (FIG. 4.2), nous pouvons remarquer qu'il offre à l'utilisateur trois possibilités.

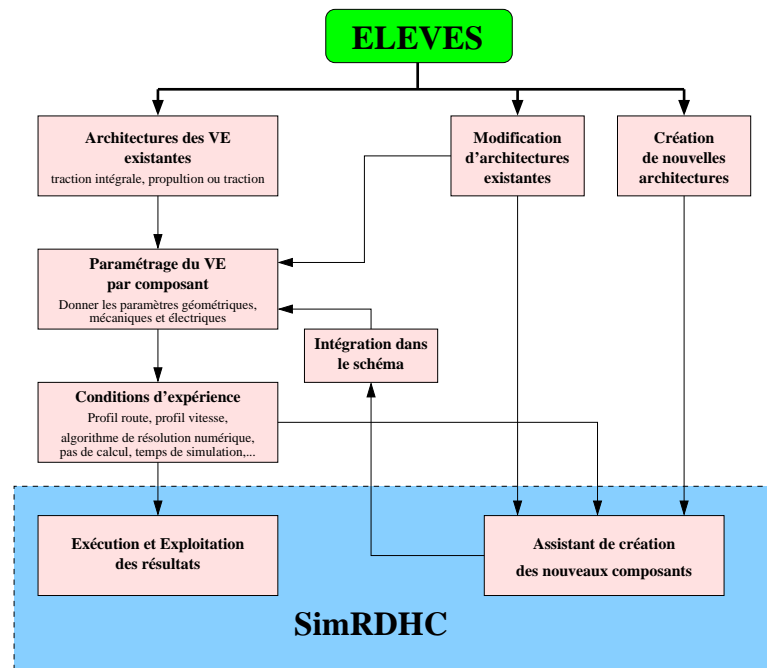


FIG. 4.2 – Organigramme de simulation dans ELEVES

1. Le lancement de l'une des architectures existantes pour effectuer une simulation en passant par trois étapes : le paramétrage du VE par composant, les conditions

d'expériences puis exploitation des résultats. Cela lui permet d'analyser le comportement du VE pour des besoins de conception et/ou de commande du système entier ou d'un organe seul.

2. La modification de l'une des architectures existantes où l'utilisateur peut changer les paramètres des composants, le profil de la route ou celui de la vitesse de référence. Il peut également supprimer un composant et le remplacer par un autre existant dans la bibliothèque du logiciel ou bien créer un nouveau composant (un nouveau profil de vitesse par exemple) selon ses besoins en utilisant l'assistant de création des nouveaux composants.
3. La construction de sa propre architecture, domaine sur lequel plusieurs points d'incertitudes subsistent aujourd'hui encore tant sur l'architecture idéale que sur le choix de la gestion d'énergie optimale.

4.2.2.1 Le paramétrage des composants

Après avoir choisi la configuration désirée ainsi que la motorisation à bord, l'étape du paramétrage des composants s'impose. Dans cette étape l'utilisateur introduit à chaque composant les paramètres concernés.

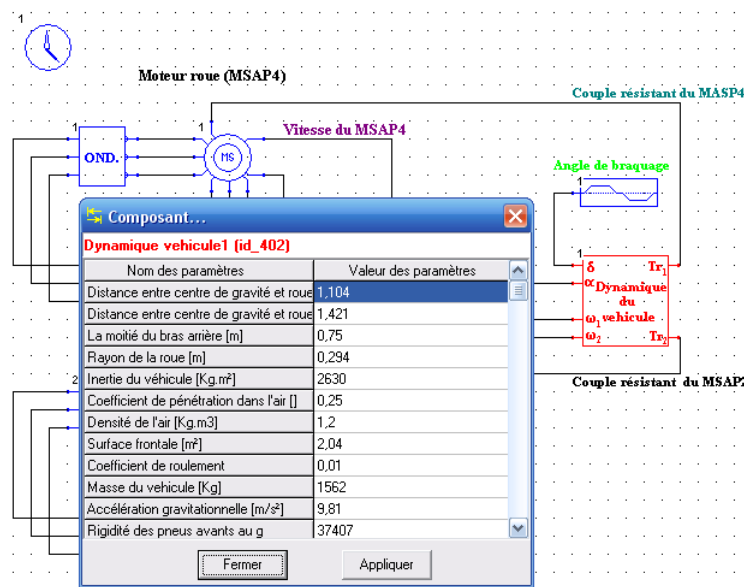


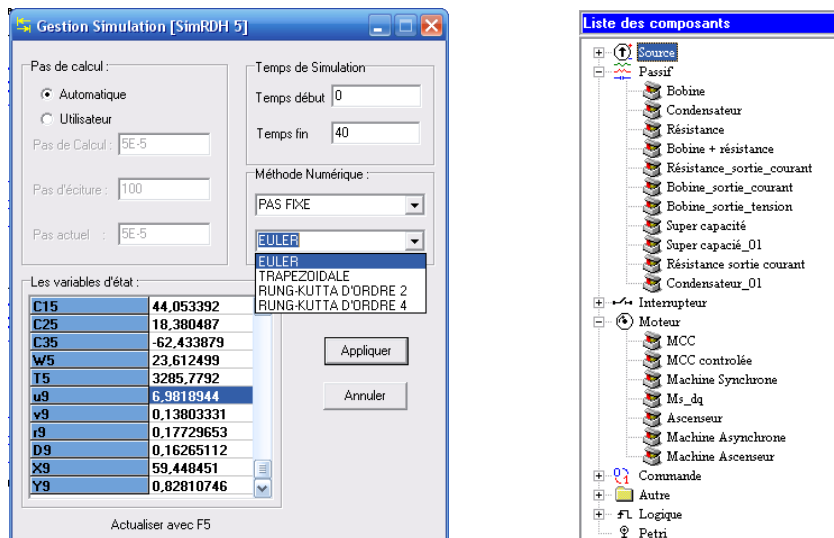
FIG. 4.3 – Le paramétrage du système par composant

A titre d'exemple, l'utilisateur fournit les dimensions du véhicule (l'empattement L , l'hauteur du centre de gravité h_{cg} , le poids du véhicule M_v ,...) pour le composant qui

représente la mécanique du véhicule comme le montre la figure (FIG. 4.3).

4.2.2.2 Les conditions d'expérience

Une fois l'utilisateur satisfait, c'est-à-dire qu'il a choisi la configuration et a effectué le paramétrage des composants, le logiciel lui donne un accès à la fenêtre de configuration des paramètres de la simulation. Elle permet à l'utilisateur de régler le temps de début et fin de simulation, le pas de calcul, le pas d'écriture et la méthode numérique d'intégration à pas fixe ou à pas variable (4.4(a)). Elle permet également la visualisation des variables d'état et les variables intermédiaires du système étudié. De plus, l'utilisateur peut récupérer des composants de la bibliothèque du logiciel (4.4(b)) et les intégrer dans le schéma global du système étudié (tester plusieurs missions de vitesse par exemple).



(a) Configuration des paramètres de la simulation

(b) Bibliothèque des composants

FIG. 4.4 – Le gestion de simulation et la bibliothèque des composants

4.2.2.3 Création et modification d'architectures

L'utilisateur réalise ces opérations à l'aide de deux des trois blocs du logiciel SimRDHC dont, les programmes sont écrits avec un code pascal sous le logiciel Delphi [Chami, 2005].

La figure (FIG. 4.5) montre la composition du logiciel SimRDHC comportant quatre fichiers exécutables et un nombre de fichiers bibliothèque DLL (*Dynamic Link Libraries*) :

- **Tschema** : L'éditeur des systèmes hybrides sous forme de schéma.
- **Srdhc** : Le simulateur des systèmes hybrides.

- **Tcourbe** : L'éditeur de courbes issues de la simulation.
- **Assistant** : L'outil pour la création de nouveaux composants.

Il contient encore trois modules associés au modèle, le premier relatif au RDCC effort, le deuxième au RDCC flux et le dernier aux paramètres des composants. Afin de faciliter l'utilisation du logiciel nous avons orienté une partie de nos travaux vers l'aspect convivialité. Nous proposons de décrire sommairement les modules représentant le contexte dans lequel l'utilisateur évoluera pour créer un nouveau composant et/ou en modifier un.

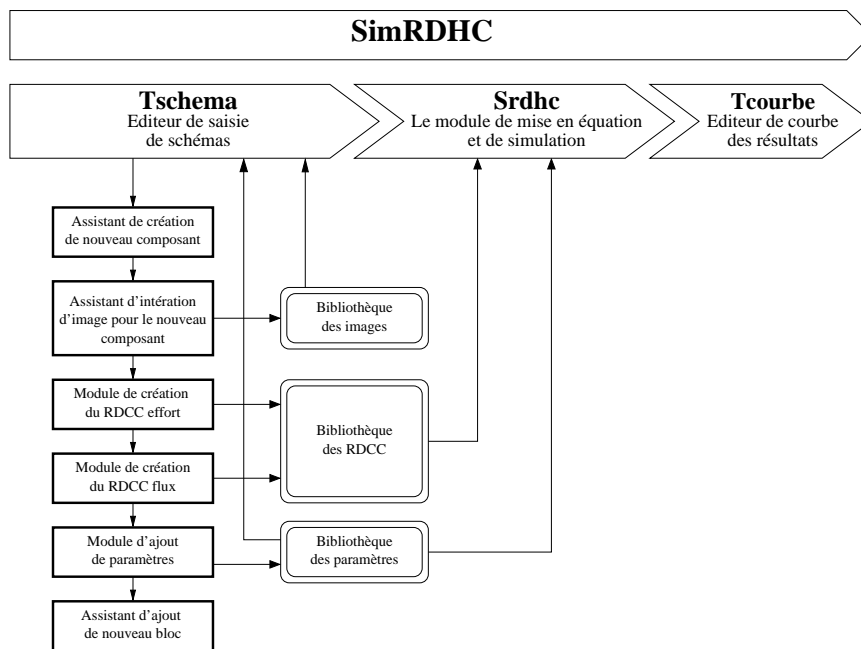


FIG. 4.5 – Bibliothèques du logiciel SimRDHC

A. L'éditeur *Tschema*

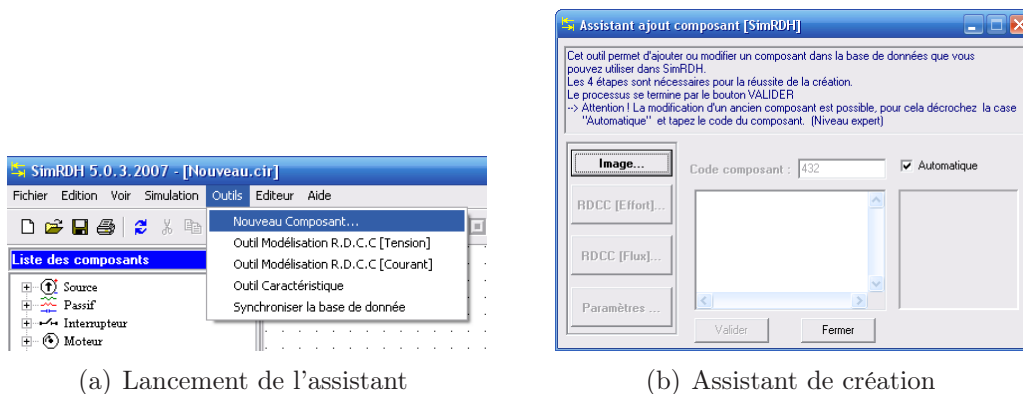
Il permet la saisie, la lecture et la modification des circuits hybrides (*.cir). Ensuite, il les transforme automatiquement vers une liste réseaux (Netlist) facile à prendre en charge par le simulateur. *Tschema* propose dans sa base de données plusieurs éléments électriques, mécaniques et de contrôle. Il permet l'introduction des paramètres pour chaque élément inséré dans l'aire de dessin. *Tschema* offre un accès facile à toutes ces commandes via son menu défilant et son menu qui s'active par un click droit sur la souris dans l'aire de dessin. Utilisant ces commandes, nous pouvons :

- Concevoir un système avec facilité.
- Changer les paramètres par défaut d'un composant.
- Visualiser le modèle RDCC d'un composant.

- Ouvrir ou sauvegarder un circuit à partir ou vers le disque avec une extension (*.cir).
- Exporter le circuit sous format bitmap windows.
- Lancer la simulation en exécutant le programme **Srdhc**.
- Créer un nouveau composant ou un nouveau bloc (à partir d'un circuit).

L'assistant de création de nouveaux composants

Vue la complexité grandissante d'architectures des véhicules, cet assistant donne à l'utilisateur une liberté élevée pour qu'il puisse réaliser ses propres modèles et par la suite construire sa propre architecture. La création d'un nouveau composant ou un nouveau modèle passe par quatre étapes comme le montre la fenêtre de l'assistant donnée sur la figure (FIG. 4.6).



(a) Lancement de l'assistant

(b) Assistant de création

FIG. 4.6 – L'assistant de création de nouveau composant

1. **Le bouton (Image)** : permet de réaliser la première étape de la procédure de création d'un nouveau composant. A ce niveau, on attribue une image exprimant l'objectif pour lequel on développe ce nouveau bloc. Cette étape nous permet de définir les entrées et les sorties du bloc et le type d'entrée ou de sortie (variable, commande ou valeur). Cette étape est illustrée sur la figure (FIG. 4.7).
2. **Le bouton (RDCC [Effort])** : En s'appuyant sur ce bouton, une fenêtre s'affiche sur l'écran en nous donnant l'accès pour réaliser la deuxième étape qui est le développement du modèle RDCC effort. En utilisant les boutons de cette fenêtre (transition, place, arc,...), et partant d'un modèle mathématique, on peut développer le modèle RDCC effort pour ce composant ou bloc. La figure (FIG. 4.8) montre le développement de RDCC effort.

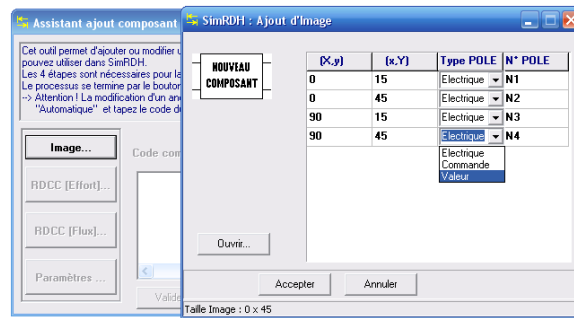


FIG. 4.7 – Attribuer une image à un composant

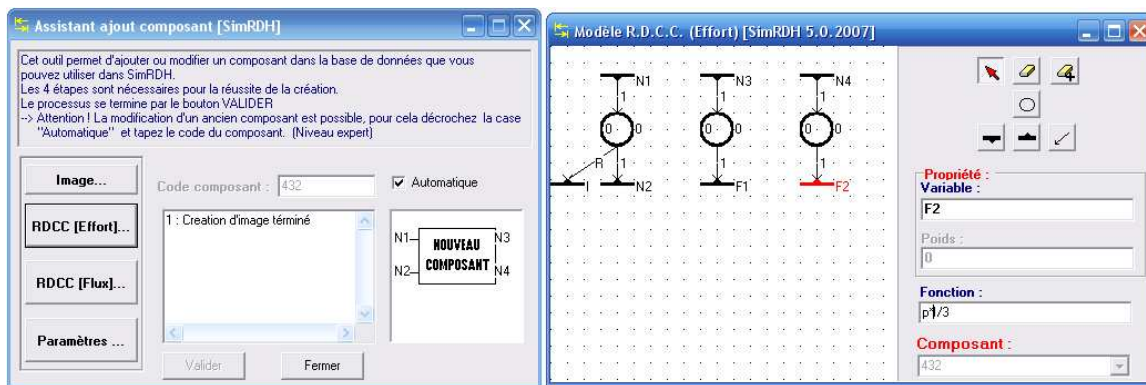


FIG. 4.8 – Développement de RDCC effort

3. **Le bouton (RDCC [Flux])** : A partir de ce bouton, on peut réaliser la troisième étape de procédure qui est le développement du modèle RDCC flux concernant ce nouveau composant. On dispose de la fenêtre représentée sur la figure (FIG. 4.9) et qui nous permet de saisir le modèle RDCC flux dans l'air de dessin.

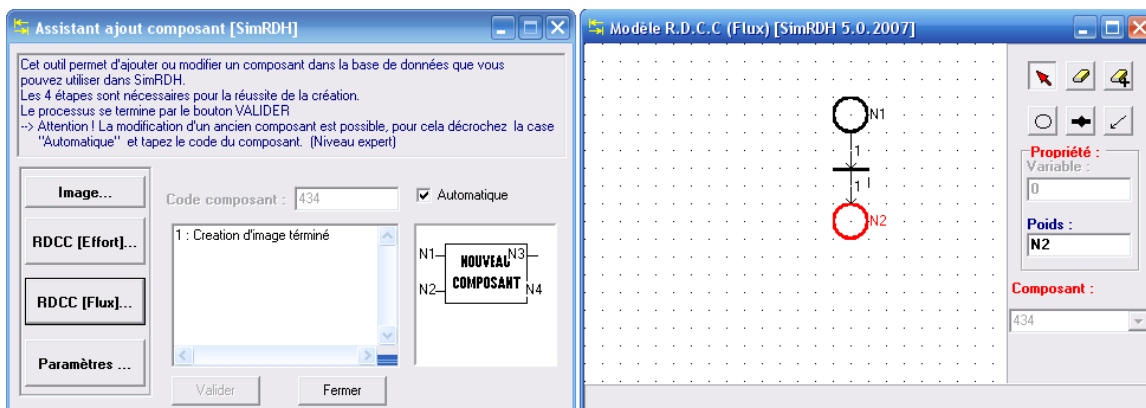


FIG. 4.9 – Développement de RDCC flux

4. **Le bouton (Paramètres)** : Il est la dernière étape de la procédure de création.

Ce bouton nous permet de donner les paramètres utilisés lors du développement des modèles RDCC effort et RDCC flux (FIG. 4.10). L'utilisateur peut changer ces paramètres à tout instant. On termine la procédure de création en appuyant sur le bouton (valider). Ce nouveau composant sera disponible dans la bibliothèque du logiciel.

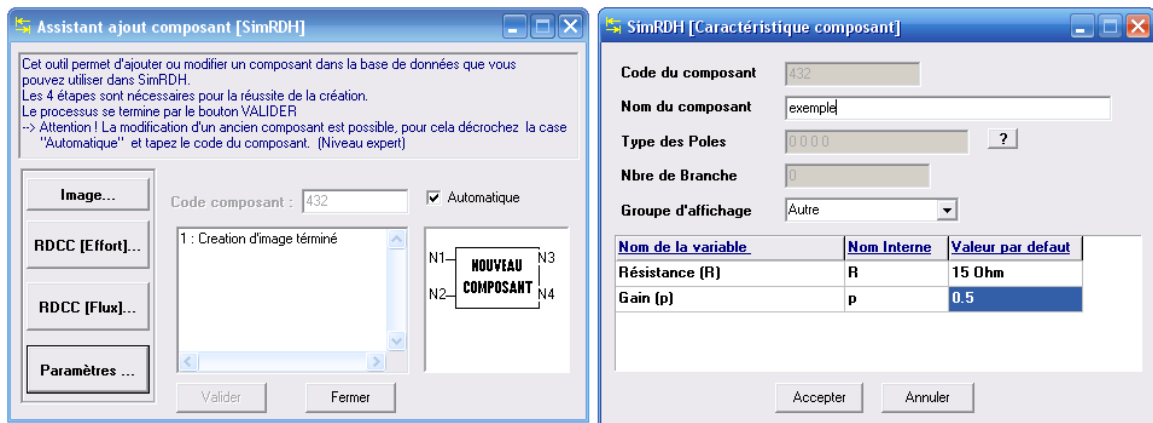


FIG. 4.10 – Paramétrage du composant

B. Le module Srdhc

C'est le cœur de la simulation de l'outil SimRDHC. Ce module lit les fichiers Netlist (*.net) préparés par Tschema. A partir de la NetList, le programme extrait les composants puis crée la liste RDCC effort et flux du système simulé. Cette phase s'appelle (phase d'initialisation) et elle est représentée dans la figure (FIG. 4.11).

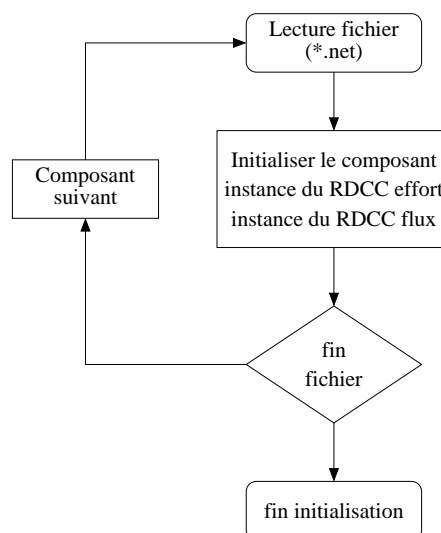


FIG. 4.11 – Phase d'initialisation de la simulation

Après l'application de cet algorithme, le résultat peut être présenté sous forme de trois listes.

1. Liste des composants : Cette liste est composée de tous les paramètres utiles synthétisés sur la figure (FIG. 4.12).

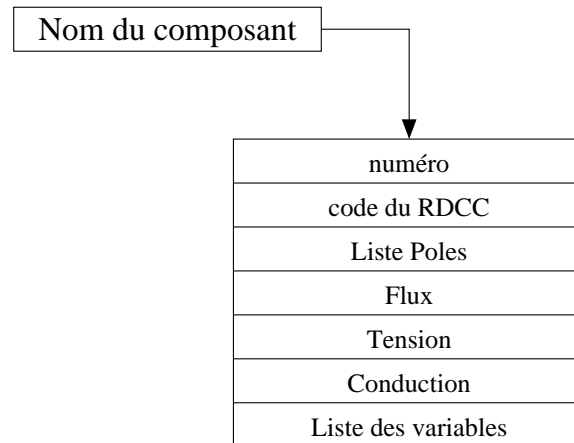


FIG. 4.12 – Champs d'un composant

2. Liste de modèle RDCC effort : Le modèle est décrit de deux manières différentes graphique et textuelle. Ce dernier est exploité directement pour générer les équations des mailles. La représentation textuelle indique pour chaque composant en premier le numéro du RdP lié au RDCC. En deuxième lieu le numéro du composant, le nombre de places contenant le modèle de ce composant. Et à la fin, pour chaque place, nous indiquons toutes les transitions connectées à cette dernière avec le sens entrant (+) ou sortant (-) avec le poids de l'arc de liaison.
3. Liste modèle RDCC flux : Le modèle est décrit sous forme graphique puis textuelle. Il permet la génération des équations de nœuds. La représentation textuelle indique pour chaque place les transitions connectées à cette dernière avec le sens entrant (+) ou sortant (-) et à la fin, la condition de validité relative au RdP.

C. Exécution et exploitation

La simulation

Les modèles RDCC effort et flux nous permettent d'extraire le système d'équation décrit dans le paragraphe (§3.3.5) du troisième chapitre. L'algorithme de la procédure de simulation est donné par l'organigramme de la figure (FIG. 4.13).

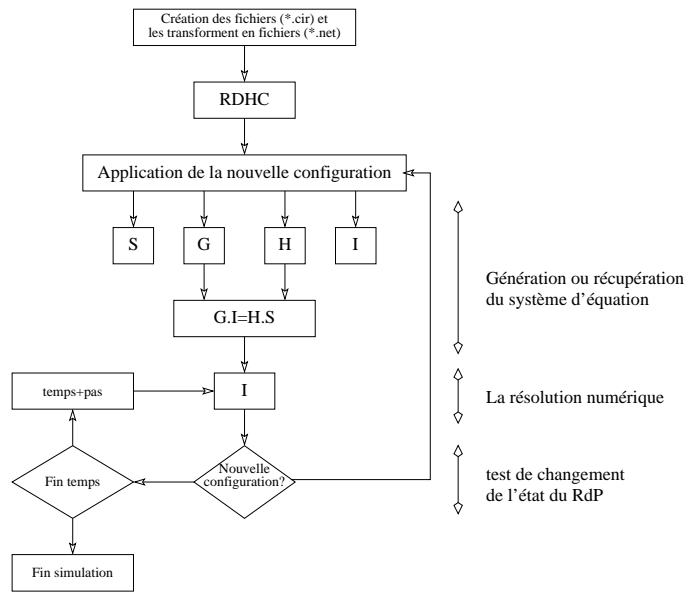


FIG. 4.13 – Procédure de la simulation

Une fois l'utilisateur a fini le schéma global de son système, le logiciel crée les fichiers (*.cir) puis il les transforme en fichiers (*.net). Ce dernier présente le modèle RDHC global du système. A partir de ce modèle, le simulateur génère les équations dynamiques et statiques déduites du modèle RDHC. L'état des interrupteurs, initialisé à l'état bloqué, est associé directement à celui du RdP. Une fois notre premier système d'équation est prêt, la résolution numérique peut commencer en utilisant l'une des méthodes numériques choisies par l'utilisateur. La simulation tient compte des valeurs initiales des variables d'états du système. Après chaque modification de l'état de l'un des RdP, le simulateur génère le système d'équations adéquat et la sauvegarde pour une utilisation ultérieure. La résolution numérique du système d'équations est donc divisée en deux étapes :

1. Inversion de la matrice G et ainsi l'équation (3.11) devient :

$$I = G^{-1} \cdot H \cdot S \quad (4.1)$$

Cette inversion est faite une fois pour chaque configuration sauf si le système contient des places pondérées par des fonctions. Dans ce cas, l'inversion est évaluée à chaque pas de calcul.

2. La résolution numérique revient à une intégration pour la partie de I contenant \dot{X} et un produit matriciel pour la partie contenant $Z(t)$. La méthode numérique est définie par l'utilisateur.

Le module Tcourbe

C'est le module utilisé pour l'affichage des résultats issus de la simulation. L'outil permet de tracer jusqu'à cinq grandeurs simultanément. L'utilisateur peut les sélectionner à partir d'une liste contenant toutes les variables d'état et les variables intermédiaires du système étudié. Il peut également changer le vecteur du temps représentant l'axe horizontal de la courbe par un autre vecteur s'il le souhaite. En appuyant sur le menu (Tracer), on peut accéder à la fenêtre (Propriété du graphe) dans laquelle on peut jouer sur les axes ou bien ajouter un gril sur la courbe. Il est illustré sur la figure (FIG. 4.14) l'ensemble de ces fenêtres.

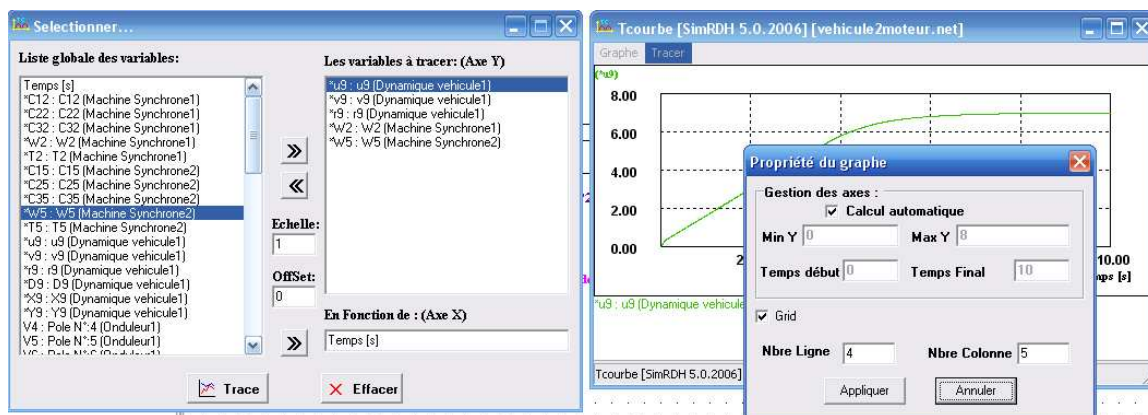


FIG. 4.14 – L'éditeur d'image

A la fin de cette première partie du chapitre, nous voulons faire référence à l'annexe (4.7). Elle montre à l'utilisateur les démarches à suivre pour réaliser une application ELEVES.

4.3 Simulations avec ELEVES

Dans cette section, nous simulons trois architectures de VE à l'aide d'ELEVES, afin de montrer ses capacités. Les modèles utilisés ont été présentés au troisième chapitre (§3.5). Nous ciblons donc les aspects utilisation du logiciel et résultats de simulation.

4.3.1 Système d'un véhicule à deux roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule

Afin d'introduire le système à simuler sous ELEVES, nous reprenons les modèles RDHC développés au paragraphe (§3.5.1) au troisième chapitre. Le système d'un véhicule électrique à deux roues motrices simulé sous ELEVES est montré sur la figure (FIG. 4.15).

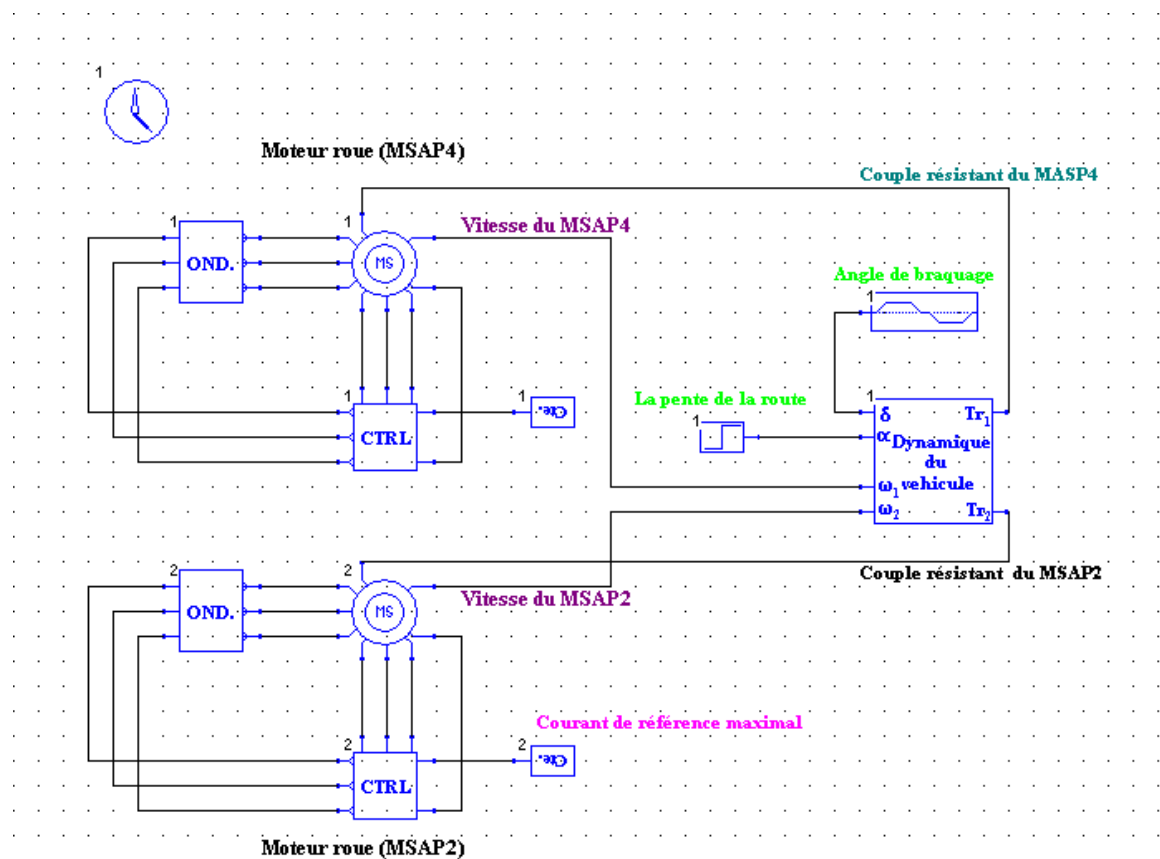


FIG. 4.15 – Schéma de simulation ELEVES du VE à 2 moteurs

Il est constitué d'un bloc représentant la dynamique du véhicule, deux MSAP (MSAP4 et MSAP2), la consigne de l'angle de braquage et la consigne de la pente que

fait la route par rapport au sol. Les blocs (Cte), (CTRL) et (OND.) représentent respectivement le courant de référence imposé aux moteurs, un comparateur des courants et l'onduleur. Le système et les résultats de simulation présentés dans ce paragraphe ont été publiés dans [Nouh *et al.*, 2006b].

On suppose que la voiture monte une route inclinée d'un angle de (12°) par rapport au sol. Le véhicule démarre de l'arrêt jusqu'à la stabilisation de sa vitesse. En ce point de fonctionnement, deux virages, l'un vers la gauche et l'autre vers la droite sont imposés au véhicule par la consigne d'angle de braquage. La figure (FIG. 4.16) présente l'angle de braquage dont la valeur maximale est de (7°). Le véhicule tourne vers la gauche à partir de l'instant ($temps = 9\text{ s}$) et quand la consigne de braquage atteint sa valeur maximale à l'instant ($temps = 12\text{ s}$), elle y est maintenue pendant 5 seconds puis elle est ramenée à zéro à l'instant ($temps = 20\text{ s}$). Ensuite, la voiture est braquée vers la droite à partir de l'instant ($temps = 24\text{ s}$) pendant 11 seconds puis elle est remise de nouveau à sa trajectoire à l'instant ($temps = 35\text{ s}$).

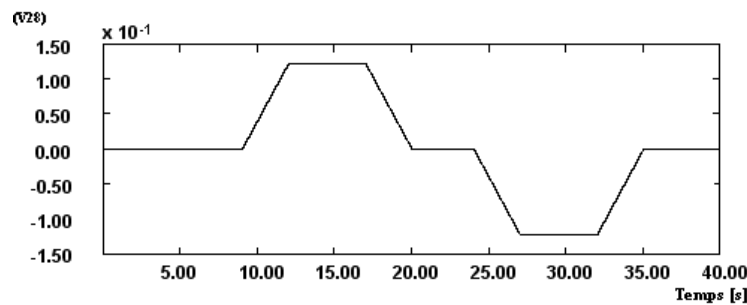


FIG. 4.16 – La consigne de l'angle de braquage

Les deux moteurs (MSAP2 et MSAP4) sont contrôlés par un courant sinusoïdal de référence I_{ref} d'amplitude de (100 A) à travers un convertisseur alimenté par un bus continu (la batterie) de valeur $E_b = 540$ volt. Les paramètres des moteurs et du véhicule sont respectivement donnés dans les tableaux (TAB. 4.1) et (TAB. 4.2) [Chami, 2005] [Pusca, 2002] [Shino *et al.*, 2000].

Il est montré sur la figure (FIG. 4.17) la vitesse longitudinale du véhicule v_x . On constate une dissipation d'énergie, due au glissement latéral. Cette dissipation est traduite par une légère diminution de la vitesse quand l'automobile prend les virages.

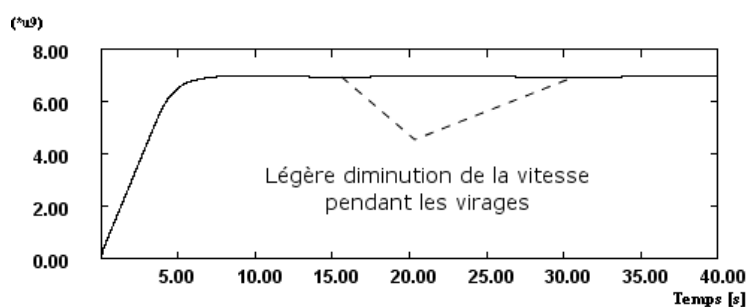
Quand à la vitesse latérale v_y et celle de lacet r , une constatation immédiate s'impose, leur existence est conditionnée par la consigne de l'angle de braquage comme le montre les figures (FIG. 4.18) et (FIG. 4.19). On peut remarquer que ces deux vitesses se manifestent uniquement pendant les virages et elles s'annulent quand la voiture trace

TAB. 4.1 – Paramètres des moteurs

Paramètre	Valeur
L_s (inductance cyclique statorique)	10.4 mH
R_s (résistance statorique)	0.15 Ω
K (constante fem)	5.318 V/rad.s ⁻¹
J_m (moment d'inertie du moteur)	0.15 kg.m ²
p (nombre de paires de pôles)	16

TAB. 4.2 – Paramètres du véhicule

Paramètre	Valeur
M_v (masse du véhicule)	1562 kg
J_v (moment d'inertie du véhicule)	2630 kg.m ²
l_f (longueur entre le train avant et le centre de gravité)	1.104 m
l_r (longueur entre le train arrière et le centre de gravité)	1.421 m
L (longueur entre les deux trains avant et arrière)	$L = (l_f + l_r) m$
h_{cg} (hauteur du centre de gravité)	0.5 m
d (moitié du longueur du train arrière)	0.75 m
S_f (section frontale véhicule)	2.04 m ²
ρ (densité volumique de l'air)	1.2 kg.m ⁻³
C_{px} (coefficient de pénétration dans l'air)	0.25
C_{rr} (coefficient de résistance au roulement)	0.01
C_f (rigidités au glissement latéral des pneus avant)	37407 N/rad
C_r (rigidités au glissement latéral des pneus arrière)	51918 N/rad
J_w (moment d'inertie de la roue)	1.284 kg.m ²
R_w (rayon de la roue)	0.294 m
d_z (longueur entre le centre de la roue et le point où sa charge agit)	0.0037 m

FIG. 4.17 – La vitesse longitudinale du véhicule v_x

un chemin droit. En effet, ces deux vitesses sont les indicateurs qui nous informent s'il y a la moindre sollicitation latérale. Il est intéressant de signaler que la vitesse latérale et angulaire du véhicule gardent la même allure que celle de l'angle de braquage, seule

l'amplitude varie.

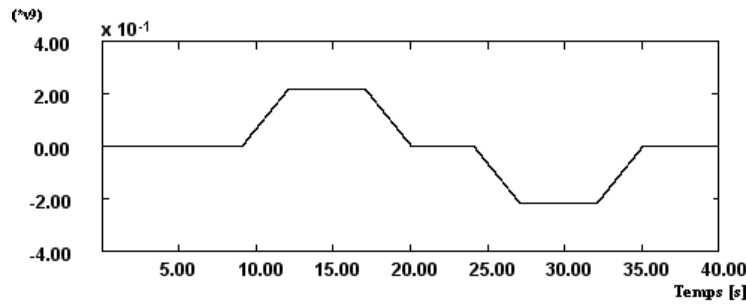


FIG. 4.18 – La vitesse latérale du véhicule v_y

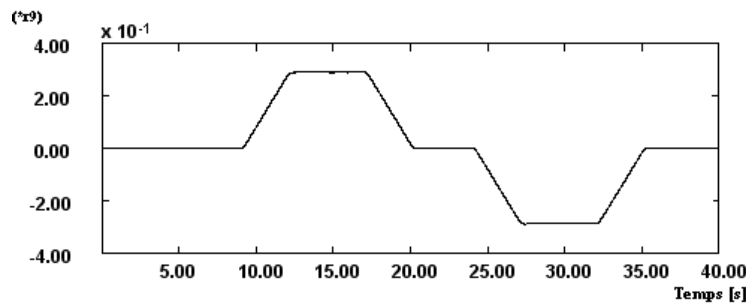


FIG. 4.19 – La vitesse angulaire du véhicule r

Le trajet tracé par le véhicule est donné sur la figure (FIG. 4.20). Il a été obtenu en intégrant les variables d'états dans le repère (X, Y) . Mais avant cela, une transformation du repère véhicule (x, y) vers le repère inertiel (X, Y) était nécessaire car les grandeurs sont mesurées dans le repère associé au véhicule.

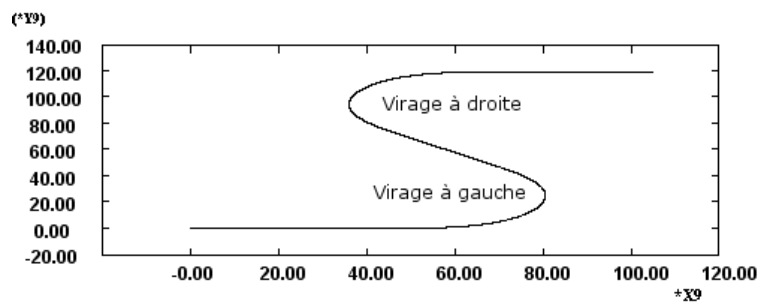


FIG. 4.20 – Trajectoire tracée par le véhicule

On voit bien que la voiture démarre de l'arrêt et poursuit son chemin droit jusqu'au moment où la consigne de braquage commence à naître en imposant d'abord un virage

vers la gauche. Il se manifeste par une variation des coordonnées de position dans le plan (X, Y) . Ensuite, un braquage vers la droite oblige l'automobile de changer de direction, puis il continue son parcours jusqu'à la fin du temps de simulation.

Les forces de tractions générées par les deux moteurs (MSAP2 et MSAP4) sont montrées sur la figure (FIG. 4.21). Nous signalons en premier lieu, de fortes forces de traction fournies par les moteurs pour faire mouvoir l'automobile au démarrage. Cela nous semble logique car ces forces doivent vaincre les forces de résistance à l'avancement de l'automobile.

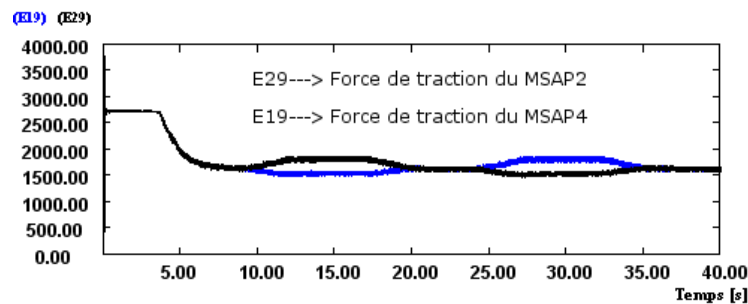


FIG. 4.21 – Forces de traction générées par les moteurs

Nous pouvons également signaler en deuxième lieu, une divergence entre les deux forces de traction pendant le passage dans les virages. En effet, le moteur, qui se trouve à l'intérieur de la courbure de virage, produit une force de traction inférieure à celle du moteur qui se trouve à l'extérieur de la courbure.

Il est donné sur la figure (FIG. 4.22) les vitesses de rotation des moteurs. On remarque qu'ils ont les mêmes variations de vitesses de l'arrêt jusqu'aux vitesses de rotations stabilisées, il en est de même tant que l'automobile roule sur une route rectiligne.

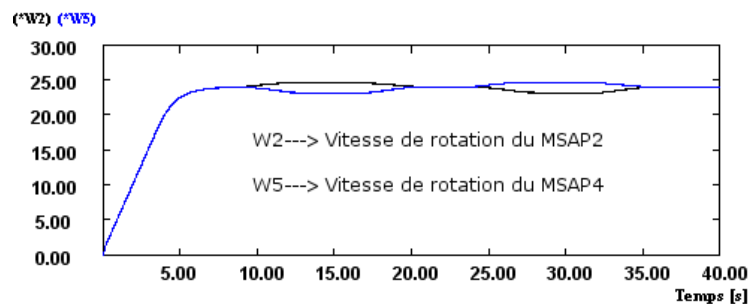


FIG. 4.22 – Vitesses de rotation de moteurs

Une fois le véhicule traverse les virages, une différence de vitesses entre les deux moteurs commence à apparaître. Ainsi, dans le premier braquage le moteur (MSAP2)

qui se trouve à l'extérieur de la courbure de virage, tourne à vitesse supérieure à celle du MSAP4. Inversement, on peut constater que le moteur MSAP4 tourne à vitesse supérieure à celle du MSAP2 dans le deuxième braquage.

La figure (FIG. 4.23) illustre la variation des couples électromagnétiques des moteurs. Nous soulignons d'abord, un couple moteur élevé pendant le démarrage. Les moteurs maintiennent ces couples électromagnétiques élevés de l'arrêt jusqu'à la stabilisation de leurs vitesses. A ce moment là, les couples moteurs commencent à diminuer puis ils se stabilisent à leur tour. Nous soulignons aussi, une divergence entre les deux couples moteurs qui prend naissance à chaque passage dans un virage. Le couple électromagnétique du MSAP2 est supérieur à celui du MSAP4 au premier virage et inversement au deuxième virage.

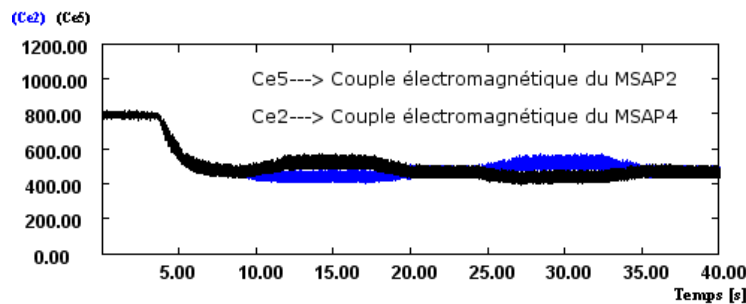


FIG. 4.23 – Couples électromagnétiques de moteurs

Les deux figures (FIG. 4.24) et (FIG. 4.25) illustrent respectivement la tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2 et ses courants.

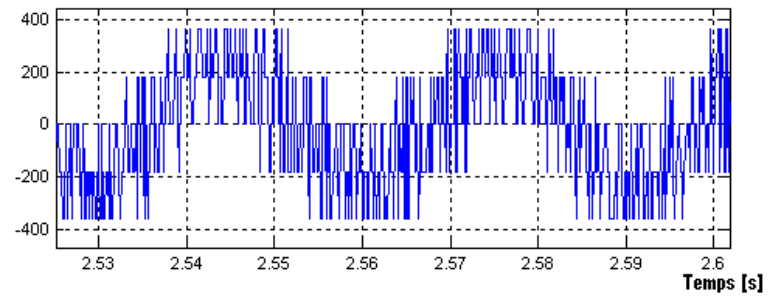
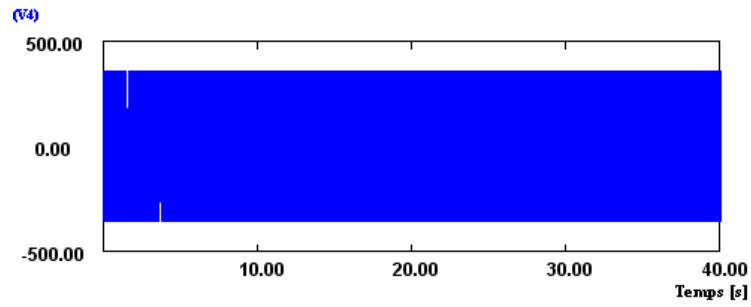


FIG. 4.24 – Tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2

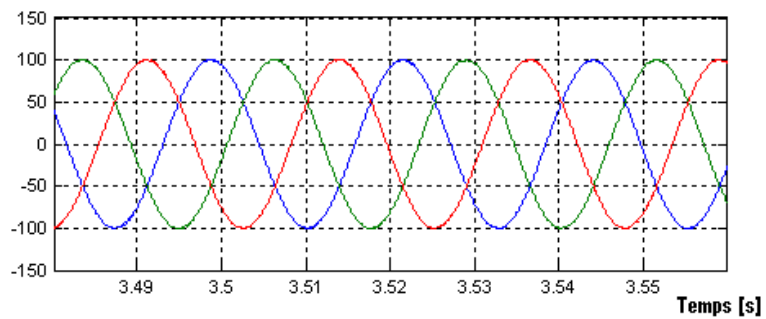
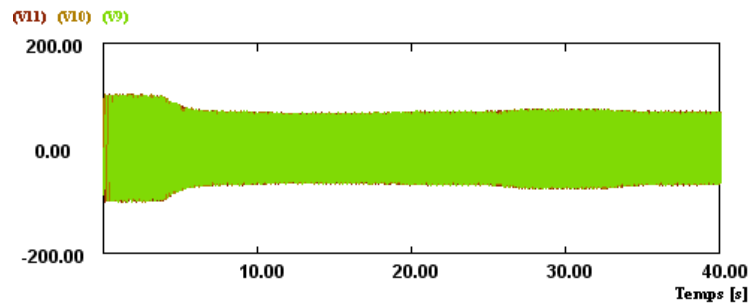


FIG. 4.25 – Courants du MSAP2

4.3.2 Système d'un véhicule à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule

Dans cette section, nous reprenons les modèles RDHC décrits au paragraphe (3.5.2). Cela nous permet de construire notre système sous ELEVES. Le système est également modélisé à partir des modèles mathématiques décrivant son comportement et simuler à l'aide de Matlab/Simulink. La modélisation et les résultats de simulation font l'objet de deux communications, une publiée à la conférence EVS22 [Nouh *et al.*, 2006a] et l'autre publiée au journal WEVA [Nouh *et al.*, 2007c].

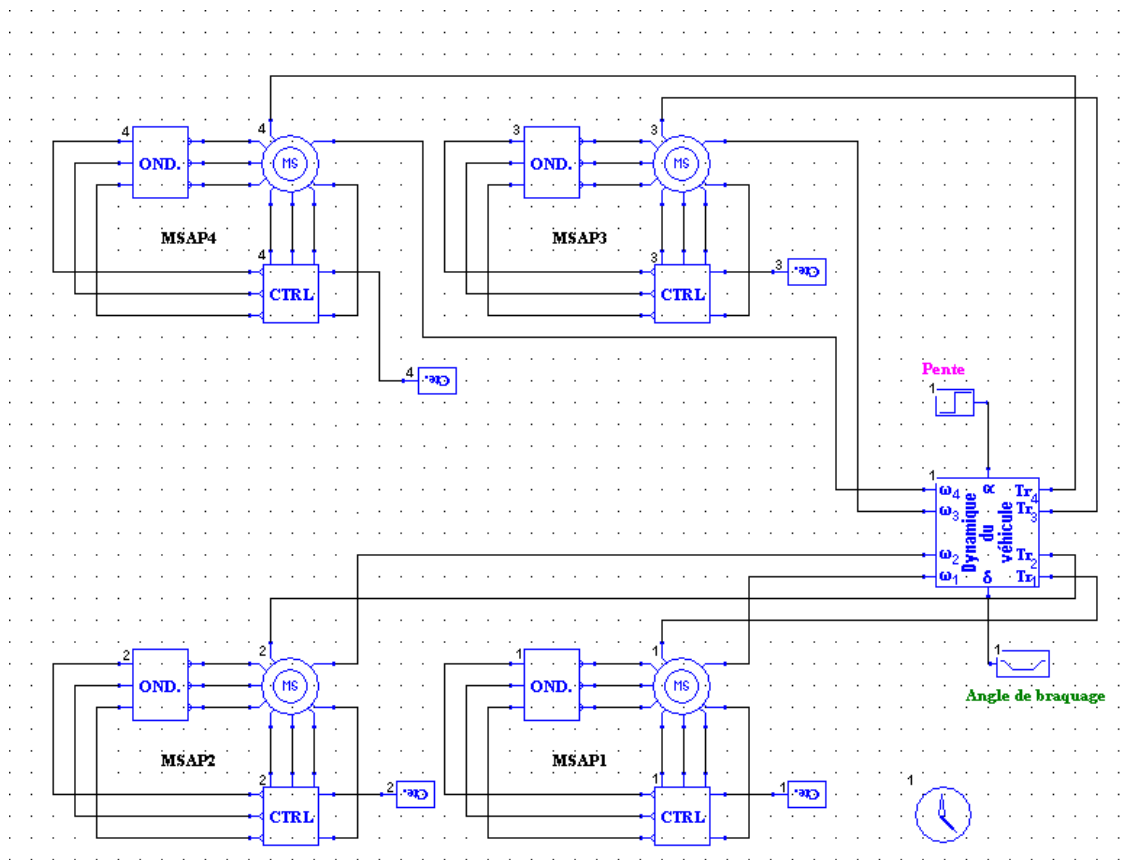


FIG. 4.26 – Système simulé sous ELEVES

Il est illustré sur la figure (FIG. 4.26) l'ensemble d'un système du véhicule tout électrique à quatre roues motrices (MSAP1, MSAP2, MSAP3 MSAP4 : mode de traction intégrale). Ces derniers sont alimentés par le bus continu (tension de la batterie E_b) et contrôlés par des courants de référence à travers des onduleurs. Le bloc *Dynamique du véhicule* possède comme entrées, l'angle de braquage δ , la consigne de la pente α_p et les vitesses de rotation ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$ et ω_4) qui viennent de moteurs. Il produit les couples

résistants (Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 et Γ_4) que doit vaincre le système de motorisation.

Nous avons gardé les paramètres des moteurs ainsi que ceux du véhicule donnés aux tableaux (TAB. 4.1, TAB. 4.2). Nous avons également gradé la consigne de la pente du système précédant ($\alpha_p = 12^\circ$). Nous supposons que le véhicule démarre de l'arrêt avec une vitesse variante jusqu'à la stabilisation de sa vitesse, puis il continue sa course jusqu'à la fin du temps de simulation. A dix secondes, le conducteur applique un braquage à gauche. A l'instant (13 s), l'angle de braquage atteint une valeur de (7°) que nous fixons. Ensuite, le conducteur maintient cette valeur jusqu'à la fin du temps de simulation. La consigne de l'angle de braquage est montrée sur la figure (FIG. 4.27).

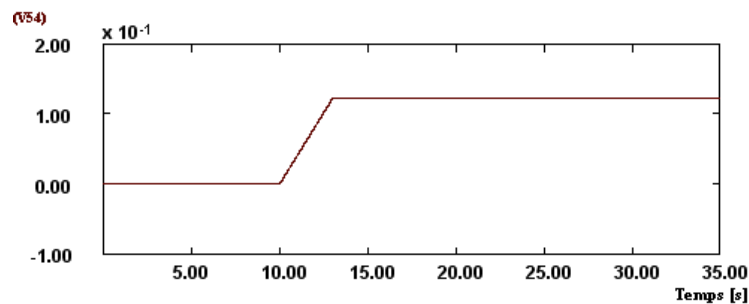


FIG. 4.27 – Angle de braquage δ

La figure (FIG. 4.28) montre la variation de la vitesse longitudinale du véhicule. Nous pouvons voir que, la vitesse est variante au démarrage puis elle se stabilise. On voit bien une légère diminution au moment où le conducteur applique un braquage vers la gauche.

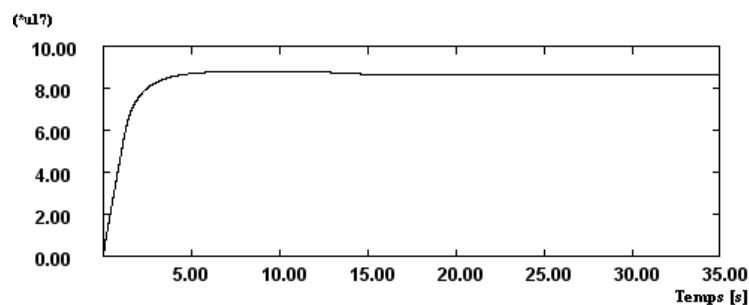


FIG. 4.28 – Vitesse longitudinale v_x du véhicule

La vitesse latérale et la vitesse angulaire du véhicule sont données sur la figure (FIG. 4.29). Elles prennent l'allure de l'angle de braquage mais avec des amplitudes différentes. Elles nous informent sur la moindre sollicitation latérale. Tant que l'automobile roule sur une route droite, elles n'existent plus.

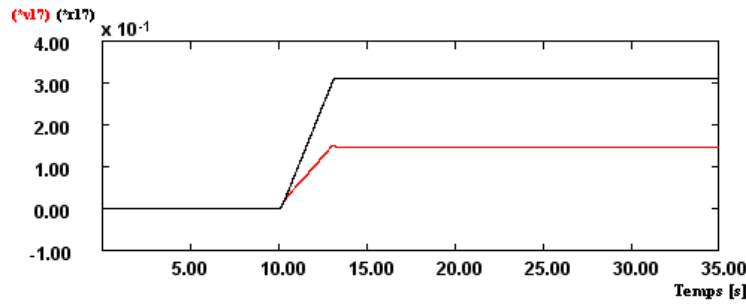


FIG. 4.29 – Vitesse latérale v_x et angulaire r du véhicule

La figure (FIG. 4.30) nous montre le trajet parcouru par l'automobile. Nous remarquons que le véhicule trace un chemin tout droit tout au long l'axe X (pas de variation latérale selon l'axe Y). Dès que l'on applique le braquage, un déplacement latéral apparaît indiquant que la voiture traverse un virage. Nous constatons également que l'automobile tourne en cercle car le conducteur maintient la consigne de braquage fixe jusqu'à la fin du temps de simulation.

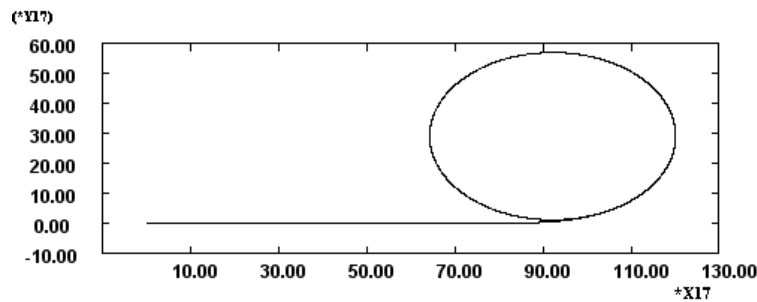


FIG. 4.30 – Trajectoire tracée par l'automobile

Nous illustrons sur la figure (FIG. 4.31) les forces de traction générées par les moteurs. Nous pouvons signaler que les moteurs (MSAP1) et (MSAP2) développent des forces de traction supérieures à celles générées par les moteurs (MSAP3, MSAP4) pendant le passage en virage. Cela s'explique par le fait qu'ils se trouvent à l'extérieur de la courbure du virage où ils développent plus de forces pour maintenir l'équilibre du véhicule dans le virage. Il en est de même en ce qui concerne les vitesses de rotation des moteurs (FIG. 4.32) et les couples résistants imposés sur les moteurs (FIG. 4.33). La variation de tension de la phase (a) est donnée sur la figure (FIG. 4.34) et celles des courants du MSAP2 sont illustrées sur la figure (FIG. 4.35).

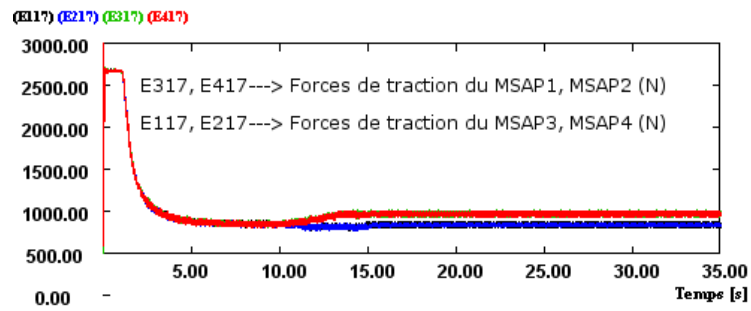


FIG. 4.31 – Forces de traction des moteurs

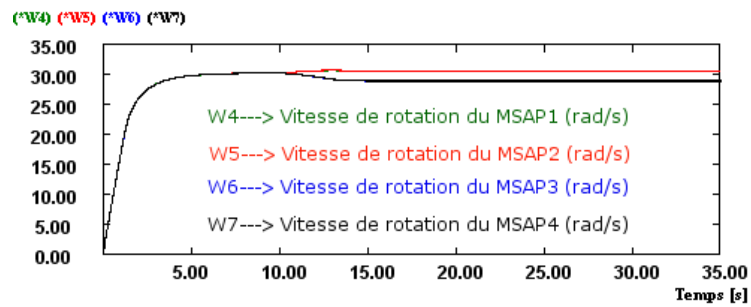


FIG. 4.32 – Vitesses de rotation de moteurs

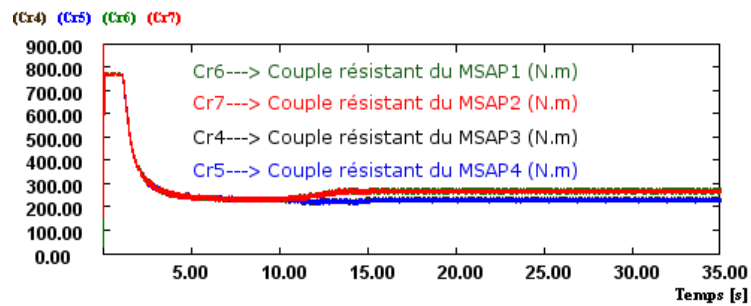


FIG. 4.33 – Couples résistants de moteurs

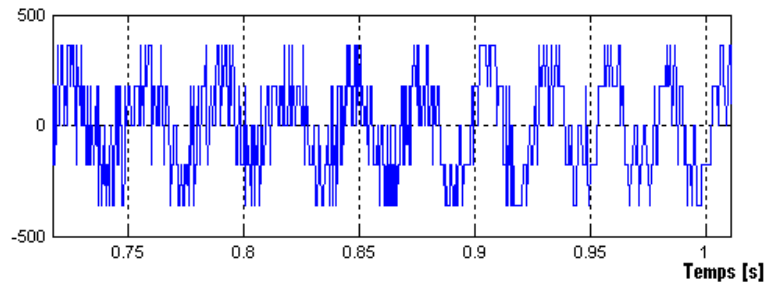
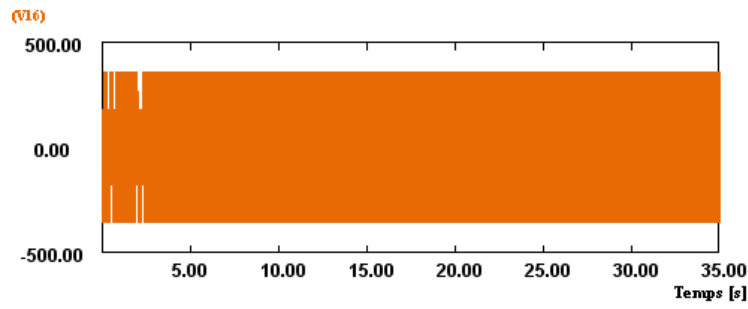


FIG. 4.34 – Tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2

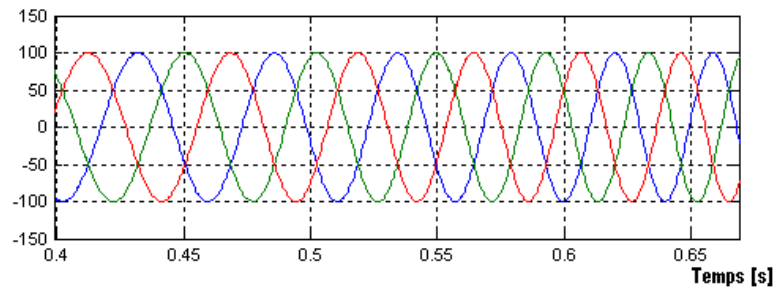
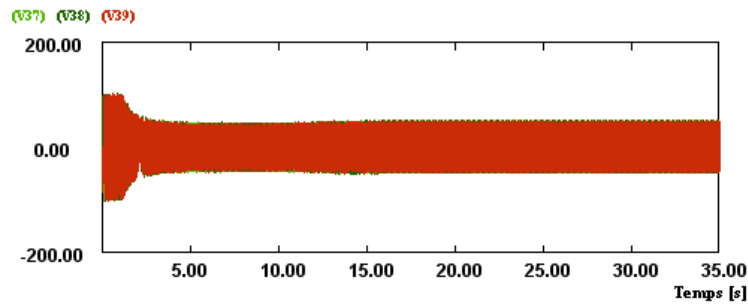


FIG. 4.35 – Courants du MSAP2

4.3.3 Système d'un véhicule à deux roues motrices avec la commande de la vitesse du véhicule

Dans cette section, nous présentons l'implémentation du modèle RDHC, décrit au paragraphe (§3.5.3), sous notre simulateur ELEVES. Les modèles mathématiques décrivant ce système ainsi que la bibliothèque de la REM et sa SMC sont mis en contribution pour élaborer la commande de la vitesse du véhicule.

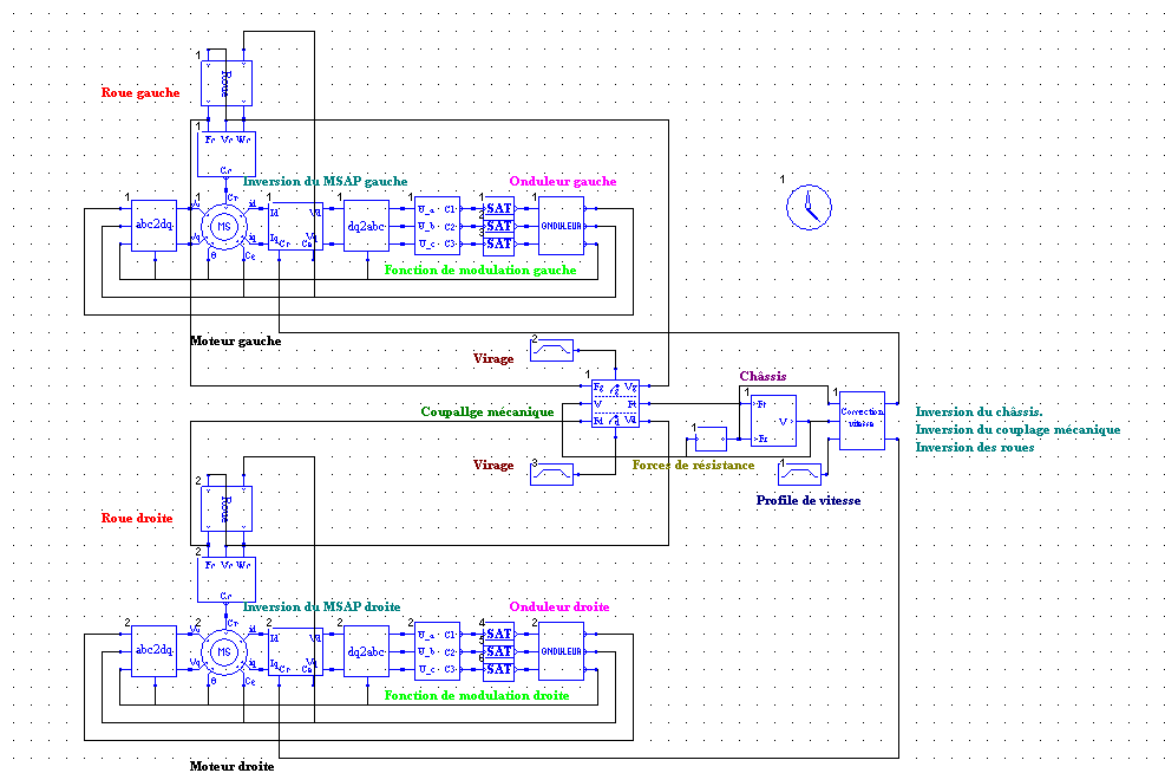


FIG. 4.36 – Système simulé sous ELEVES (2-moteurs avec commande)

Les travaux présentés dans cette section ont été publiés aux conférences EVER [Nouh *et al.*, 2007a] et IEEE VPPC [Nouh *et al.*, 2007b]. La figure (FIG. 4.36) donne le schéma de simulation du système sous ELEVES. Le système est constitué de plusieurs blocs représentant le concept de la REM et sa SMC. Les deux moteurs sont présentés par les blocs nommés (abc2dq), (MS), (dq2abc) dans lesquels on présente la conception de la REM par des modèles RDHC. Le bloc situé entre le bloc (Roue) et le bloc (MS), est destiné à calculer le couple résistant pour le moteur concerné. Conformément au principe de la REM, nous avons les blocs (Roue), (Couplage mécanique) et le (Châssis). Le bloc situé entre (MS) et (dq2abc), a pour but de réaliser la SMC du moteur concerné. Les inversions, de la roue, du couplage mécanique et le châssis sont implémentées dans le

bloc nommé (Correction vitesse). Enfin, les blocs (Virage), (Profil de vitesse), jouent respectivement le rôle de différencier les vitesses des roues pendant le passage dans un virage, et de donner la consigne de la vitesse de référence désirée par le conducteur.

Nous considérons que le conducteur impose une référence de vitesse trapézoïdale que l'automobile doit suivre. Le profil de cette vitesse de référence est donné sur la figure (FIG. 4.37). Il est constitué de trois zones, une accélération (une rampe), un palier à vitesse constante puis un freinage (décélération). Dans la première zone, le véhicule met (5 s) pour démarrer de la vitesse nulle jusqu'à une vitesse constante fixée à (6 m/s). Dans la deuxième zone, il maintient cette vitesse pendant (15 s), puis il décélère pendant (5 s) jusqu'à l'arrêt dans la troisième zone.

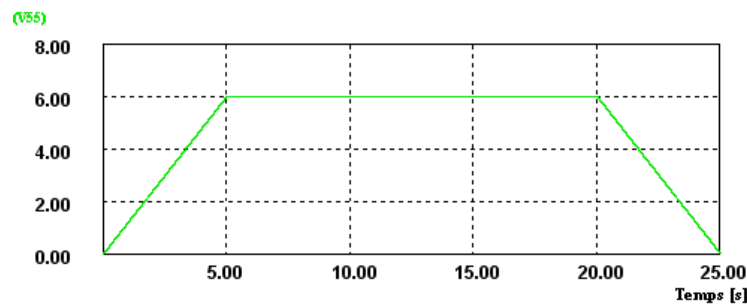


FIG. 4.37 – Vitesse de référence

Nous considérons également que le véhicule effectue un virage pendant (2.5 s) à l'instant (10 s). Pour ce faire, nous différencions les vitesses des roues pendant le virage en imposant une consigne de virage pour chaque roue (FIG. 4.38).

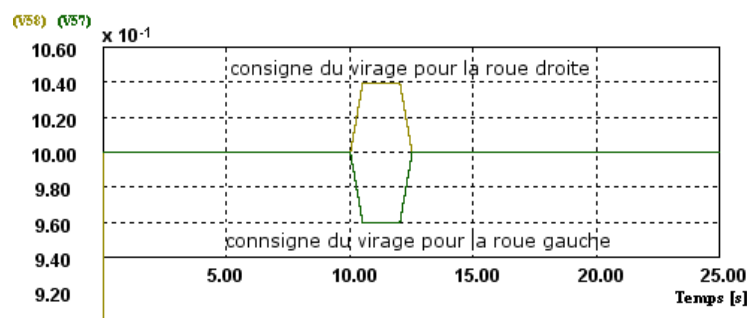
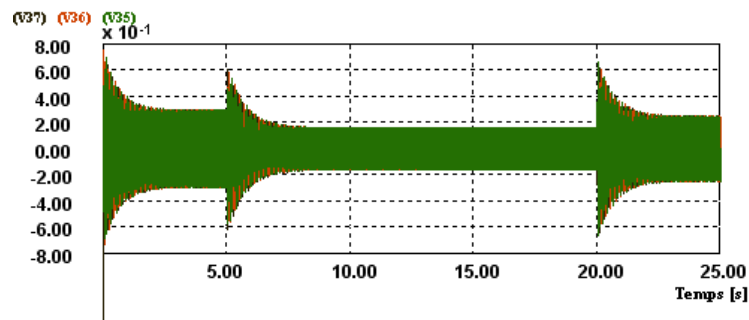
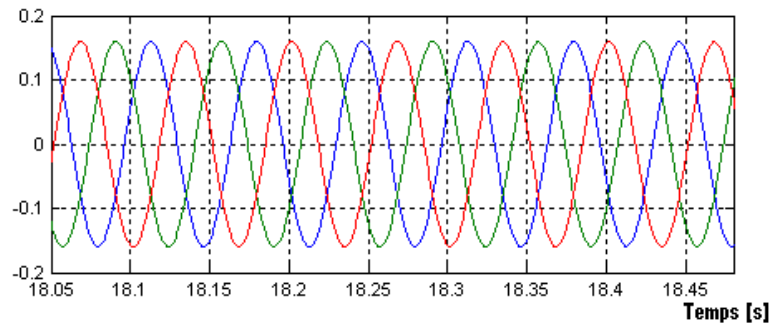


FIG. 4.38 – Consignes du virage

Sur la figure (FIG. 4.39), nous illustrons les fonctions de modulation et un zoom pour le MSAP de gauche. Nous remarquons qu'elles sont inférieures à 1, ce qui indique une bonne utilisation de la tension de bus continu.



(a) Fonction de modulation

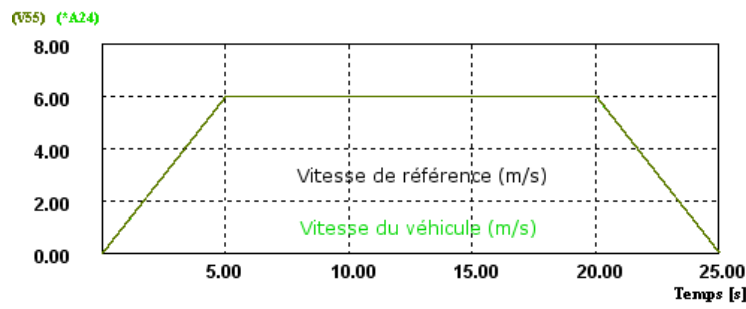


(b) Zoom

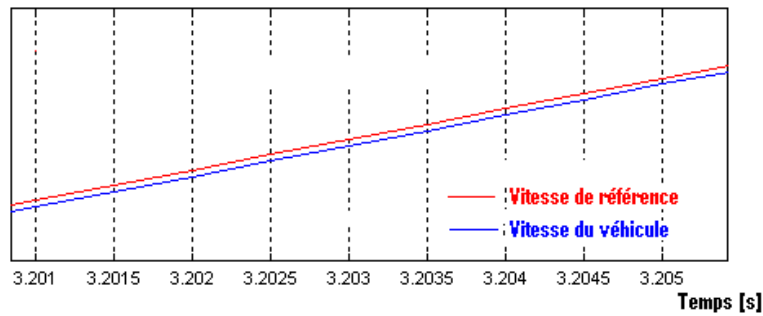
FIG. 4.39 – Fonction de modulation de l'onduleur gauche

Nous pouvons voir sur la figure (FIG. 4.40) que la vitesse du véhicule suit la vitesse de référence, ce qui nous permet de dire que la REM et sa SMC sont bonnes pour représenter le véhicule et le contrôler. Lors du virage, les vitesses de rotation des deux roues sont différentes tout en n'affectant pas la vitesse linéaire du véhicule. Cela est bien claire sur la figure (FIG. 4.41), qu'il existe une divergence entre les deux vitesses pendant le passage dans le virage.

Nous illustrons, respectivement pour le moteur gauche, sur les figures (FIG. 4.42), (FIG. 4.43), et (FIG. 4.44), le couple électromagnétique, les tensions dans le repère dq et les tensions statoriques. Nous constatons que le couple électromagnétique est élevé durant les zones transitoires (démarrage et freinage). A vitesse constante, son amplitude diminue puis elle se stabilise. Nous remarquons que la tension (v_d), elle a une variation au démarrage inverse de celle constatée au freinage. A vitesse constante, elle baisse d'amplitude au fil du temps puis, elle se stabilise. Quant à la tension (v_q), a la même oscillation dans la zone du démarrage et la zone du freinage. Dans la zone où la vitesse est constante, les oscillations diminuent jusqu'à la stabilisation à l'instant (10 s). Finalement, Les amplitudes des tensions statoriques sont importantes durant le démarrage ainsi que le freinage. En revanche, elles sont diminuées dans la zone où l'automobile roule à vitesse constante.



(a) V_{ref}, V_{veh}



(b) Zoom

FIG. 4.40 – La vitesse de référence et celle du véhicule

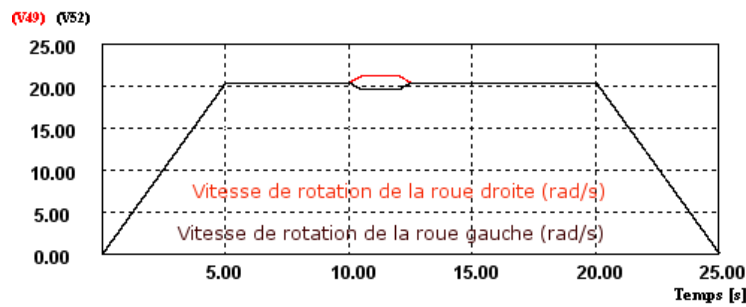


FIG. 4.41 – Vitesses angulaires des roues

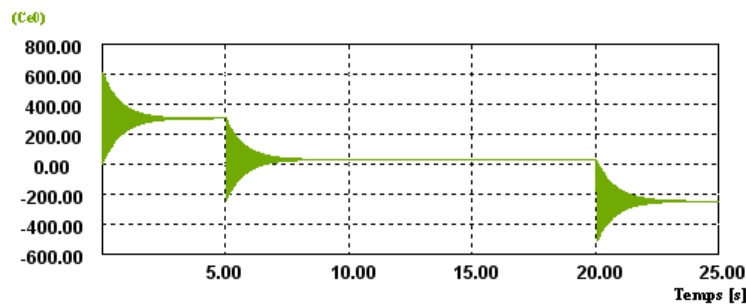
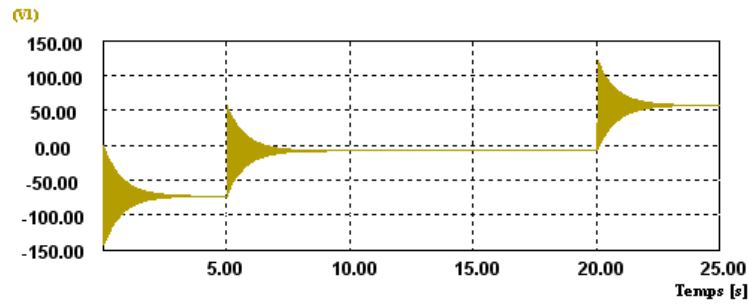
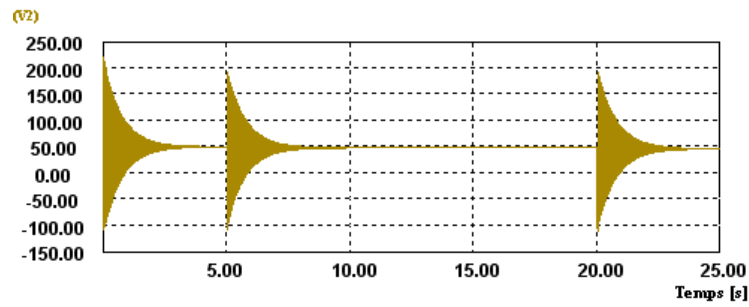


FIG. 4.42 – Couple électromagnétique du MSAP gauche

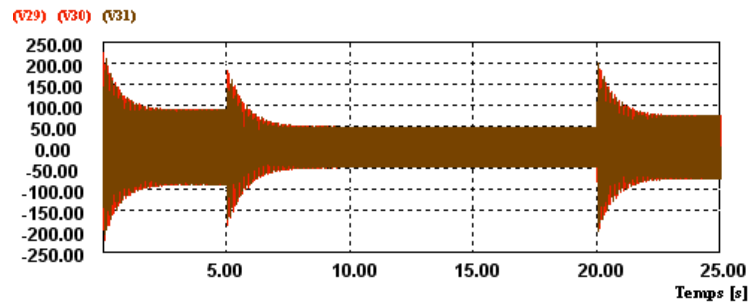


(a) Tension v_d

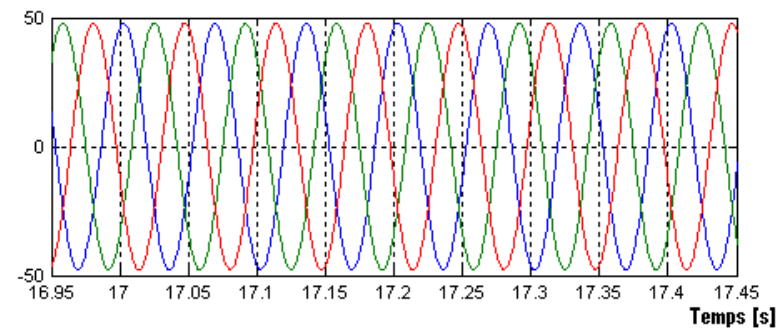


(b) Tension v_q

FIG. 4.43 – Tensions du MSAP gauche dans le repère dq



(a) Tension U_{abc}



(b) Zoom

FIG. 4.44 – Tensions statoriques (U_a, U_b, U_c) du MSAP gauche

4.4 Validation avec Matlab/Simulink

Dans le but de valider les résultats obtenus sous ELEVES, nous nous sommes proposés de simuler, les mêmes systèmes précédemment étudiés, à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

4.4.1 Système d'un véhicule à deux roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule

Nous partons des modèles mathématiques décrivant notre système. Comme dans ELEVES, le système est divisé en plusieurs blocs tel qu'il est montré sur la figure (FIG. 4.45).

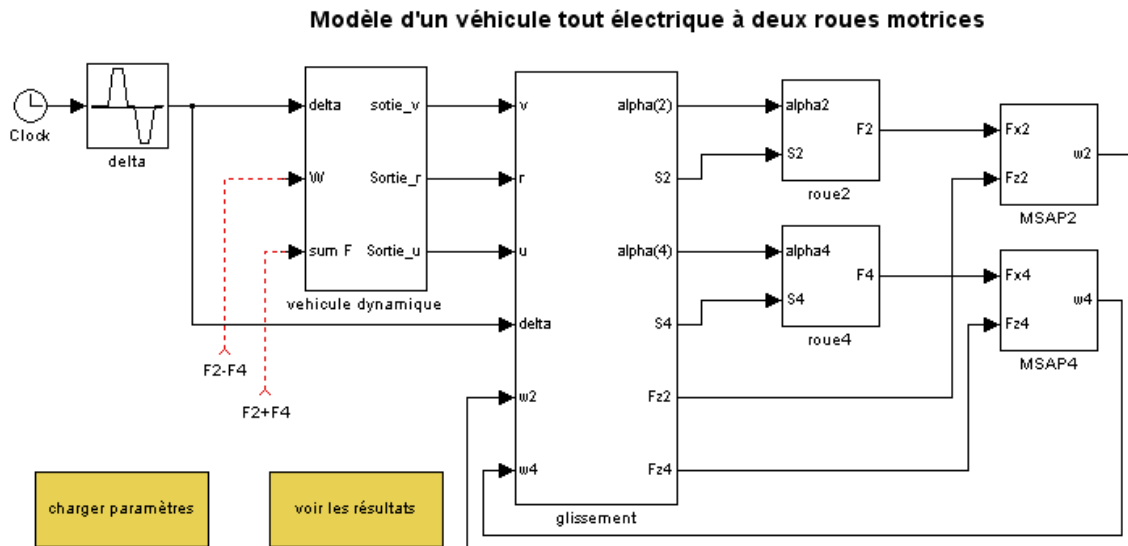


FIG. 4.45 – Système simulé sous Matlab/Simulink (2-Moteurs)

Le premier bloc nommé (*delta*) est chargé de générer la consigne de braquage. Le deuxième bloc (*vehicule dynamique*), calcule les vitesses longitudinale, latérale et angulaire de l'automobile à partir d'une sommation des forces de traction générées par les moteurs, d'une soustraction de ces dernières et de l'angle de braquage. Dans le bloc nommé (*glissement*), nous estimons les glissements longitudinaux (s_2, s_4) et nous calculons les angles de glissement latéraux (α_2, α_4) et les charges sur les roues (N_2, N_4). Ce bloc possède comme entrées les trois vitesses du véhicule (v_x, v_y, r), l'angle de braquage (δ) et les vitesses de rotations des moteurs (ω_2, ω_4). Nous calculons les forces de traction dans les blocs (*roue2*) (*roue4*) en déterminant d'abord le coefficient de glissement longitudinal à partir

des entrées aux blocs. Finalement, les deux blocs présentant les deux moteurs (MSAP2) (MSAP4) utilisent les entrées pour estimer les couples résistants afin de produire leur vitesses de rotations.

Nous montrons respectivement sur les figures (FIG. 4.46) et (FIG. 4.47) les modèles Simulink du moteur (MSAP2) et son onduleur.

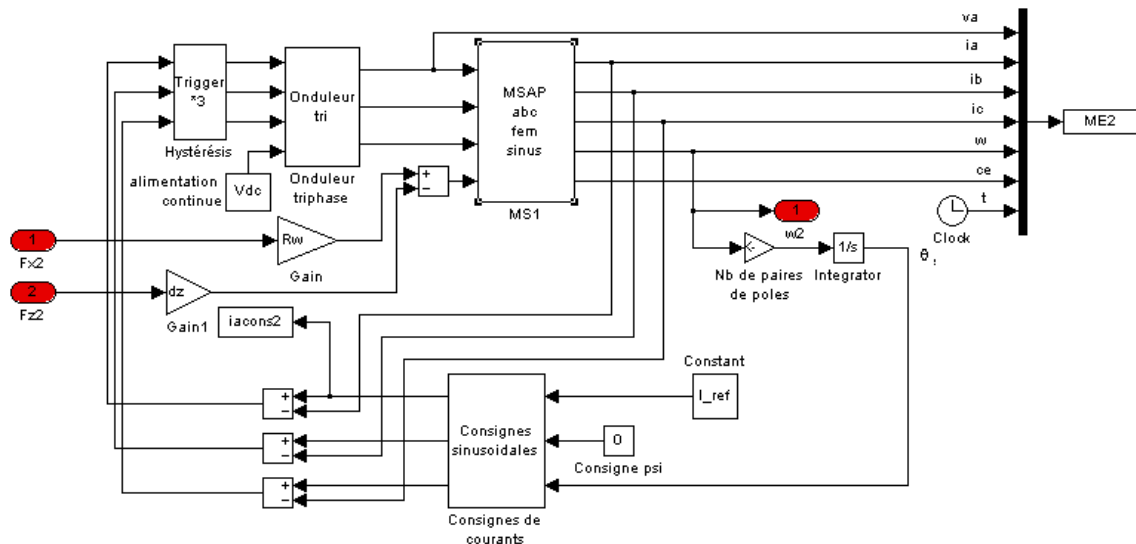


FIG. 4.46 – Modèle Simulink du MSAP2

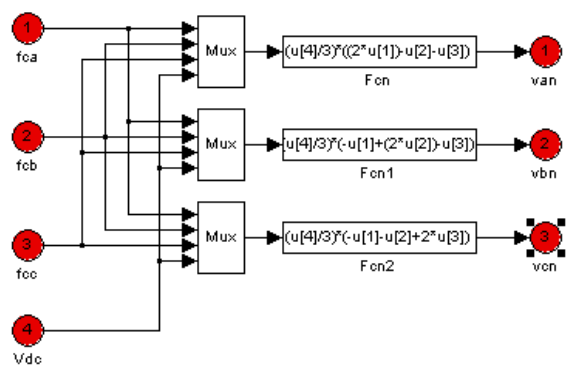


FIG. 4.47 – Modèle Simulink de l'onduleur

Nous avons simulé le système, avec les mêmes conditions que celles utilisées dans le cas de notre outil ELEVES. Les résultats obtenus sont semblables à ceux que l'on a trouvé avec ELEVES. Sur la figure (FIG. 4.48), il est donné la variation de la vitesse longitudinale. Même constatation, une légère diminution en vitesse pendant le passage dans les virages.

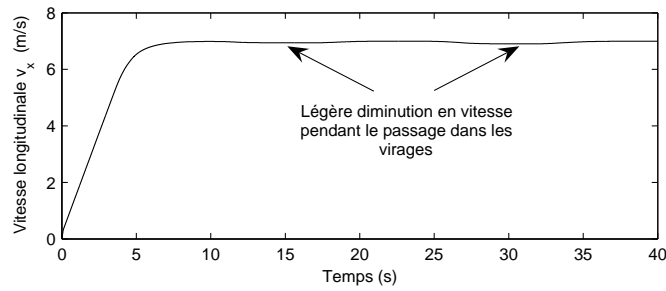


FIG. 4.48 – Vitesse longitudinale v_x

La vitesse latérale et la vitesse angulaire de l'automobile, illustrées sur les figures (FIG. 4.49) et (FIG. 4.50), ne changent guère d'allure que celles obtenues à l'aide d'ELEVES. Leur existence se manifeste uniquement pendant les virages avec des amplitudes différentes.

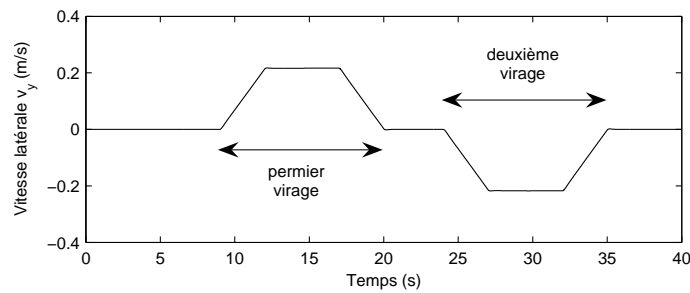


FIG. 4.49 – Vitesse latérale v_y

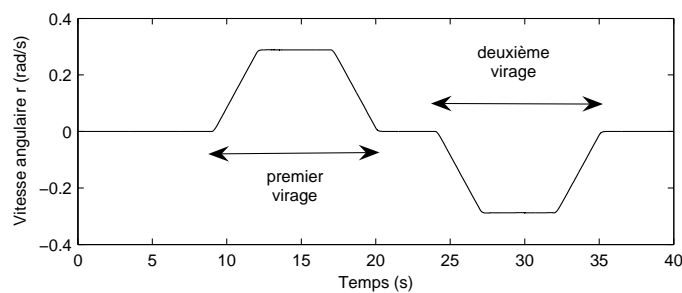


FIG. 4.50 – Vitesse angulaire du véhicule r

La distance parcourue par la voiture est montrée sur la figure (FIG. 4.51). Là aussi, la trajectoire tracée par le véhicule sous Matlab/Simulink est identique à celle obtenue sous ELEVES. Il en est de même pour les forces de traction générées par les deux moteurs (FIG. 4.52).

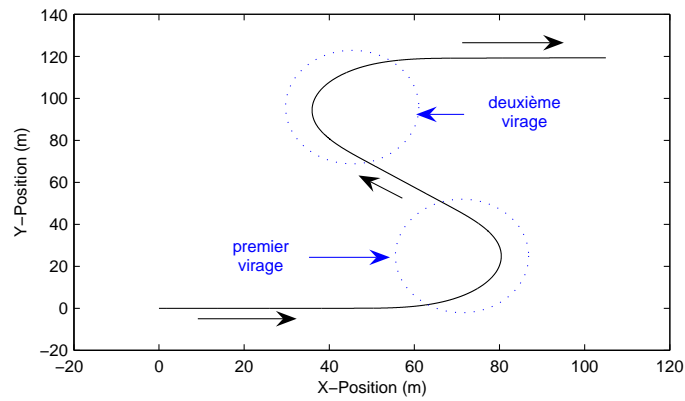


FIG. 4.51 – Distance parcourue par le véhicule

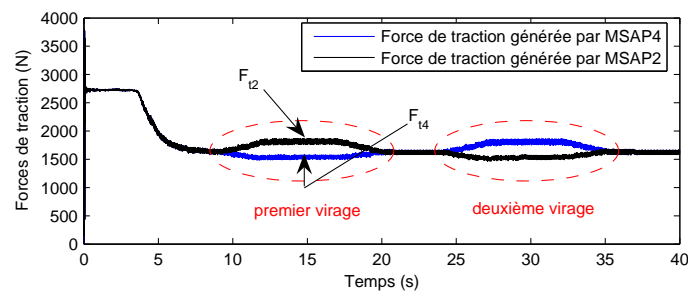


FIG. 4.52 – Forces de traction générées par les moteurs

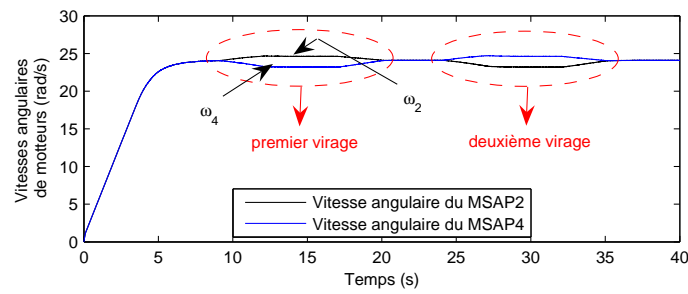


FIG. 4.53 – Vitesses angulaires de moteurs

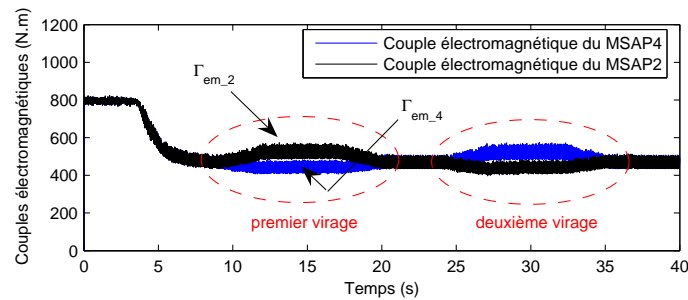
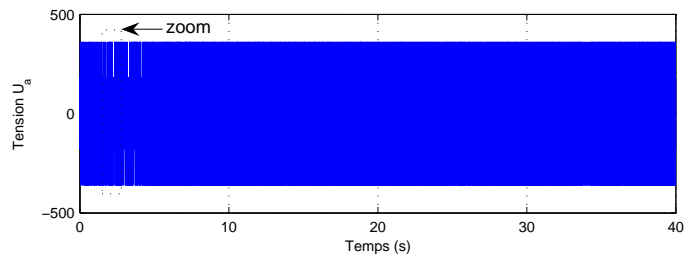
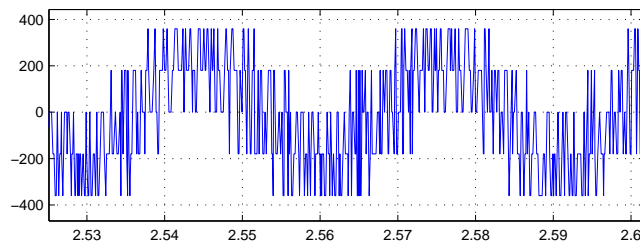


FIG. 4.54 – Couples électromagnétiques de moteurs

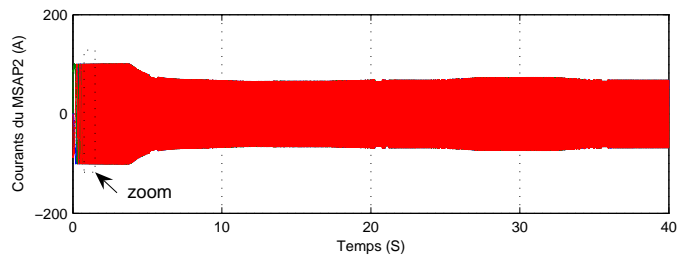


(a) Tension U_a

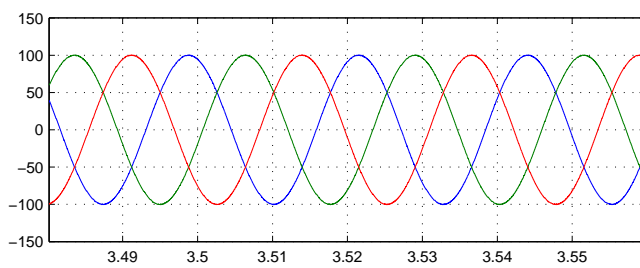


(b) Zoom

FIG. 4.55 – Tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2



(a) Courants i_a, i_b, i_c



(b) Zoom

FIG. 4.56 – Courants du MSAP2

Les grandeurs électromécaniques, elles aussi gardent les mêmes allures. On voit bien la ressemblance des vitesses de rotation des moteurs (FIG. 4.53) et de couples électromagnétiques (FIG. 4.54) obtenus sous Matlab/Simulink avec ceux obtenus sous ELEVES. Il en est de même pour la tension de la phase (a) (FIG. 4.55) et pour les courants du MSAP2 (FIG. 4.56).

4.4.2 Système d'un véhicule à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule

Le système est composé de plusieurs blocs comme le montre la figure (FIG. 4.57). Nous communiquons au bloc nommé (*vehicule dynamique*) l'angle de braquage δ , la sommation des forces de traction ($F_{t1}+F_{t2}+F_{t3}+F_{t4}$) et une soustraction des forces de traction entre celles générées par les deux moteurs ($F_{t1}+F_{t2}$), qui se trouvent à l'extérieur de la courbure de virage, et celles générées par les deux moteurs ($F_{t3}+F_{t4}$) qui se trouvent à l'intérieur par rapport à la courbure de virage. Nous obtenons comme sorties de ce bloc les trois vitesses et qui nous informent sur les déplacements de notre voiture tout au long de l'axe longitudinal, latéral et autour de l'axe Z. Ces trois vitesses (v_x, v_y, r) seront

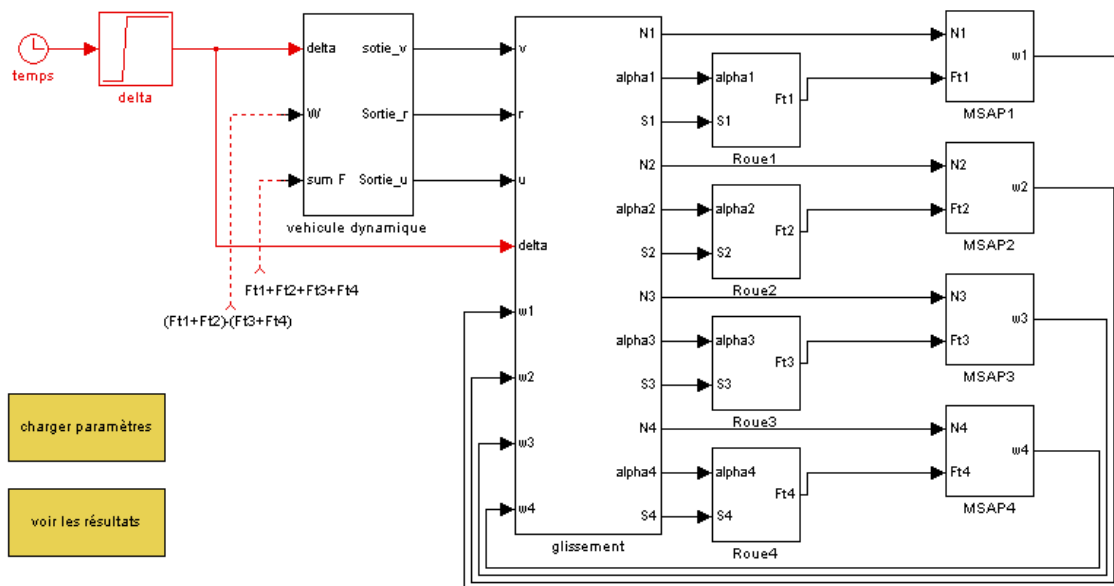


FIG. 4.57 – Système simulé sous Matlab/Simulink

communiquées au bloc suivant appelé (*glissement*). Ce dernier estime les glissements longitudinaux (s_1, s_2, s_3, s_4), l'angles de dérive des trains avant (α_1, α_3) et arrière (α_2, α_4)

et la charge sur chaque roue (N_1, N_2, N_3, N_4), à partir des trois vitesses, de l'angle de braquage et des quatre vitesses de rotation de moteurs ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$). Dans les blocs nommés ($Roue_1, \dots, Roue_4$), nous calculons les forces de traction. Enfin, dans les blocs ($MSAP1, \dots, MSAP4$), les vitesses de rotation sont calculées en communiquant à chaque bloc la force de traction et la charge concernées. Les mêmes conditions de simulation adoptées dans la section (§4.3.2) sont considérées sous Matlab/Simulink. Après l'exécution du programme, il est possible de tracer les graphiques des mêmes grandeurs étudiées sous ELEVES. Nous soulignons que la vitesse longitudinale donnée sur la figure (FIG. 4.58) est similaire à celle obtenue sous ELEVES. Même constatation, une légère diminution en vitesse lors de l'accomplissement du virage. Cela est dû à la perte d'énergie aux zones de contact roue/sol.

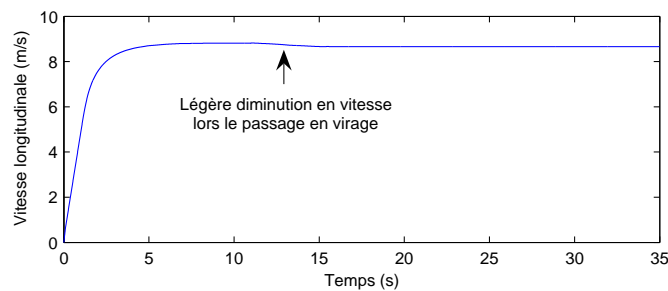


FIG. 4.58 – Vitesse longitudinale du véhicule

Quant aux vitesses latérale et angulaire illustrées sur la figure (FIG. 4.59), nous pouvons voir une corrélation quasi-parfaite avec celles obtenues sous ELEVES. Nous obtenons également la même trajectoire tracée par l'automobile (FIG. 4.60) que celle obtenue sous notre logiciel ELEVES. Un déplacement latéral commence à naître dès que le conducteur applique un angle de braquage.

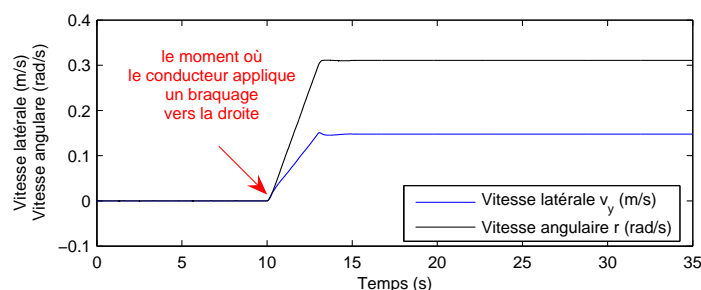


FIG. 4.59 – Vitesse latérale et vitesse angulaire du véhicule

Sur les figures (FIG. 4.61), (FIG. 4.62) et (FIG. 4.63), nous donnons les résultats

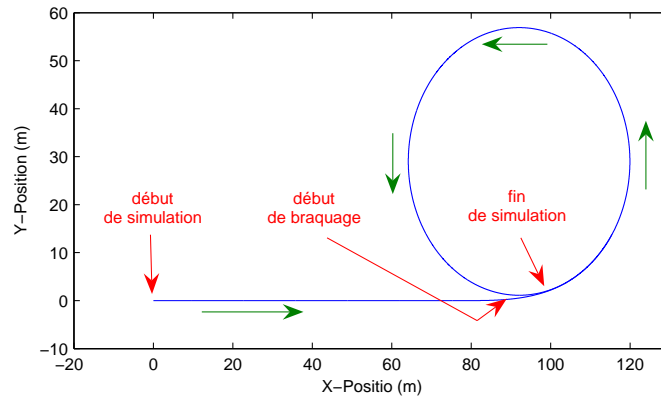


FIG. 4.60 – Trajet parcouru par le véhicule

obtenus à l'aide du Matlab/Simulink illustrant respectivement les forces de traction développées par les moteurs, les vitesses de rotation de moteurs et les couples résistants imposés sur les moteurs. Signalons en premier lieu que les moteurs (MSAP1 et MSAP2) ; qui se trouvent à l'extérieur de la courbure du virage ; développent des forces de traction supérieures à celles développées par les moteurs (MSAP3, MSAP4). Idem, ils sont confrontés à des couples résistants plus élevés à ceux imposés sur les moteurs (MSAP3, MSAP4). Et bien évidemment, ils tournent à vitesses supérieures à celles de moteurs (MSAP3, MSAP4) qui se trouvent à l'intérieur de la courbure du virage. Il est clairement visible qu'il existe une ressemblance qualitative et quantitative entre les résultats obtenus sous Matlab/Simulink et ceux obtenus à l'aide de notre logiciel ELEVES. La tension de la phase (a) et les courants du MSAP2 sont montrés respectivement sur les figures (FIG. 4.64), (FIG. 4.65). Toutefois, il est à noter que le temps de simulation, qu'ELEVES a mis pour effectuer la simulation du système, est plus important que celui de Matlab/Simulink. ELEVES a mis deux heures pour effectuer la simulation tandis que Matlab/Simulink l'a fait en vingt cinq minutes.

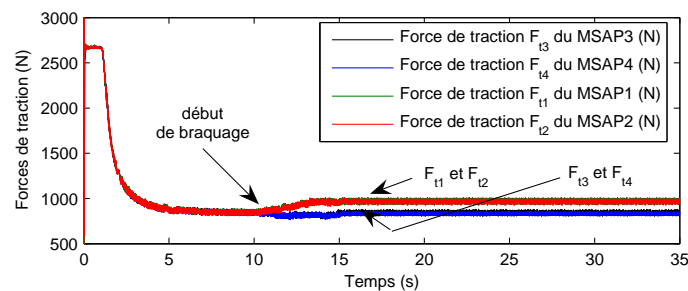


FIG. 4.61 – Forces de traction de moteurs

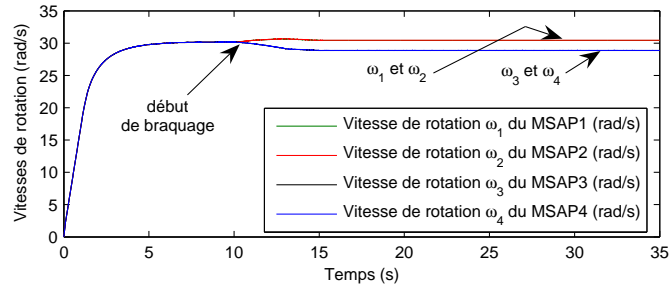


FIG. 4.62 – Vitesses de rotation de moteurs

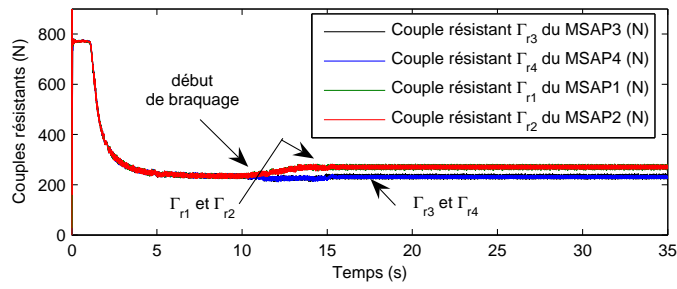
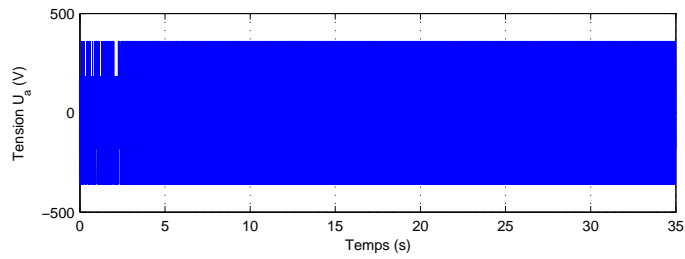
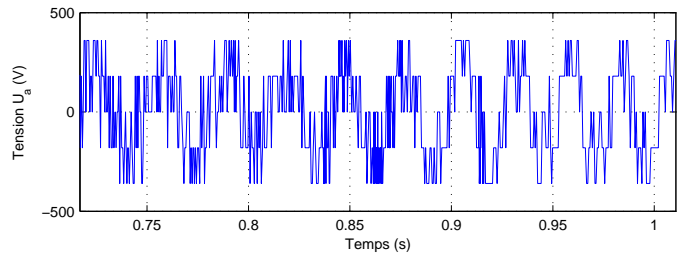


FIG. 4.63 – Couples résistants de moteurs

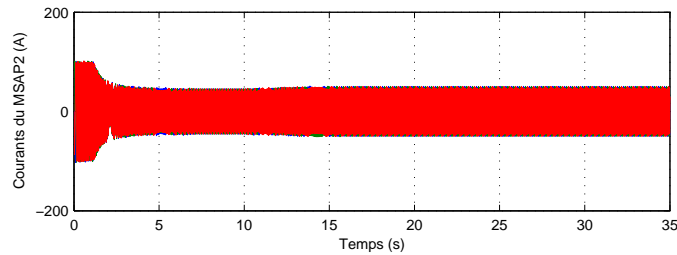
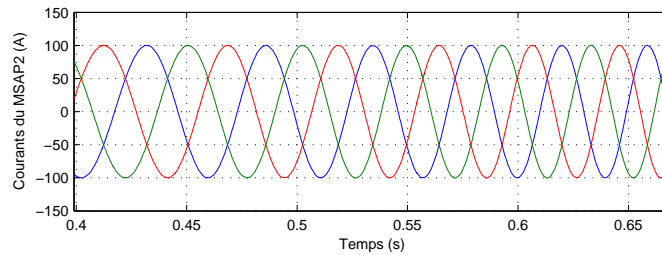


(a) Tension U_a



(b) Zoom

FIG. 4.64 – Tension de la phase (a) appliquée sur le MSAP2

(a) Courants i_a , i_b , i_c 

(b) Zoom

FIG. 4.65 – Courants du MSAP2

4.4.3 Système d'un véhicule à deux roues motrice avec la commande de la vitesse du véhicule

L'organisation de la REM et de la SMC sous le logiciel Matlab/Simulink est donnée sur la figure (FIG. 4.66). Les blocs en orange représentent la REM du système étudié et les blocs en bleu représentent sa SMC. L'énergie se transforme entre la source électrique (le bus continu) et la source mécanique (l'environnement). Ces dernières sont représentées par les blocs en vert.

Nous considérons le même cahier des charges qu'auparavant. Les résultats obtenus sont en parfaite adéquation avec ceux du logiciel ELEVES (voir les figures (FIG. 4.67,..., FIG. 4.72)). Elles représentent respectivement, pour le MSAP gauche, la fonction de modulation, les vitesses de rotation des roues, la vitesse de référence et celle du véhicule, le couple électromagnétique, les tensions dans le repère dq, et les tensions statoriques du MSAP gauche.

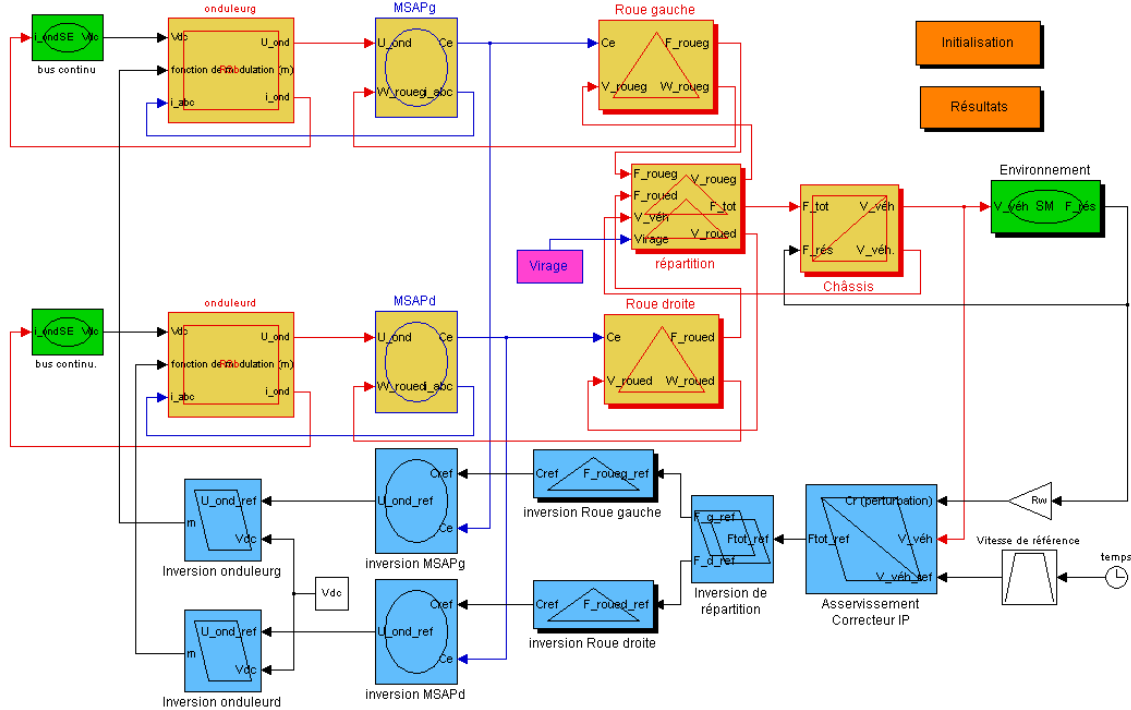
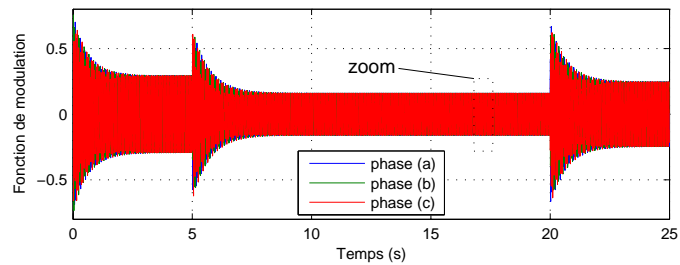
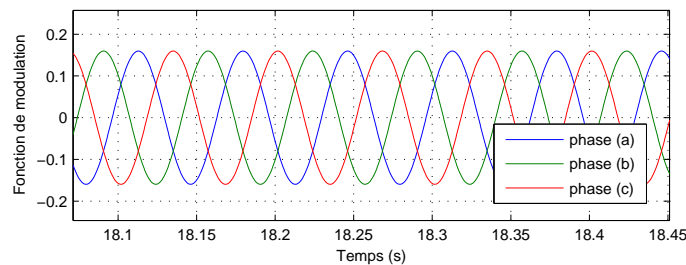


FIG. 4.66 – Modèle Matlab/Simulink du VE à 2-moteurs avec commande



(a) Fonction de modulation



(b) Zoom

FIG. 4.67 – Fonction de modulation pour le MSAP gauche

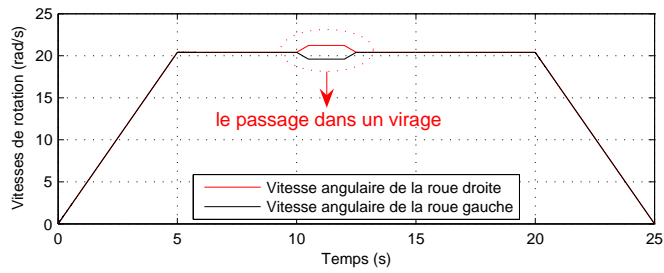
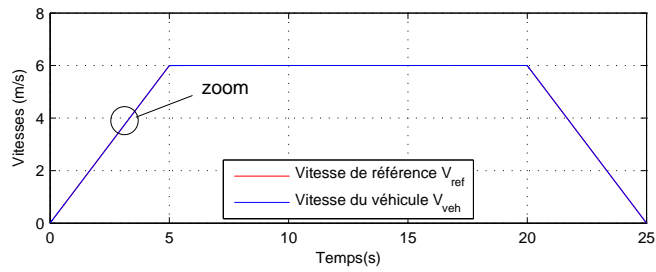
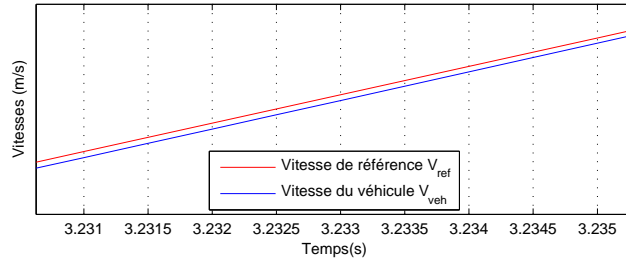


FIG. 4.68 – Vitesses de rotation des roues



(a) Vitesses



(b) Zoom

FIG. 4.69 – La vitesse de référence et celle du véhicule

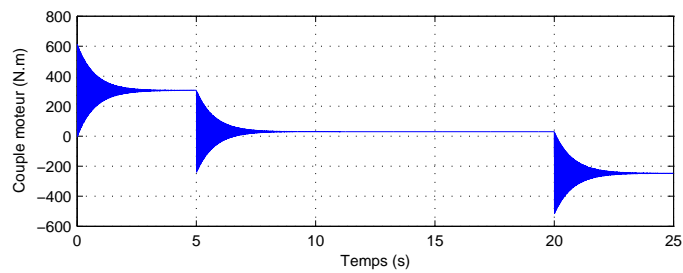
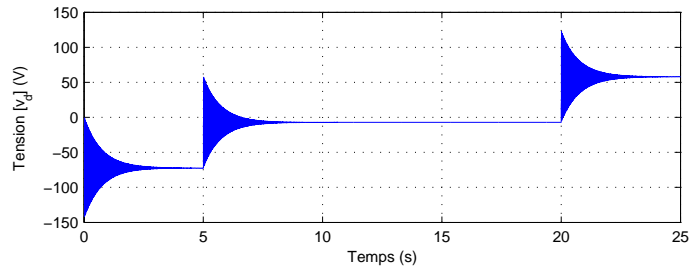
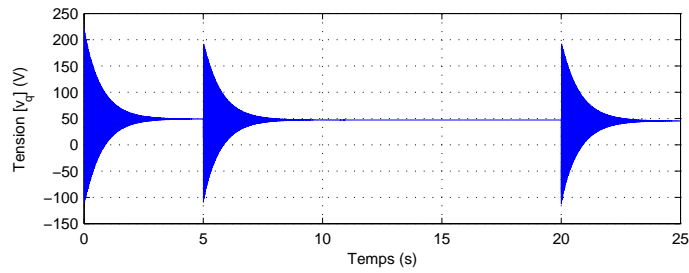


FIG. 4.70 – Couple électromagnétique du MSAP gauche

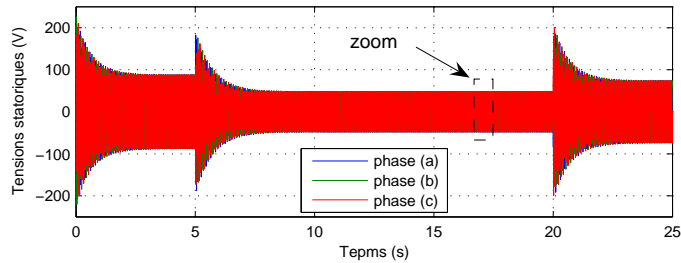


(a) Tension v_d

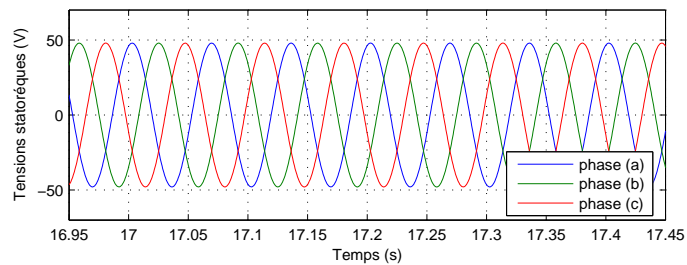


(b) Tension v_q

FIG. 4.71 – Tensions du MSAP gauche dans le repère dq



(a) Tensions statoriques



(b) Zoom

FIG. 4.72 – Tensions statoriques du MSAP gauche

4.5 Analyse

A l'issu des simulations des premiers systèmes, aussi bien à l'aide d'ELEVES que Matlab/Simulink, nous constatons les caractéristiques de fonctionnement suivantes :

1. Nous avons gagné en vitesse de rotation dans le système du véhicule à quatre roues motrices par rapport à la vitesse du système du véhicule à deux roues motrices. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de quatre moteurs roues. Donc, l'effort total à l'avancement de l'automobile, et que doit vaincre le système de motorisation, est divisé sur les quatre moteurs au lieu de deux moteurs dans le système du véhicule à deux roues motrices. La vitesse de rotation stabilisée, dans ce dernier, est de l'ordre de (24 ras/s) tandis qu'elle est de l'ordre de (30 rad/s) dans le système à quatre roues motrices.
2. Le temps de démarrage ou l'accélération ; (c'est-à-dire, le temps que le véhicule met pour faire varier sa vitesse de l'arrêt jusqu'à la stabilisation de sa vitesse) ; est diminué dans le système à quatre roues motrices. L'automobile met (5 s) pour arriver à sa vitesse stabilisée au lieu de (8 s) dans le système à deux roues motrices.
3. Dans le système à quatre roues motrices, les moteurs développent des forces de traction moins que celles générées dans le système à deux roues motrices. Dans ce dernier, la valeur d'une force est de l'ordre de (1625 N) tandis qu'elle est de l'ordre de (850 N) dans le système à quatre roues motrices.
4. Nous n'avons pas fait, dans cette thèse, une étude nous permettant de savoir lequel entre les deux systèmes, modélisés et simulés par notre logiciel, est rentable en terme du coût. Mais cela serait l'une des futurs utilisation d'ELEVES.

4.6 Synthèse comparative

Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux que l'on trouve dans la littérature [Hori, 2004] [Shino *et al.*, 2000] [Fujimoto *et al.*, 2004] et [Esmailzadeh *et al.*, 2001] surtout en terme de vitesses et trajectoire. Nous voulons souligner trois points importants en vue de la comparaison entre les deux logiciels :

1. Comme Matlab/Simulink, ELEVES permet de visualiser tous les variable d'états et intermédiaires du système durant le cours de la simulation.
2. L'éditeur d'image de Matlab/Simulink est plus performant que celui d'ELEVES. On peut avec l'éditeur de Matlab/Simulink rajouter du texte, des flèches et des

légendes sur les courbes de résultats. Cela n'est pas accessible avec ELEVES. Pour les deux logiciels, nous pouvons jouer sur les couleurs et ajuster l'échelle des axes au même d'ajouter un gril sur les courbes de la simulation. Avec Matlab/Simulink, nous pouvons exporter les images de la simulation en plusieurs formats comme par exemple (*.fig, *.bmp, *.eps, *.emf, *.jpg,...). ELEVES permet de sauvegarder les images de la simulation uniquement sous le format (*.bmp). Mais il offre, pour surmonter ce problème, un fichier nommé (resultat.res) où on stocke les datas de la simulation. Ce dernier peut être exporté par n'importe quel autre logiciel de graphique.

3. Le temps de simulation sous ELEVES est plus important que celui de Matlab/Simulink. Cette différence s'explique d'une part par la tâche d'extraction des équations d'état, effectuée à chaque étape par ELEVES et inexistante sous Matlab/Simulink. En effet, l'automatisation de cette tâche permet à l'utilisateur de ne pas faire l'analyse du fonctionnement détaillé du système simulé, contrairement à Matlab/Simulink. Et d'autre part par le fait que chaque élément dans notre outil est représenté par un réseau d'effort et un autre du flux. Dans les systèmes complexes tels que le système de traction des VE, comportant sources, convertisseurs, moteurs, commande,... il est généralement très difficile voire impossible d'analyser correctement le fonctionnement. Ainsi le gain apporté par ELEVES dans le temps de développement, beaucoup moins important que dans Matlab/Simulink, est pénalisé par une lenteur dans la phase de simulation.

Dans le tableau (TAB. 4.3), nous dressons une comparaison entre notre logiciel ELEVES et le logiciel Matlab/Simulink par rapport aux critères d'exploitation :

TAB. 4.3 – Comparaison entre ELEVES et Matlab/simulink

	ELEVES	Matlab/Simulink
Elaboration des schémas à partir des bibliothèques	facile	facile
Gestion des graphiques (texte, couleurs,...)	limitée	très performante
Formats des images	possibilités limitées	plus de possibilités
Temps de développement	rapide	très lent
Temps de simulation	lent	rapide
Précision des calculs	bonne	bonne
Coût	propriété UTBM	cher, licence MathWorks
simulation des circuits	facile	laborieuse
Le source	accessible sous Delphi	inaccessible
Traitement des systèmes hybrides (discret/continu)	facile	laborieux
Domaine de prédilection	véhicule électrique	général

4.7 Conclusion

Le logiciel ELEVES est un outil de simulation destiné aux véhicules électriques. Ce logiciel utilise une approche originale pour la construction du système d'équations. Cette approche fait appel à une modélisation à base du RDHC (réseau dynamique hybride à composant).

Trois systèmes représentant des véhicules tout électrique sans ou avec commande sont implémentés et simulés sous notre logiciel ELEVES. En même temps, ces derniers ont été traités à l'aide du logiciel Matlab/Simulink dans un but de test et de validation du fonctionnement et des performances de notre logiciel. La confrontation des résultats fournis par les deux outils nous a montré une très bonne corrélation. La ressemblance quasi parfaite entre les deux logiciels nous permet de dire que notre outil peut être adopté dans la simulation des VE en toute sécurité. Cette affirmation est d'autant plus réconfortée par la cohérence de nos résultats avec ceux que l'on trouve dans la littérature.

Conclusion générale

A l'issue de ce travail de thèse, nous avons contribué à la conception d'un simulateur des véhicules électriques capable de modéliser ses organes et par la suite simuler et analyser son comportement global. Ce simulateur, appelé ELEVES (ELEctric VEhicle Simulator), adopte le Réseau Dynamique Hybride à Composant pour la modélisation des automobiles électriques. Il est actuellement en phase de développement à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) au sein du laboratoire Systèmes et Transport (SeT).

Nous avons tout d'abord fait une présentation générale des différentes architectures, des divers constituants qui font partie de la chaîne de traction électrique, de leur mode de fonctionnement et des tâches à accomplir par chaque sous-ensemble. Cela nous a guidé dans la définition de notre véhicule en terme d'architectures, moteurs et sources d'énergies. Notre système étudié est un véhicule tout électrique à entraînement direct (deux ou quatre roues motrices), il est propulsé par des moteurs roues du type synchrone à aimants permanents (MSAP), et alimentés par des batteries d'accumulateurs à travers des onduleurs.

Afin de réaliser la simulation à l'aide d'ELEVES, nous avons utilisé un modèle dynamique du véhicule à trois degrés de liberté. La modélisation du MSAP a été construite à partir des équations globales du moteur triphasé à FMM sinusoïdale. Afin d'inclure la fonctionnalité-commande de la vitesse du véhicule, nous avons adopté une démarche systématique à travers la représentation énergétique macroscopique (REM) du système. Nous avons ainsi déduit la REM du VE à partir des REM des éléments constitutifs du système et des REM des couplages déterminés par leurs associations. Ensuite, la structure maximale de commande (SMC) a été établie à partir de la REM globale du système dans l'optique de contrôler la vitesse du véhicule.

Le choix du formalisme graphique a été une étape importante dans la réalisation du

simulateur ELEVES. Ce choix a été consolidé par l'exposition d'une étude comparative entre le modèle RDHC et le modèle bond graph. Il a été montré que la génération du système d'équations à l'aide du modèle RDHC s'avère plus intéressante et plus économique. Trois modèles RDHC correspondant à trois systèmes du VE ont été développés. Ces systèmes sont le VE à deux roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule, le VE à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule et le VE à deux roues motrices avec la commande de la vitesse du véhicule.

Le point fort d'ELEVES réside dans le fait qu'il permet à l'utilisateur non seulement de construire et simuler un VE à partir de bibliothèques pré-établies, mais également de développer ses propres modèles en faisant recours à l'assistant de création du nouveau composant. La confrontation de résultats obtenus à l'aide de notre logiciel ELEVES, pour les trois systèmes traités, avec ceux obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, donne de très bonnes corrélations. De plus, ces résultats sont très cohérents avec ceux publiés dans la littérature.

Ainsi, nous pensons qu'à ce jour nous disposons d'une première version d'un vrai simulateur de VE dans lequel un comportement très réaliste du VE est reproduit. Aussi bien la dynamique du véhicule que la chaîne de traction électrique en passant par la commande du véhicule, peuvent être modélisés plus ou moins finement selon le besoin de l'utilisateur.

Par ailleurs, beaucoup de travail reste à faire avant la maturité de notre outil. La validation pratique du logiciel est sans doute un passage obligé vers cette maturité. Ensuite, il sera question de validation d'ELEVES en l'utilisant dans le dimensionnement de toute la chaîne de traction (éléments de stockage, groupes motopropulseurs,...). Il s'agirait là de partir véritablement de la mission confiée au système pour remonter aux contraintes résultantes sur les entrées et les conditions nécessaires à la satisfaction de cette mission. Le logiciel pourra alors, fournir des indications prédictives précieuses sur le plan de la gestion de l'énergie. Dans un objectif d'amélioration d'ELEVES mais aussi de capitalisation de l'existant, l'enrichissement de sa bibliothèque par plusieurs composants et architectures plus ou moins complexes, s'avère très important. Enfin, il est toujours opportun d'améliorer le temps d'exécution et l'ergonomie de notre logiciel ELEVES afin qu'il puisse concurrencer les outils existants.

Bibliographie

- [Ced, 2005] (février 2005). Flux 9.10 : Application 2D, Cedrat.
- [Ada, 2007] (2007). <http://www.mscsoftware.com/products/adams.cfm>
- [Sma, 2007] (2007). <http://www.webs1.uidaho.edu/niatt/index.htm>
- [Ame, 2007] (2007). <http://www.amesim.com/>
- [Adv, 2007] (2007). http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/vsa/related_links.html
- [Ced, 2007] (2007). <http://www.cedrat.com/software/software.htm>
- [Amara, 2001] Y. Amara (2001). Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation : Application au véhicule hybride, Thèse de doctorat, Université Paris XI.
- [Badin *et al.*, 2006] F. Badin, J. Scordia, R. Trigui, E. Vinot et B. Jeanneret (December 2006). Hybrid electric vehicles energy consumption decrease according to drive train architecture, energy management and vehicle use, Dans *Hybrid Vehicle Conference, IET The Institution of Engineering and Technology*, pp. 213 – 224.
- [Benbouzid *et al.*, 2007] M. E. H. Benbouzid, D. Diallo et M. Zeraoulia (March 2007). Advanced Fault-Tolerant Control of Induction-Motor Drives for EV/HEV Traction Applications : From Conventional to Modern and Intelligent Control Techniques, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, volume 56, numéro 2, pp. 519–528.
- [Beretta, 2005] J. Beretta (2005). *Le génie électrique automobile, la traction électrique*, H. Science, éd. LAVOISIER.
- [Blackketter et Alexander, 2001] D. Blackketter et D. Alexander (February 2001). Logic-Based, performance-driven electric vehicle software design tool, National Institut for Advanced Transportation Technology (NIATT), University of IDAHO, Rapport technique.
- [Bouscayrol, 2003] A. Bouscayrol (décembre 2003). Formalismes de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multimachines

Bibliographie

- multiconvertisseurs, Université des Sciences et Technologies de Lille, Habilitation à Diriger des Recherches (HDR).
- [Bouscayrol *et al.*, 2006a] A. Bouscayrol, W. Lhomme, P. Delarue, B. Lemaire-Semail et S. Aksas (November 2006). Hardware-in-loop simulation of electric vehicle traction systems using Energetic Macroscopic Representation, Dans *IEEE Industrial Electronics*, pp. 5319–5324.
- [Bouscayrol *et al.*, 2006b] A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, P. Delarue, R. Pena-Eguiluz, P.-E. Vidal et X. Kestelyn (December 2006). Weighted control of traction drives with parallel-connected AC machines, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, volume 53, pp. 1799–1806.
- [Breedveld, 1985] P. C. Breedveld (January/February 1985). Multibond graph elements in physical systems theory, *Journal of Franklin Institute*, volume 1, pp. 1–36.
- [Chami, 2005] M. Chami (décembre 2005). Modélisation et Simulation des Systèmes Multi-Physiques à l'aide des Réseaux Dynamiques Hybrides à Composants : application à la conversion d'énergie et au transport électrique terrestre, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et l'École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique.
- [Chami *et al.*, 2007] M. Chami, B. Blunier, A. Djerdir, A. Miraoui et J. Saadi (Septembre 2007). SimRDH : A Modeling and Simulation Environment with Component Hybrid Dynamic Nets, Elevator application, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, volume 22, pp. 592–599, print on.
- [Chami *et al.*, 2005] M. Chami, A. Djerdir, J. Saadi et A. Miraoui (Chicago, Illinois, 7,9 September 2005). The use of the (CHDN) to model a permanent magnet synchronous motor powered by ultracapacitor : Electrical vehicle application, Dans *CD ROM Symposium IEEE Vehicle Power and Propulsion Conferece*, ISBN 0 7803-9281-7, pp. 724–730.
- [Chen et Tseng, 1996] G. H. Chen et K. J. Tseng (1996). Design of a permanent-magnet direct-driven wheel motor drive for electric vehicle, Dans *IEEE*, pp. 1933–1939.
- [Dahan et Toth, 2003] O. Dahan et P. Toth (2003). *Delphi 7 Studio*. Groupe EYROLLES.
- [David et Alla, 2005] R. David et H. Alla (2005). *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*. Springer Berlin Heidelberg.

-
- [Delprat, 2002] S. Delprat (janvier 2002). Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- [Ehsani *et al.*, 2005] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay et A. Emadi (2005). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles : fundamentals, theory, and design*. CRC Press LLC.
- [Esmailzadeh *et al.*, 2001] E. Esmailzadeh, G. R. Vossoghi et A. Goodarzi (2001). Dynamic modeling and analysis of a four motorized wheels vehicle, *Vehicle System Dynamics*, volume 35, pp. 163–194.
- [Faggioli *et al.*, 1999] E. Faggioli, P. Rena, V. Danel, X. Andrieu, R. Mallant et H. Kahlen (1999). Supercapacitors for the energy management of electric vehicles, *Journal of Power Sources*, volume 84, pp. 261–269.
- [Farazandeh et Kazemi, 2006] A. Farazandeh et R. Kazemi (August 2006). Fuzzy Control for Active Suspension in ADAMS/Car Full Vehicle, Dans *IEEE Chinese Control Conference*, pp. 1188 – 1193.
- [Fodorean, 2005] D. Fodorean (juillet 2005). Conception et réalisation d’une machine synchrone à double excitation : Application à l’entraînement direct, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Université Technique de Cluj-Napoca.
- [Fujimoto *et al.*, 2004] H. Fujimoto, T. Saito et N. Toshihiko (2004). Motion stabilization control of electric vehicle under snowy conditions based on yaw-moment observer, Dans *IEEE AMC*, pp. 35–40.
- [Gandanegara, 2003] G. Gandanegara (novembre 2003). Méthodologie de conception systémique en Génie Electrique à l’aide de l’outil Bond Graph Application à une chaîne de traction ferroviaire, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Genta, 1997] G. Genta (1997). *Motor vehicle dynamics : modeling and simulation*, série-Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, volume 43.
- [Haddoun *et al.*, 2007] A. Haddoun, M. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili et K. Srairi (January 2007). A loss-minimization DTC scheme for EV induction motors, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, volume 56, numéro 1, pp. 81–88.
- [Haddoun *et al.*, 2008] — (June 2008). Modeling, analysis, and Neural network control

- of an EV electrical differntiel, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, volume 55, numéro 6, pp. 2286–2294.
- [Hodkinson et Fenton, 2001] R. Hodkinson et J. Fenton (2001). *Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- [Hong *et al.*, 2001] S. J. Hong, J. Y. Choi, Y. I. Jeong, M. H. Lee, K. T. Park, K. S. Yoon et N. S. Hur (2001). Lateral control of autonomous vehicle by yaw rate feedback, Dans *IEEE ISIE*, pp. 1472–1476.
- [Hori, 2004] Y. Hori (October 2004). Future vehicle driven by electricity and control research on four-wheel-motored "UOT Electric March II", *IEEE Transaction on Industrial electronics*, volume 51, numéro 5, pp. 954–962.
- [Hosaka et Murakami, 2004] M. Hosaka et T. Murakami (Mars 2004). Yaw rate control of electric vehicle using steer-by-wire system, Dans *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, pp. 31–34.
- [Husain, 2003] I. Husain (2003). *Electric and Hybrid Vehicles : Design Fundamentals*. CRC Press LLC.
- [Kant, 1995] M. Kant (septembre 1995). La voiture électrique, Dans *Techniques de l'ingénieur*, numéro D5562.
- [Kim *et al.*, 2005] D. Kim, S. Hwang et H. Kim (October 2005). Rear Motor Control for a 4WD Hybrid Electric Vehicle Stability, Dans *IEEE Internationl Conference on Vehicular Electronics and Safty*, pp. 86–91.
- [Lyshevski *et al.*, 2000] S. E. Lyshevski, A. S. C. Sinha, M. Rizkalla, M. El-Sharkawy, A. Nazarov, P. C. Cho, W. Wylam, J. Mitchell et M. Friesen (2000). Analysis and control of hybrid-electric vehicles with individual wheel brushless traction motors, Dans *American Control Conference*, pp. 996–1000.
- [Markel *et al.*, 2002] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O'Keefe, S. Sprik et K. Wipke (2002). ADVISOR : a systems analysis tool for advanced vehicle modeling, *Journal of Power Sources*, volume 110, pp. 255–266.
- [Marquis-Favre *et al.*, 2006a] W. Marquis-Favre, E. Bideaux et S. Scavarda (2006). A planar mechanical library in the AMESim simulation software. Part I : Formulation of dynamics equations, *Simulation Modelling Practice and Theory*, volume 14, pp. 25–46.
- [Marquis-Favre *et al.*, 2006b] — (2006). A planar mechanical library in the AMESim simulation software. Part II : Library composition and illustrative example, *Simulation Modelling Practice and Theory*, volume 14, pp. 95–111.

-
- [Mei *et al.*, 2000] T. X. Mei, R. M. Goodall et A. H. Wickens (2000). Dynamics and control assessment of rail vehicles using permanent magnet wheel motors, Dans *Vehicle System Dynamics Supplement*, volume 37, pp. 326–337.
- [Mercieca *et al.*, 2004] J. C. Mercieca, J. N. Verhille et A. Bouscayrol (May 2004). Energetic Macroscopic Representation of a subway traction system for a simulation mode, Dans *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, volume 2, pp. 1519–1524.
- [Mestre, 1997] P. Mestre (juin 1997). Etude et Simulation d'un Véhicule Electrique à Moteur synchrone Monosource ou Equipé de Supercondensateurs, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT).
- [Morimoto *et al.*, 1990] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasa et K. Taniguchi (september/october 1990). Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity, *IEEE Transaction on Industry Applications*, volume 26, numéro 2, pp. 866–871.
- [Mosdale, 2003a] R. Mosdale (février 2003). Transport électrique routier - Batteries pour véhicules électriques, Dans *Techniques de l'ingénieur*, numéro D5565.
- [Mosdale, 2003b] — (mai 2003). Transport électrique routier : véhicules électriques à pile à combustible, Dans *Techniques de l'ingénieur*, numéro D5570.
- [Mosterman, 1997] P. J. Mosterman (May 1997). Hybrid Dynamic Systems : a hybrid bond graph modeling paradigm and its application in diagnosis, Thèse de doctorat, Vanderbilt University.
- [Mosterman *et al.*, 1996] P. J. Mosterman, J. O. Campbell, A. J. Broderson et J. R. Bourne (August 1996). Design and implementation of an electronics laboratory simulator, *IEEE Transactions on Education*, volume 39, numéro 3, pp. 309–313.
- [Multon, 2001] B. Multon (2001). Motorisation des véhicules électriques, Dans *Techniques de l'ingénieur*, numéro E3996.
- [Nouh *et al.*, 2007a] A. Nouh, M. Becherif, A. Djerdir et M. El-Bagdouri (march 2007). Traction control of an electric vehicle with two separate wheel drive, Dans *International Conference on Ecologic Vehicle & Renewable Energies, EVER*, Monaco.
- [Nouh *et al.*, 2006a] A. Nouh, M. Chami, A. Djerdir et M. El-Bagdouri (october 2006). ELEVES : a new software tool for electric vehicle modelling and simulation, Dans *International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS22)*, Yokohama, Japan.

- [Nouh *et al.*, 2006b] — (september 2006). Modelling and simulating dynamic vehicle with component hybrid dynamic nets, Dans *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'06)*.
- [Nouh *et al.*, 2007b] — (september 2007). Electric vehicle control using the simulator ELEVES, Dans *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Arlington, Texas, USA.
- [Nouh *et al.*, 2007c] — (may 2007). ELEVES : a new software tool for electric vehicle modelling and simulation, *World Electric Vehicle Association (WEVA)*, volume 1, pp. 236–243.
- [Ong, 1998] C.-M. Ong (1998). *Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink*. Prentice Hall PTR.
- [Proth et Xie, 1994] J. M. Proth et X. Xie (1994). *Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production*. Masson.
- [Pusca, 2002] R. Pusca (décembre 2002). Contribution au pilotage d'une plate-forme mobile d'essais de constituants d'une chaîne de traction électrique : conception d'un simulateur et système temps réel, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- [Regnier, 2003] J. Regnier (décembre 2003). Conception de systèmes hétérogènes en Génie Electrique par optimisation évolutionnaire multicritère, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT).
- [Roby, 2006] F. Roby (2006). *Vers la voiture sans pétrole ?* EDP Sciences.
- [Roisse *et al.*, 1998] H. Roisse, M. Hecquet et P. Brochet (september 1998). Simulations of synchronous machines using a electric-magnetic coupled network model, *IEEE Transaction on Magnetics*, volume 34, numéro 5, pp. 3656–3659.
- [Saadi, 1994] J. Saadi (1994). Diagnostic et modélisation de défauts au sein d'une association convertisseur - machine, Thèse de doctorat, Mohamed V University, Casablanca, Maroc.
- [Saadi *et al.*, 1997] J. Saadi, T. Bennani et H. Alla (Septembre 1997). Component Hybrid Dynamic Nets, Dans *IFAC/IFIP Conference on Management and Control of Production and Logistics*, pp. 211–216.
- [Saisset, 2004] R. Saisset (Avril 2004). Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT).

-
- [Sakai et Hori, 2001] S.-i. Sakai et Y. Hori (2001). Advanced motion control of electric vehicle with fast minor feedback loops : basic experiments using the 4-wheel motored EV, Dans *JSAE Review*.
- [Sakai et al., 1999] S.-i. Sakai, H. Sado et Y. Hori (march 1999). Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors, *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, volume 4, numéro 1, pp. 9–16.
- [Sava et Alla, 2001] A. T. Sava et H. Alla (october 2001). Combining hybrid petri nets and hybrid automata, *IEEE Transaction On Robotics and Automation*, volume 17, pp. 670–678.
- [Shino et al., 2000] M. Shino, N. Miyamoto, Y. Wang et M. Nagai (2000). Traction control of electric vehicles considering vehicle stability, Dans *IEEE AMC*, pp. 311–316.
- [Smith et al., 1995] D. E. Smith, J. M. Starkey et R. E. Benton (June 1995). Nonlinear-Gain-Optimized controller development and evaluation for automated emergency vehicle steering, Dans *American Control Conference*, pp. 3586–3591.
- [Tahami et al., 2004] F. Tahami, S. Farhangi et R. Kazemi (2004). A fuzzy logic direct yaw-moment control system for all-wheel-drive electric vehicles, *Vehicle System Dynamics*, volume 41, numéro 3, pp. 203–221.
- [Terashima et al., 1997] M. Terashima, T. Ashikaga, T. Mizuno, N. Fujiwara et M. Yada (1997). Novel motors and controllers for high-performance electric vehicle with four in-wheel motors, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, volume 44, pp. 28–38.
- [Trigui et al., 2004] R. Trigui, B. Jeanneret et F. Badin (2004). Systemic modelling of hybrid vehicles in order to predict dynamic performance and energy consumption : Building the VEHLIB library of models, Dans *Recherche Transports Sécurité*. Lavoisier SAS et INRETS, volume 83, pp. 129–150.
- [Valentin, 2000] C. Valentin (september 2000). Hybrid dynamic systems verification with mixed petri nets, Dans *ADPM*.
- [Verhille et al., 2004] J. N. Verhille, A. Bolopion, P. J. Barre, J. C. Mercieca, J. Hautier et E. Semail (October 2004). Torque tracking strategy for antislip control in railway traction sysem with common supplies, Dans *Industry Applications Conference*, volume 4, pp. 2738–2745.
- [Westbrook, 2001] M. H. Westbrook (2001). *The electric car : development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars*, série38. The Institution of Electrical Engineers,

London, United Kingdom and Society of Automotive Engineers, USA, numéro ISBN 0 85296 0131.

[Xu *et al.*, 1995] L. Xu, L. Ye, L. Zhen et A. El-Antably (march/april 1995). A new design concept of permanent magnet machine for flux weakening operation, *IEEE Transaction on Industry Applications*, volume 31, numéro 2, pp. 373–378.

[Yang *et al.*, 2002] Y.-P. Yang, Y.-P. Luh et C.-M. Lee (2002). A Novel design of optimal phase current waveform for an electric vehicle wheel motor, Dans *Electric Power Components ans Systems*, volume 30. Taylor & Francis, pp. 705–721.

[Zeraoulia *et al.*, 2006] M. Zeraoulia, M. E. H. Benbouzid et D. Diallo (November 2006). Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems : a comparative study, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, volume 55, numéro 6, pp. 1756–1764.

Annexe 1

TAB. 1 – Véhicules hybrides ou assistés électriquement

Type	Moteurs	Batterie/générateur Énergie embarquée	Autonomie Consommation
Toyota Prius Hybride parallèle/série	Moteur thermique 4 cylindres essence 1,5 L ; 42 kW (version Europe : 53 RW) Moteur-générateur électrique (MSAP) 350 N.m de 0 à 400 tr/min 33 kW de 1040 à 5600 tr/min	NiMH chargées en interne 274 V, 6,5 A.h 54 L de carburant	3,6 L/100 km (Japon) 5,1 L/100 km (Europe)
Citroën Saxo Dynavolt Hybride série	Groupe générateur 2 cylindres 2 temps 200 cm ³ injection directe + alternateur 6,5 kW MCC 20 kW	NiCd 120 V Chargeur embarqué 15 L de carburant	80 km urbains sur batteries seules 70 km/h maximum Jusqu'à 340 km avec groupe thermique 120 km/h maximum
Honda Insight Assistance électrique intégrée	Moteur thermique 3 cylindres 1 L 56 kW à 5700 tr/min Boîte 5 vitesses Moteur-alternateur électrique intégré : MAP 10kW crêtes à 3000 tr/min	NiMH 144 V-6,5 A.h 48 L de carburant	3,4 L/100 km sur autoroute 160 km/h maximum
General Motors Precept Hybride parallèle 4 roues motrices	Moteur Diesel 40 kW common rail sur roues arrière Moteur électrique sur roues avant MAS 35 kW crêtes et 18 kW permanents	NiMH + LiPoly	Moins de 3 L/100 km
IVECO Altrabus 12 m Hybrid 86 passagers	Groupe générateur Moteur Diesel 2,5 L Générateur triphasé 30 kW à 2700 tr/min MAS 128 kW permanents et 164 kW maximum à 1500 tr/min	Pb-acide 600 V ; 100 A.h	62 km/h maximum Autonomie totale 140 km Autonomie en électrique pur : 25 à 30 km

TAB. 2 – Petits véhicules de transport et de convoyage

Type	Moteur	Batterie Énergie embarquée	Charge et vitesse maximales
Cushman Stock Chaser 361	MCC excitation série 2,2 kW	Pb 8,1 kWh 36 V	450 kg charge utile 16 km/h
Cushman Hawk 009	MCC excitation série 4,8 kW à 4700 tr/min	Pb 48 V	550 kg charge utile 29 km/h

TAB. 3 – Véhicules deux ou trois-roues

Type	Moteur	Batterie Énergie embarquée	Autonomie
Peugeot motorcycle Scooter Scoot'elec	MCC excitation séparée ventilé 1,5 kW permanents 2,8 kW maximum 3900 tr/min maximum	NiCd 18 V ; 100 A.h	30 à 60 km 45 km à 45 km/h
Lectra VR24 Motorbike	MRVDS 2 phases 13 N.m maximum 14000 tr/min	Pb-acide Durée de vie jusqu'à 14000 km 24 V ; 104 A.h	40 à 65 km 64 km/h maximum
Twike (Suisse) Triporteur à pédales assisté pour 2 passagers	MAS 5 kW crêtes (3 kW permanents) assistance au pédalage	NiCd 360 V 2 ou 3 kWh	40 à 80 km 85 km/h maximum
MBK Ax-ion City (ville)	MCC AP 235 W assistance au pédalage	NiCd 24 V ; 5 A.h	City : 40 km Fizz : 75 km

TAB. 4 – Bateaux de plaisance tout électriques

Type	Moteur	Batterie Énergie embarquée	Autonomie
Black rivers boats Guide	MCC AP Hacheur PWM	Pb-acide é,4 kWh 12 V	120 km (24 h) à 5 km/h 8 km/h maximum
Black rivers boat Voyager	MCC AP Hacheur PWM	Pb-acide 7,2 kWh 36 V	120 km (24 h) à 5 km/h 8 km/h maximum

Annexe 2

Étapes du développement d'une application ELEVES

Dans cette annexe, nous reprenons l'exemple du véhicule électrique à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule, réalisé sous le logiciel ELEVES. Cette étude donnera à l'utilisateur les étapes nécessaires à suivre lors du développement de n'importe quelle autre application sous ELEVES.

Etape 1 : Nouvelle application

Il s'agit d'ouvrir un nouveau fichier dans lequel le schéma du système étudié sera implémenté. En appuyant sur le bouton Fichier dans le menu du logiciel puis sélectionner Nouveau, on ouvre une nouvelle application d'ELEVES (Fig. 1).

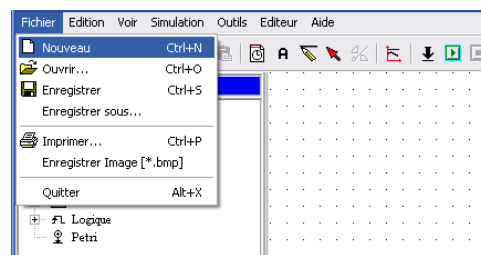


FIG. 1 – Ouvrir une nouvelle application

Etape 2 : Construire le schéma du système étudié

Dans cette étape, l'utilisateur peut faire un appel aux composants existants dans la bibliothèque de l'outil ou créer ses propres composants. En effet, selon ses besoins et la complexité de son système, l'utilisateur peut jouer sur ces deux options. Dans notre exemple d'illustration, nous avons utilisé la bibliothèque et l'assistant de création de nouveau composant.

Utilisation de l'assistant de création de nouveau composant dans ELEVES

Nous avons utilisé l'assistant de création pour créer plusieurs composants constituant notre système comme par exemple (Dynamique du véhicule, MS, angle de braquage,...). Les démarches de création sont déjà données dans la section (§4.2.2.3). Une fois les nouveaux composants sont créés, on les trouve dans la bibliothèque du logiciel (Liste des composants). Le développement des modèles RDHC ainsi que le paramétrage se font, dans cette étape de création, à partir des modèles mathématiques décrivant le système étudié.

Utilisation de la bibliothèque d'ELEVES

Nous pouvons récupérer les composants qu'on a créé, puis les glisser dans l'air de dessin pour la réalisation du schéma global du système. La figure (FIG. 2) montre la liste des composants et l'air de dessin pendant la réalisation du schéma. Nous utilisons les boutons qui se trouvent dans le Toolbar pour relier, déplacer, pivoter,... les composants afin d'organiser l'allure du schéma global.

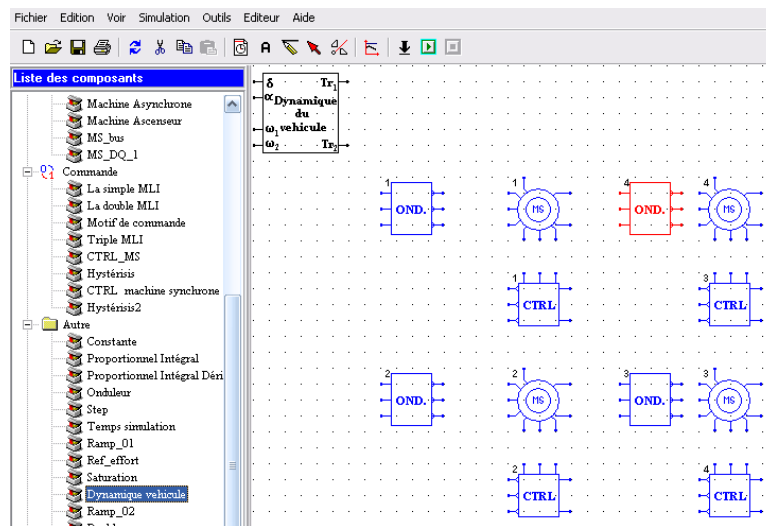


FIG. 2 – Réalisation du schéma global

Les fichiers *.cir et *.net

Après que le schéma soit saisi dans l'air de dessin, l'outil va créer un fichier avec l'extension (*.cir), une fois le schéma enregistré (dans notre cas (vehicule-4moteur.cir)). Ce fichier

est composé dans sa première ligne du nombre de composants puis le nombre de lignes de liaisons du circuit. Chaque composant est identifié par son numéro d'identification, son type de position, son numéro dans le circuit, la position en (X,Y) de chaque pôle et à la fin une série de paramètres spécifiques aux composants. A la fin du fichier, nous trouvons la liste des coordonnées des lignes de liaisons (FIG. 3).

```

%% Fichier Circuit
20 110 6
998 0 525 615 4 0.000000000000E+0000 2.000000000000E+0001 5.000000000000E-0005 1.00
505 0 75 75 1 5.400000000000E+0002
505 0 75 345 1 5.400000000000E+0002
505 0 435 75 1 5.400000000000E+0002
505 0 435 345 1 5.400000000000E+0002
445 0 75 165 5 1.040000000000E-0002 1.500000000000E-0001 5.318000000000E+0000 1.60
445 0 75 435 5 1.040000000000E-0002 1.500000000000E-0001 5.318000000000E+0000 1.60
445 0 435 165 5 1.040000000000E-0002 1.500000000000E-0001 5.318000000000E+0000 1.60
445 0 435 435 5 1.040000000000E-0002 1.500000000000E-0001 5.318000000000E+0000 1.60
903 0 165 165 1 5.000000000000E-0001
903 0 165 435 1 5.000000000000E-0001
903 0 525 165 1 5.000000000000E-0001
903 0 525 435 1 5.000000000000E-0001
702 2 255 630 2 2.090000000000E-0001 1.000000000000E-0001
700 2 240 270 1 1.000000000000E+0002
700 2 165 525 1 1.000000000000E+0002
700 2 525 255 1 1.000000000000E+0002
700 2 525 525 1 1.000000000000E+0002
404 0 435 675 7 1.220000000000E-0001 0.000000000000E+0000 2.455000000000E+0001 5.00
405 0 315 630 16 1.104000000000E+0000 1.421000000000E+0000 7.500000000000E-0001 2.94
135 90 165 90
135 105 165 105
135 120 165 120
  
```

FIG. 3 – Le fichier (*.cir)

Le fichier (*.cir) va être transformé pour créer un fichier "Netlist" (vehicule-4moteur.net) présenté dans la figure (FIG. 4). Cette transformation est sensé définir les potentiels communs entre éléments. A partir du fichier *.net, le simulateur génère les équations dy-

```

%% Fichier NetListe
20
998 1 1 0.000000000000E+0000 2.000000000000E+0001 5.000000000000E-0005 1.000000000000E+0000
505 1 2 3 4 5 6 7 5.400000000000E+0002
505 2 8 9 10 11 12 13 5.400000000000E+0002
505 3 14 15 16 17 18 19 5.400000000000E+0002
505 4 20 21 22 23 24 25 5.400000000000E+0002
445 1 5 6 7 26 27 28 29 30 31 1.040000000000E-0002 1.500000000000E-0001
445 2 11 12 13 32 33 34 35 36 37 1.040000000000E-0002 1.500000000000E-0001
445 3 17 18 19 38 39 40 41 42 43 1.040000000000E-0002 1.500000000000E-0001
445 4 23 24 25 44 45 46 47 48 49 1.040000000000E-0002 1.500000000000E-0001
903 1 29 50 28 27 26 2 3 4 5.000000000000E-0001
903 2 35 51 34 33 32 8 9 10 5.000000000000E-0001
903 3 41 52 40 39 38 14 15 16 5.000000000000E-0001
903 4 47 53 46 45 44 20 21 22 5.000000000000E-0001
702 1 54 2.090000000000E-0001 1.000000000000E-0001
700 1 50 1.000000000000E+0002
700 2 51 1.000000000000E+0002
700 3 52 1.000000000000E+0002
700 4 53 1.000000000000E+0002
404 1 55 1.220000000000E-0001 0.000000000000E+0000 2.455000000000E+0001 5.000000000000E+0000
405 1 55 54 30 36 42 48 31 37 43 49 1.104000000000E+0000 1.421000000000E+0000
  
```

FIG. 4 – Le fichier (*.net)

namiques et statiques déduites du modèle RDHC. Une fois notre premier système d'équation est prêt, la résolution numérique peut commencer en utilisant l'une des méthodes numériques choisies par l'utilisateur. La simulation tient compte des valeurs initiales des variables d'états du système.

Etape 3 : Modification d'un composant

Nous pouvons changer les modèles RDHC ou les paramètres d'un composant si nous désirons. Dans cette section, nous montrons les étapes à suivre pour le faire.

Modifier le modèle RDHC

En cliquant sur n'importe quel composant du système étudié, il devient rouge. On appuie une seconde fois sur le bouton droite de la souris, un menu s'affiche en nous permettant de réaliser plusieurs tâches comme le montre la figure (FIG. 5). On choisi alors (Modèle RDCC), cela permettra de visualiser le modèle RDCC concernant ce composant. A partir de cette fenêtre, nous appuyons sur le bouton (Modifier) pour accéder au module du développement des modèles RDCC effort et RDCC flux (FIG. 6).

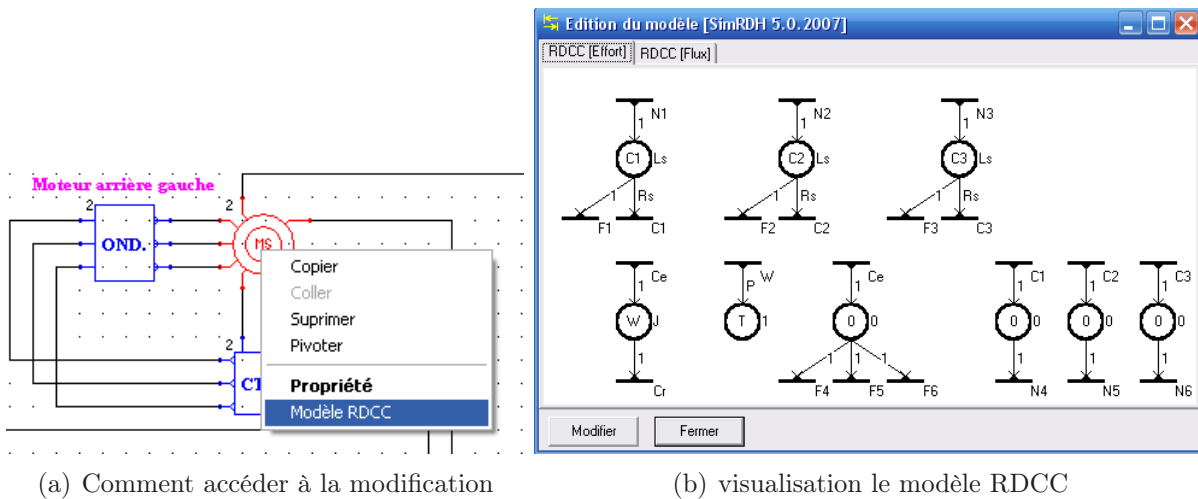


FIG. 5 – Visualisation du RDCC

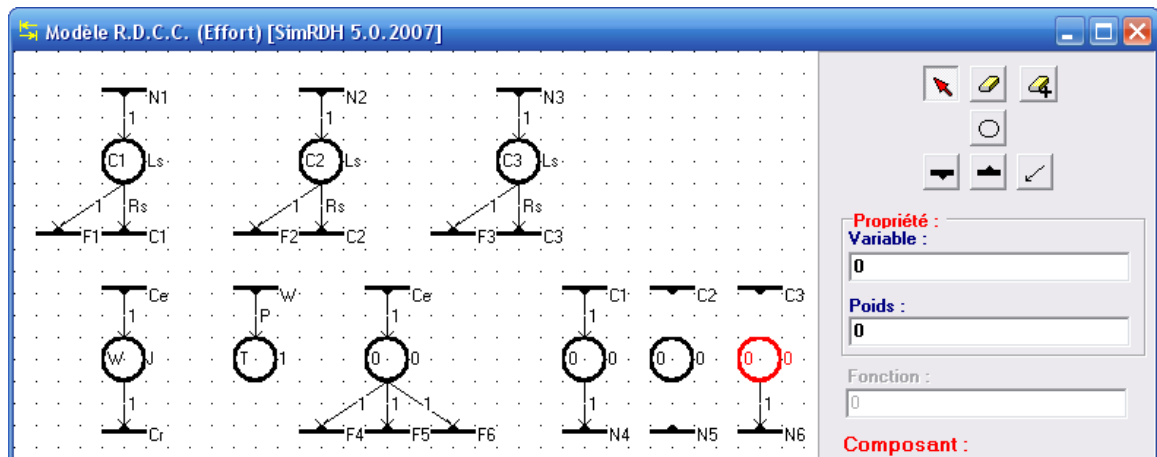
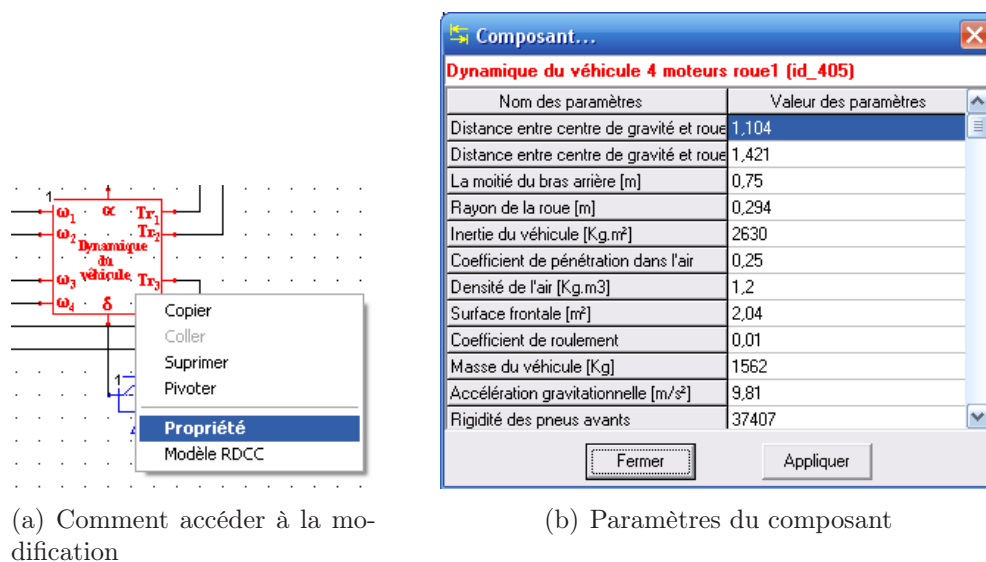


FIG. 6 – Module de modification

Modifier les paramètres

De la même manière, nous pouvons changer les paramètres d'un composant à tout instant si on désire, par exemple, voir l'influence de l'un des paramètres sur le comportement du véhicule. La figure (FIG. 7) montre cette procédure. Double clic dans le champs (Valeur des paramètres) nous permet d'introduire la ou les nouvelle(s) valeur(s) désirée(s).



(a) Comment accéder à la modification

(b) Paramètres du composant

FIG. 7 – Modifier les paramètres

Etape 4 : Simulation et analyse des résultats

L'utilisateur peut lancer la simulation s'il est satisfait de son système. Une fois la simulation est terminée, un petit message s'affiche sur l'écran posant à l'utilisateur la question montrée sur la figure (FIG. 8). Le lancement du module Tcourbe se fait en répondant à la question par (Yes). Pour plus de détaille voir la partie C de la section (§4.2.2.3). Le module Tcourbe permettra d'une part, la visualisation des résultats et d'autre part, il donne la possibilité à l'utilisateur d'agir sur les courbes.

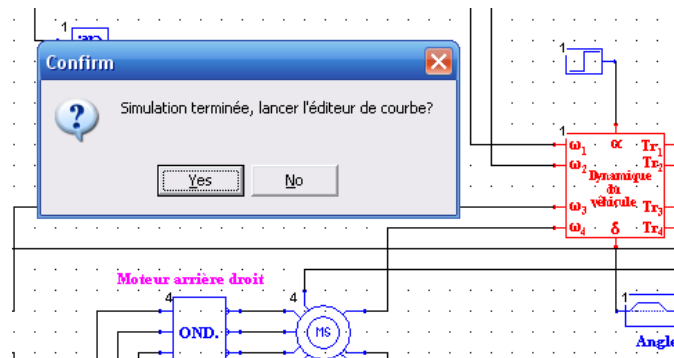


FIG. 8 – Lancement de Tcourbe

Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers

Résumé :

Les pollutions sonores et par gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation de carburant en constante augmentation, impliquent de plus en plus le véhicule électrique (VE) au cœur des débats autour de l'énergie. Le VE est l'une des solutions préconisées, par les constructeurs automobiles et les organismes de recherche, pour remplacer peu à peu les véhicules classiques notamment dans les centres villes. Dans ce contexte, la simulation numérique générique, rapide et précise s'impose comme le moyen incontournable dans la conception de VE de plus en plus performants et compétitifs.

Ainsi, ce travail de thèse a comme objectif principal de développer notre simulateur dédié aux VE et nommé ELEctric VEhicle Simulator (ELEVES). Il utilise un formalisme graphique nommé Réseau Dynamique Hybride à Composant (RDHC) pour extraire le système d'équations. Le point fort d'ELEVES réside dans le fait qu'il permet à l'utilisateur non seulement de construire et simuler un VE à partir de ses bibliothèques pré-établies, mais également de construire ses propres modèles. Un modèle dynamique du véhicule à trois degrés de liberté, et une modélisation d'un moteur synchrone à aimants permanents ainsi que son alimentation ont été construits à l'aide d'ELEVES. Afin d'inclure la fonctionnalité de la commande du VE, nous avons adopté une démarche systémique à travers la représentation énergétique macroscopique (REM) du système. Ensuite, la structure maximale de commande (SMC) a été établie à partir de la REM globale du système dans l'optique de contrôler la vitesse du véhicule.

Enfin, trois architectures de VE ont été traitées afin de mettre en évidence quelques fonctionnalités d'ELEVES et de montrer les étapes suivies lors de la réalisation de telles applications. Ces systèmes sont le VE à deux roues motrices d'abord sans puis avec la commande de la vitesse du véhicule et le VE à quatre roues motrices sans la commande de la vitesse du véhicule. La confrontation des résultats de notre outil avec ceux fournis par le logiciel Matlab/Simulink donne de très bonnes corrélations entre les deux outils.

Mots Clés : Réseau dynamique hybride à composant (RDHC), Véhicule électrique (VE) et/ou hybride (VEH), Dynamique du véhicule, Moteurs électriques, Moteur roue, Sources d'énergie, Représentation Energétique Macroscopique (REM), Structure Maximale de Commande (SMC), Modélisation et simulation des VE.

Contribution to development of a simulator for electric vehicles

Abstract :

Since noise and polluting gases as well as fuel consumption rise steadily, the interest in electric vehicles (EV) is ever more increasing nowadays. The EV is one of the solutions recommended by vehicle manufacturers and research organizations, to gradually replace the conventional vehicles especially in city centres. In this context, the generic, quick and accurate numerical simulation proves to be the main means of designing more and more high-performing and competitive electric vehicles.

Thus, this research work has the goal to develop a simulator dedicated to electric vehicles and called ELEctric VEhicle Simulator (ELEVES). It uses the Component Hybrid Dynamic Nets (CHDN) as a graphical formalism for extracting the system of equations. The advantage of ELEVES is that it allows the user not only to build and simulate an EV from its pre-established libraries, but also to build his own models. A dynamic model of vehicle with three degrees of freedom, a model of a permanent magnets synchronous motor with its power supply have been implemented into ELEVES. In order to include the control aspect of EV, a systematic approach based on the Energetic Macroscopic Representation (EMR) has been adopted. Thus, starting from EMR, a Maximum Control Structure (MCS) has been established to control the EV speed.

Finally, three architectures of EVs have been simulated to highlight some ELEVES's capabilities and to show the necessary steps to follow for building such applications. They are the two in-wheel drives EV with and without speed control and the four in-wheel drives EV. In order to assess the validity of ELEVES, the same simulations have been performed using Matlab/Simulink; the results obtained from both softwares are in a good agreement.

Keywords : Component Hybrid Dynamic Nets (CHDN), Electric Vehicle (EV), Hybrid Electric Vehicle (HEV), Vehicle Dynamics, Electric Motors, In-Wheel Motor drive, Power Supply, Energetic Macroscopic Representation (EMR), Maximum Control Structure (MCS), Modeling and simulation of EV.